

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**SISTEMA DE SEGURIDAD ADAPTABLE PARA BRAZOS**

**ROBÓTICOS**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL**

**GRADO DE BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN**

**INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**AUTOR**

Jorge Hernán Luna Gutiérrez

**ASESOR:**

Diego Martín Arce Cigüeñas

Lima, Octubre, 2019



## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo diseñar conceptualmente un sistema de seguridad para brazos robóticos adaptable a diferentes contextos de operación industrial: traslado de materiales, soldadura y ensamble de piezas; la finalidad del trabajo es dar solución a la creciente necesidad de sistemas de seguridad industrial frente al incremento de tecnologías de brazos robóticos en el mercado local.

Los objetivos específicos de este trabajo de investigación son: el estudio del estado del arte de las tecnologías y normativas relacionadas con la seguridad industrial, la definición y esquematización de las funciones del sistema, el diseño de tres soluciones preliminares y la definición de la solución conceptual óptima a través de un análisis técnico-económico.

Como principal conclusión del trabajo realizado se diseñó preliminarmente un sistema de seguridad adaptable a al menos tres casos de aplicación industrial planteados con un nivel de desempeño PLb según la norma ISO 13849-1:2015. El sistema cuenta con dispositivos de sensado con tecnología láser: dos escáneres láser y una barrera multihaz. La actuación del corte de energía al brazo se realiza a través de un contactor y la emisión de la alarma, a través de una torreta de luces. Finalmente, el control de todos los elementos del sistema se realiza a través de PLC de seguridad.



## INDICE DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	3
INDICE DE CONTENIDO.....	I
INDICE DE TABLAS .....	II
INDICE DE FIGURAS.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IV
INTRODUCCIÓN .....	1
ANTECEDENTES .....	2
1.1 Problemática .....	2
1.2 Descripción de la propuesta de solución .....	4
1.3 Objetivos.....	5
1.4 Metodología .....	5
1.5 Alcance .....	5
1.6 Estado del Arte.....	6
1.6.1 Patentes.....	6
1.6.2 Sistemas comerciales.....	8
1.6.3 Dispositivos de Seguridad .....	9
1.6.4 Normativa relativa a Sistemas de Seguridad .....	13
DISEÑO CONCEPTUAL.....	16
2.1 Exigencias del Sistema .....	16
2.2 Estructura de Funciones.....	18
2.3 Conceptos de Solución .....	23
2.4 Análisis Técnico-económico.....	28
2.5 Solución Óptima.....	39
CONCLUSIONES .....	40
BIBLIOGRAFÍA .....	41
ANEXO A: LISTA DE REQUERIMIENTOS .....	42
ANEXO B: MATRIZ MORFOLÓGICA .....	45

## INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. 1 Tabla comparativa de dispositivos de seguridad.....	12
Tabla 2. 1 Correspondencia de valores para determinación de PL .....	17
Tabla 2. 2 Conceptos de solución para el sistema .....	24
Tabla 2. 3 Criterios para asignación de pesos .....	28
Tabla 2. 4 Tabla de criterios y resultados de evaluación .....	29
Tabla 2. 5 Puntajes para CRT1 .....	31
Tabla 2. 6 Cálculo de MTTF para canales de la Solución 1 .....	31
Tabla 2. 7 Cálculo de MTTF para canales de la Solución 2 .....	32
Tabla 2. 8 Cálculo de MTTF para canales de la Solución 3 .....	33
Tabla 2. 9 Puntajes para CRT4.....	34
Tabla 2. 10 Puntuación del criterio CRE2 .....	37



## INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. 1 Número de robots industriales instalados por cada 10 mil habitantes en la industria manufacturera en el 2017.....	3
Figura 1. 2 Porcentaje de accidentes industriales en el 2018. ....	4
Figura 1. 3 Disposición de elementos para patente US7768549 .....	6
Figura 1. 4 Esquema de aplicación de patente US4532501, zona de manipulación y zona de peligro .....	7
Figura 1. 5 Diagrama de funciones para patente US 2004/0194594 A1 .....	7
Figura 1. 6 Sistema de Seguridad para Robótica Industrial .....	8
Figura 1. 7 Comunicación del sistema principal y sistema de seguridad para un Celda de Carga Robótica.....	9
Figura 1. 8 Safety Light Barriers: a) Sensor de un haz; b) Sensor de múltiples haces .....	10
Figura 1. 9 Bordes Sensibles de Seguridad .....	10
Figura 1. 10 Aplicación de escáneres láser en procesos de manufactura .....	11
Figura 1. 11 Sistema de detección de manos .....	11
Figura 1. 12 Módulo de Seguridad Siemens SIRIUS 3SK1 .....	12
Figura 1. 13 Determinación del Nivel de Performance (PL) .....	14
Figura 2. 1 Gráfica para determinación de PL según la función de seguridad .....	17
Figura 2. 2 Estructura de Funciones .....	19
Figura 2. 3 Subsistema de sensores .....	20
Figura 2. 4 Subsistema Mecánica .....	20
Figura 2. 5 Subsistema de Energía .....	21
Figura 2. 6 Subsistema de Procesamiento.....	21
Figura 2. 7 Subsistema de Actuadores.....	22
Figura 2. 8 Subsistema de Comunicación.....	23
Figura 2. 9 Solución 1 .....	25
Figura 2. 10 Solución 2 .....	26
Figura 2. 11 Solución 3 .....	27
Figura 2. 12 Diagrama de canales relacionados a la función de seguridad para Solución 1 .....	31
Figura 2. 13 Diagrama de canales relacionados a la función de seguridad para Solución 2 .....	32
Figura 2. 14 Diagrama de canales relacionados a la función de seguridad para Solución 3 .....	33
Figura 2. 15 Cobertura de área de la Solución 1 .....	35
Figura 2. 16 Cobertura de área de la Solución 2 .....	35
Figura 2. 17 Casos de cobertura .....	36
Figura 2. 18 Gráfica de relación técnica-económica .....	38
Figura 2. 19 Concepto de Solución Óptimo.....	39

## LISTA DE SÍMBOLOS

PFH<sub>D</sub>: Probabilidad de falla peligrosa por hora [1/h]  
PL : Performance Level  
SRP/CS: Safety Related Part for Control System. Componente relacionado a la seguridad para el sistema de control.  
MTTF: Mean Time to Failure. Tiempo promedio a la falla.  
B<sub>10</sub>: Número de ciclos para que hayan 10% de probabilidades de fallar  
MTTF<sub>D</sub>: Mean Time to Dangerous Failure. Tiempo promedio a la falla peligrosa



## INTRODUCCIÓN

La tecnología de brazos robóticos se ha visto impulsada debido al fenómeno de automatización industrial a nivel mundial y local. La introducción de esta tecnología traerá consigo nuevos riesgos en los ambientes laborales compartidos, por ello que es importante la implementación de sistemas de seguridad. El presente trabajo de investigación realiza un estudio del estado del arte en torno a la temática de seguridad industrial y el diseño conceptual de un sistema de seguridad para brazos robóticos adaptable a diferentes contextos de operación industrial: traslado de materiales, soldadura y ensamble de piezas.

En el primer capítulo, se definirá la problemática a atacar conjuntamente con los objetivos, metodología y alcance del trabajo. Asimismo, se realizará un estudio del estado de la tecnología respecto a componentes especializados, así como patentes y sistemas comerciales de aplicaciones de seguridad en maquinaria del sector manufacturero cuyos principios o métodos de protección pueden ser aplicados en el diseño del sistema óptimo. Además, se presentan las normativas y estándares más importantes que rigen el diseño de sistemas de seguridad industriales a nivel nacional e internacional.

En el segundo capítulo, se definirán las exigencias del sistema, así como su estructura interna de funciones. Siguiendo la metodología de trabajo propuesta, se esbozarán tres conceptos de solución parciales combinando distintas alternativas para las funciones internas del sistema. Luego de un análisis técnico-económico, se seleccionará la mejor solución y se corregirán aspectos del sistema a partir de las fortalezas de las otras dos soluciones parciales con el fin de desarrollar un diseño conceptual óptimo.

Finalmente se presentarán las conclusiones relacionadas con el trabajo de investigación realizado.



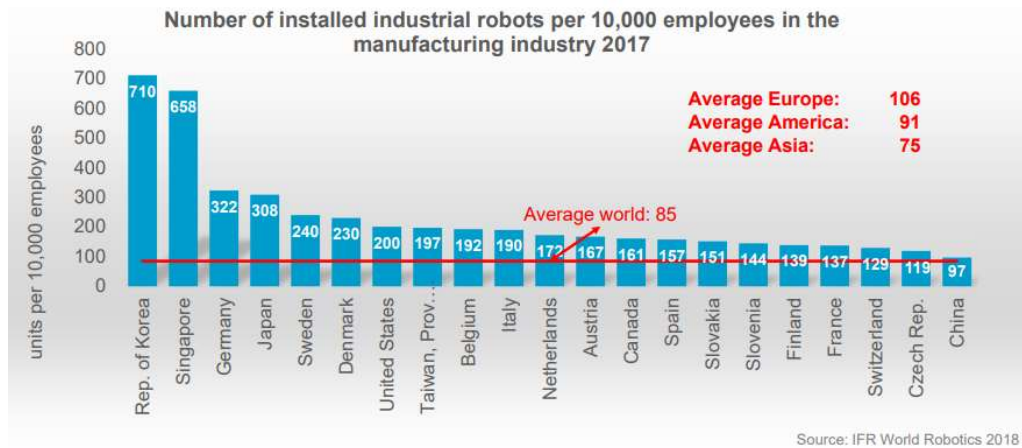
## **CAPÍTULO 1**

### **ANTECEDENTES**

En el presente capítulo se describe la problemática a atacar y la propuesta de solución que se desarrollará a través de todo el documento. Como información transversal para el desarrollo del presente trabajo, también se presentan los objetivos generales y específicos, así como la descripción de la metodología a utilizar y el alcance del trabajo. A continuación, se presentan patentes y sistemas comerciales de aplicaciones de seguridad en maquinaria del sector manufacturero cuyos principios o métodos de protección pueden ser aplicados en el diseño del sistema óptimo. Además, se presentan las normativas y estándares más importantes que rigen el diseño de sistemas de seguridad industriales a nivel nacional e internacional.

#### **1.1 Problemática**

Ante el creciente desarrollo industrial y el aumento de la demanda de productos de consumo, las empresas manufactureras se han visto motivadas a aumentar la producción encontrando en la robótica y la automatización la herramienta ideal para este trabajo. Los países que han tomado la delantera en este fenómeno de automatización de procesos a nivel industrial son la República de Corea y Singapur, con cifras de 7,1 y 6,5 robots respectivamente por cada 100 empleados en el país, como se muestra en la Figura 1 (Federación Internacional de Robótica, 2018). Según el reporte 2018 del Foro Económico Mundial, se proyecta que para el 2022 el 37% de las empresas del mundo adopten tecnologías de robots estacionarios, el 41% de impresión 3D y el 23% de robots humanoides.



**Figura 1. 1 Número de robots industriales instalados por cada 10 mil habitantes en la industria manufacturera en el 2017**

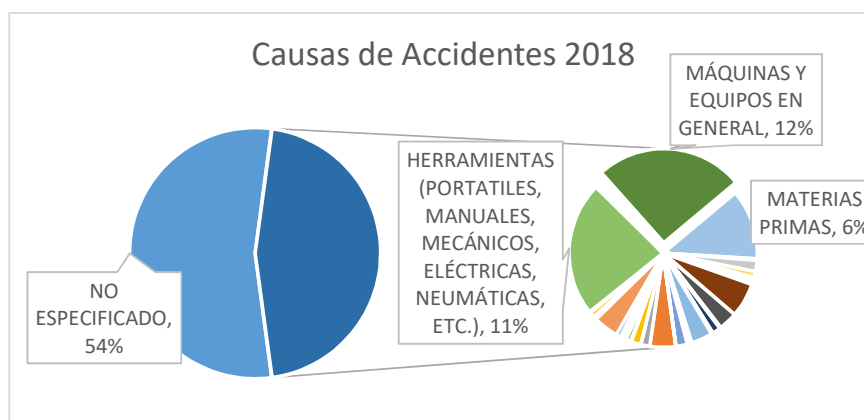
**Fuente: Federación Internacional de Robótica<sup>1</sup>.**

En los últimos años, Perú también ha avanzado en la misma dirección que estos países, agregando etapas automatizadas en los procesos de soldadura, empaquetamiento, carga, manipulación, etc. Según el estudio de RTM (Real Time Management), la robótica ya es parte del proceso productivo del 30% de las empresas peruanas y otro 27% de ellas están en proceso de información o prueba. Además, la tecnología de fabricación aditiva forma parte del proceso del 10% de las empresas (BBC, 2017)

Como consecuencia del fenómeno de automatización, las plantas de producción alrededor del mundo lidian con nuevos problemas causados por la aparición de los robots en los procesos operador comúnmente por personas: la reducción de puestos de trabajo, el requerimiento de nuevas habilidades en los empleados, el aumento de las exigencias de atención y responsabilidad, así como la seguridad de los empleados (Wander Abramo & Salazar).

Solamente en Estados Unidos se han presentados 20 accidentes fatales relacionados con robótica industrial en un año (Gestión, 2015) y según el reporte anual del Ministerio de Trabajo y Producción del Empleo del 2018, en ese año el 12% de los agentes causantes de accidentes laborales en la industria manufacturera fueron Máquinas y Equipos en General, según se muestra en la Figura 1. 2 elaborada a partir de la data de dicho reporte. De esta manera podemos observar que el crecimiento de la automatización de procesos industriales aparece conjuntamente con la necesidad de sistemas de seguridad y dispositivos de alta confiabilidad orientados a la prevención de accidentes fatales detectando manos, pies y personas en áreas críticas.

<sup>1</sup> Federación Internacional de Robótica. (2018). Informe Anual.



**Figura 1. 2 Porcentaje de accidentes industriales en el 2018.**

**Fuente:** Elaboración Propia con motivo de la tesis a partir de la data del Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo<sup>2</sup>

Los brazos robóticos son también un gran grupo de dispositivos que conforman las filas de los equipos y maquinarias automatizadas y en cuyo alrededor también trabajan paralelamente personas. En el mercado peruano ya existe la oferta de dispositivos de protección tipo óptico y electrónico, pero la interacción entre ellos y la puesta en marcha del sistema son materia de estudios de seguridad específicos que añaden tedio a la tarea y que se tienen que repetir una y otra vez en cuanto varíe la situación.

Para atacar el problema de la inseguridad en el ambiente de trabajo industrial en zonas cercanas a brazos robóticos es importante que los procesos previos a la instalación del sistema sean eficientes; algunos de estos procesos son: análisis de riesgos, elección de equipos, diseño de la arquitectura del sistema e instalación de equipos. La reducción de los tiempos y costos de estos procesos dependerá de la adaptabilidad del sistema de seguridad.

En el presente trabajo de investigación se realizará un estudio del estado de la tecnología relacionada a la seguridad industrial para brazos robóticos y se diseñará un sistema de seguridad genérico para brazos robóticos, que cumpla con los requerimientos de protección exigidos por las leyes y estándares adaptándose a sus necesidades de protección. Gracias a la adaptabilidad del sistema, los costos y tiempos de implementación se reducirán. Este beneficio económico espera motivar la implementación de los sistemas de seguridad en la industria peruana e indirectamente disminuir el número de accidentes por máquina al completarse la introducción de los brazos robóticos al mercado peruano.

## 1.2 Descripción de la propuesta de solución

En el presente trabajo de investigación se diseñará conceptualmente un sistema de seguridad genérico para brazos robóticos adaptable a los contextos de aplicación: traslado de materiales, soldadura y ensamble de piezas. Este sistema contará con una interfaz que permita mostrar su estado respecto a la condición de alarma o corte de

<sup>2</sup> Empleo, M. d. (2018). Data de accidentes anuales por categorías.

emergencia. Adicionalmente, el diseño del sistema de protección cumplirá las normas y estándares locales e internacionales; sin embargo, no contemplará la seguridad de las personas u objetos que ingresen a la zona de seguridad por sobre la altura de los dos metros y medio.

### **1.3 Objetivos**

#### **Objetivo General**

Diseñar conceptualmente un sistema de seguridad para brazos robóticos adaptable que cumpla con las normas de seguridad exigidas para maquinaria y evite accidentes en perjuicio de los colaboradores debido a su interacción con el brazo robótico.

#### **Objetivos Específicos:**

- Realizar un estudio del estado de la tecnología respecto a sistemas de seguridad para brazos robóticos, dispositivos de seguridad industrial y normativa técnica vigente.
- Definir las funciones que debe cumplir el sistema y sus elementos en conjunto, así como esquematizar el intercambio de información, materia y energía que ocurre entre cada una de estas funciones
- Realizar la selección de alternativas de solución para las funciones del sistema y diseñar tres conceptos de solución a partir de la combinación de dichas alternativas.
- Seleccionar un diseño conceptual de solución óptimo a partir del análisis técnico-económico de los tres conceptos de solución anteriormente diseñados.

### **1.4 Metodología**

Para la realización del objetivo general de la tesis se seguirá la siguiente metodología de trabajo:

Se realizará un estudio del estado del arte de sistemas de seguridad para brazos robóticos, dispositivos de protección y normativas para los sistemas de seguridad industriales. Luego, se realizará y analizará su estructura de funciones. A continuación, se completará una matriz morfológica con las alternativas de solución para cada una de las funciones detectadas, a partir de la cual se presentarán tres diseños conceptuales previos.

Después de un análisis técnico económico de los tres diseños conceptuales de solución, se seleccionará el óptimo para la solución de la problemática mencionada.

### **1.5 Alcance**

En el presente trabajo de investigación se realizará un estudio del estado del arte y se desarrollará una solución conceptual óptima a partir de un análisis técnico-económico de tres soluciones parciales las cuales contendrán componentes investigados del estado del arte.

## 1.6 Estado del Arte

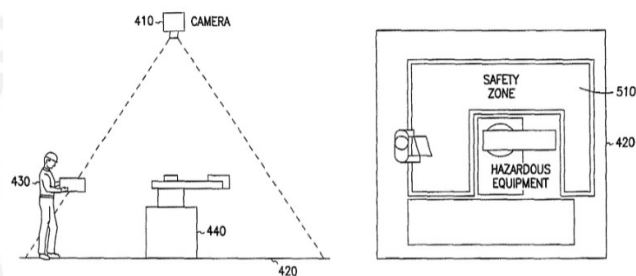
### 1.6.1 Patentes

- Sistema de Seguridad de Máquinas con zona de mutua exclusión. (Estados Unidos Patente nº US 7768549, 2001)

En la presente patente se utiliza una cámara en la parte superior del área a proteger, la cual a través de procesamiento de imágenes detecta la presencia de intrusos en la “Zona de Seguridad”, ver Figura 1. 3.

Los parámetros comparables del sistema son los siguientes:

Detección de presencia:	Análisis de imagen por cámara
Protección de manos:	No necesita
Protección de piernas:	No necesita
Método de protección:	Bloqueo de pase y apagado de maquinaria



**Figura 1. 3 Disposición de elementos para patente US7768549**  
Fuente: Duane Cofer, D.<sup>3</sup>

- Sistema de Seguridad con acoplamiento capacitivo para máquinas-herramientas. (Estados Unidos Patente nº US 4532501, 1982)

En la presente patente se utiliza un campo capacitivo para detectar la presencia de manos y dedos en un “Área Peligrosa”, ver Figura 1. 4.

Los parámetros comparables del sistema son los siguientes:

Detección de presencia:	Campo capacitivo generado por antena
Protección de manos:	Campo capacitivo generado por antena
Protección de piernas:	No necesita
Método de protección:	Apagado de máquina o emisión de señal de advertencia, ambos con señal luminosa y sonora

<sup>3</sup> Duane Cofer, D. (8 de Junio de 2001). Estados Unidos Patente nº US 7768549.

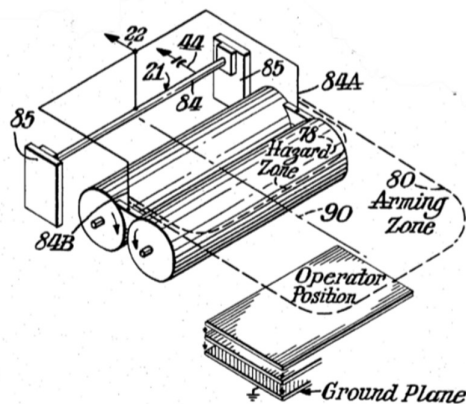


Figura 1. 4 Esquema de aplicación de patente US4532501, zona de manipulación y zona de peligro

Fuente: Hoffman, G.<sup>4</sup>

- Sistema de seguridad para máquinas. (Estados Unidos Patente n° US 2004/0194594 A1, 2004)

En la presente patente se utiliza un campo capacitivo para detectar la cercanía de algún objeto a una maquinaria de corte. Los sensores se acoplan cerca de las cuchillas de corte. Además, se integra un circuito de corte y un sistema de alarma, ver Figura 1. 5.

Los parámetros comparables del sistema son los siguientes:

Detección de presencia:	No tiene
Protección de manos:	Detección por variación de capacitancia. Placas acopladas a elementos cercanos a zonas de peligro
Protección de piernas:	No tiene
Método de protección:	Apagado de máquina con señal luminosa y sonora

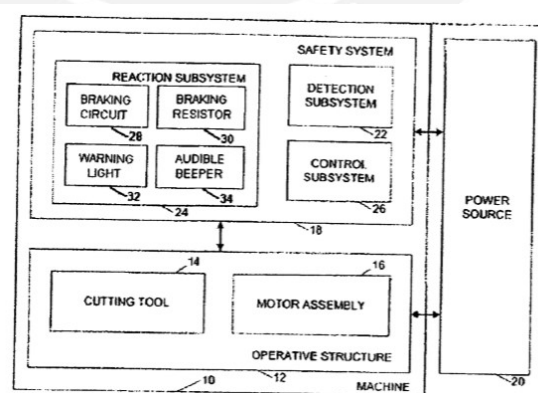


Figura 1. 5 Diagrama de funciones para patente US 2004/0194594 A1

Fuente: Dils, J.<sup>5</sup>

<sup>4</sup> Hoffman, G. (2 de Febrero de 1982). Estados Unidos Patente n° US 4532501.

<sup>5</sup> Dils, J. (16 de Enero de 2004). Estados Unidos Patente n° US 2004/0194594 A1.

### 1.6.2 Sistemas comerciales

- Sistema de seguridad con interfaz gráfica de proximidad

El sistema de seguridad para brazos robóticos presentado por la empresa Tekniker utiliza un Escáner Láser de Seguridad para detectar la presencia de personas en un área determinada. Dicha área se divide en dos zonas: una de prevención y otra de peligro. Cuando es detectado un objeto en el área de prevención, el sistema emite una alarma, pero no detiene el robot sino hasta que se llega al área de peligro.

El estado del sistema es mostrado a través de una interfaz gráfica, mostrada en la Figura 1. 6, que indica la ubicación de los objetos dentro de ambas áreas y la distancia radial al brazo.



**Figura 1. 6 Sistema de Seguridad para Robótica Industrial**  
**Fuente: Robótica Industrial: Seguridad<sup>6</sup>**

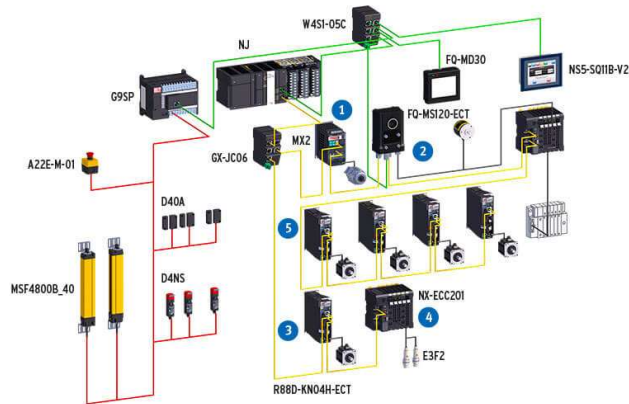
- Sistema de seguridad para faja transportadora a alta velocidad

El sistema propuesto por la empresa OMRON permite realizar un proceso de selección a alta velocidad con un robot posicionador 3D, fajas de transporte y procesamiento de imágenes para ubicación de elementos. Conectado a este sistema principal, se encuentra un sistema de seguridad, el cual se separa de la red tras un controlador especializado para eventos de parada de emergencia tal y como vemos en la Figura 1. 7.

En este sistema, se utilizan barreras de luz, torretas de luces, interruptores y sensores de fin de carrera sin contacto. El PLC de seguridad se comunica en red con el PLC principal por medio de EtherNet/IP.

---

<sup>6</sup> Robótica Industrial: Seguridad (2014). [Película]. Recuperado el 29 de Enero de 2018, de <https://www.youtube.com/watch?v=WrwNKveMBNs>



**Figura 1. 7 Comunicación del sistema principal y sistema de seguridad para un Celda de Carga Robótica**

Fuente: OMRON<sup>7</sup>.

### 1.6.3 Dispositivos de Seguridad

Existen casi tantos tipos de dispositivos de seguridad como máquinas a nivel industrial (Hablemos de Seguridad). Uno de ellos son los optoelectrónicos activos o AOPD, estos permiten una interacción frecuente del operador con la maquinaria sin generar barreras visuales. Esto se debe a que se utiliza tecnología láser y óptica.

El estándar de conexión de salida de estos dispositivos es tipo M12 roscados, además la alimentación suele ser de 24 VDC, para ello es necesaria una fuente de poder además de la unidad de control.

- Barreras o cortinas ópticas de seguridad (Safety Light Barriers)

Existen de dos tipos: de un haz, mostrado en la Figura 1. 8 a), y de múltiples haces, mostrado en la Figura 1. 8 b), de luz roja o infrarroja. Las barreras de un solo haz tienen un alcance de hasta 65 m y constan de un receptor y emisor, los cuales pueden estar ambos en un mismo módulo o no. Las barreras de múltiples haces o rejillas ópticas también constan de un emisor y un receptor que puede o no estar en un sólo módulo; además, a través de un sistema de espejos se puede alcanzar una protección multilateral. Su resolución varía entre 14 mm y 500 mm de separación entre haces.

<sup>7</sup> OMRON. (s.f.). Celda de carga robótica por visión o empaquetador de surtido. Recuperado el 15 de Abril de 2019, de <https://industrial.omron.es/es/solutions/packaging/packaging-machine-automation-solutions/robotic-infeed-module>



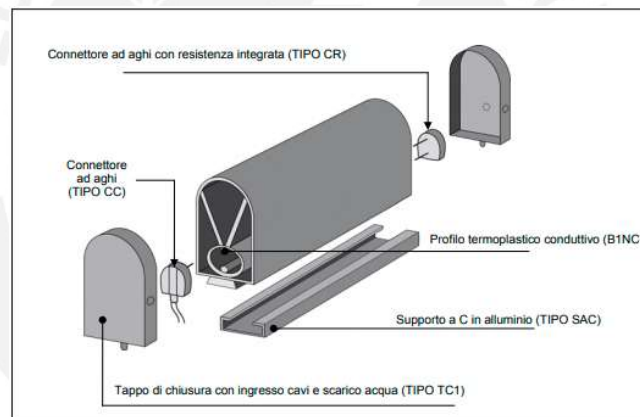


**Figura 1. 8 Safety Light Barriers: a) Monohaz; b) Multihaz**  
Fuente: PEPPERL+FUCHS<sup>8</sup>.

- Bordos o perfiles de flanco de seguridad

Se componen de una regleta de aluminio, un elemento de jebe y una pareja de receptor-emisor. La señal de parada se realiza cuando el elemento de jebe se deforma y el haz, que atraviesa el elemento a través de un espacio tubular, se ve interrumpido por la deformación.

Las aplicaciones de este dispositivo son sobre todo para maquinaria manufacturera, como, por ejemplo: paletizadoras. El dispositivo se puede apreciar en la Figura 1. 9.



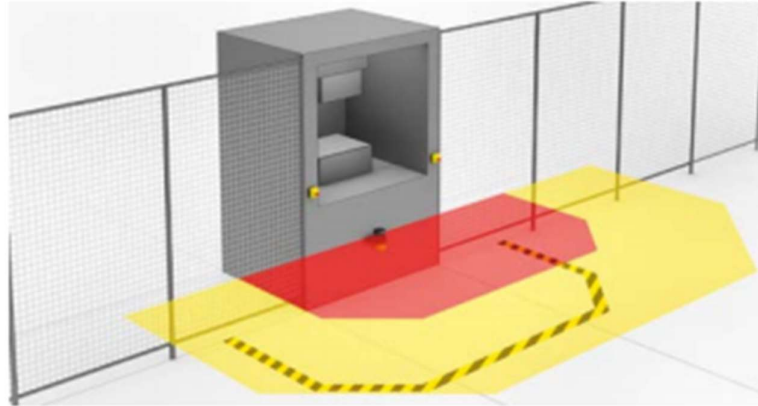
**Figura 1. 9 Bordos Sensibles de Seguridad**  
Fuente: Automation, S<sup>9</sup>.

- Escáneres láser de seguridad

Estos dispositivos miden distancia a partir del principio de la propagación del haz de luz en el aire. Contienen un espejo giratorio que permite sensar entre 180 y 275° en un área de entre 2 a 7 m de radio, como se muestra en la aplicación de la Figura 1. 10. El tiempo de respuesta de estos dispositivos está entre 60 y 120 ms.

<sup>8</sup> PEPPERL+FUCHS. (s.f.). Sensores de Seguridad. Recuperado el 29 de Enero de 2018, de [https://www.pepperl-fuchs.com/global/es/classid\\_45.htm](https://www.pepperl-fuchs.com/global/es/classid_45.htm)

<sup>9</sup> Automation, S. (s.f.). Bordos Sensibles. Gama System. Recuperado el 15 de Abril de 2019, de <http://www.starautomation.es/productos/bordes-gamma-system>



**Figura 1. 10 Aplicación de escáneres láser en procesos de manufactura**  
Fuente: SICK<sup>10</sup>.

- Sistema de cámara de seguridad o detección de manos

El sistema mostrado en la Figura 1. 11 utiliza como base el procesamiento de imágenes digitales, permitiendo un amplio espacio de protección a partir de una pequeña área de instalación. Las áreas protegidas varían entre 0,4 m x 0,4 m a 1,5x 1,5 m. Se utilizan para necesidades de protección en áreas reducidas.



**Figura 1. 11 Sistema de detección de manos**  
Fuente: SICK<sup>8</sup>.

A continuación, se muestra en la Tabla 1. 1 la comparativa entre los dispositivos anteriormente mencionados según sus parámetros más importantes para su implementación.

---

<sup>10</sup> SICK. (s.f.). Dispositivos de protección optoeléctricos. Recuperado el 6 de Febrero de 2018, de [https://www.sick.com/es/es/c/PRODUCT\\_ROOT#g184853](https://www.sick.com/es/es/c/PRODUCT_ROOT#g184853)

**Tabla 1. 1 Tabla comparativa de dispositivos de seguridad**  
**Fuente: Elaboración Propia con información de SICK<sup>8</sup> y PEPPERL+FUCHS<sup>11</sup>.**

Dispositivo o Sistema	Barreras ópticas de múltiples haces	Barreras ópticas de un solo haz	Bordes o Flancos	Escáner Láser	Sistema de cámara
Detección de manos	O	X	X	O	O
Detección de piernas	O	O	O	O	X
Detección de cuerpo	X	O	O	O	X
Área máxima de protección	2.1 x 10 m	60 m lineales	10 m lineales	Radio de 7 m con ángulo de 275°	1.5 x 1.5 m
Comunicación con el controlador	Conector M12 (5 pin) ON-OFF	Conector M12 (5 pin) ON-OFF	Conector M12 (5 pin) ON-OFF	Conector M12 (5 - 8 pin) ON-OFF	Conector M12 (5 pin) ON-OFF

- Unidades de Control de seguridad (PLC de seguridad)

Estos módulos de funciones ofrecen funciones tales como interbloqueo de inicio/reinicio, silencio, omisión o parada de emergencia. Pueden ser compactos o modulares como el mostrado en la Figura 1. 12.

El tiempo de respuesta de estos equipos varía entre 40 y 50ms dependiendo del tipo de módulo que se anexa.

Las diferencias con los PLC comunes son las siguientes:

- Accionamiento sincronizado para sensado de trabajos a dos manos
- Condiciones lógicas de seguridad integradas para el encendido del módulo ante una parada de emergencia
- Detección de cruces en el cableado
- Redundancia para evaluación de componentes



**Figura 1. 12 Módulo de Seguridad Siemens SIRIUS 3SK1**  
**Fuente: SIEMENS<sup>12</sup>.**

<sup>11</sup> PEPPERL+FUCHS. (s.f.). Sensores de Seguridad. Recuperado el 29 de Enero de 2018, de [https://www.pepperl-fuchs.com/global/es/classid\\_45.htm](https://www.pepperl-fuchs.com/global/es/classid_45.htm)

<sup>12</sup> SIEMENS. (s.f.). Sirius 3SK1 Safety Relays. Obtenido de <https://novedadesautomatizacion.net/sirius-3sk1-modulo-seguridad/>

### 1.6.4 Normativa relativa a Sistemas de Seguridad

- Estándares Internacionales

Con el fin de garantizar la seguridad de los operarios, los fabricantes de todo elemento de seguridad deben alinearse a ciertos estándares internacionales. Esto además permite que se pueda categorizar los dispositivos según el nivel de protección que ofrezcan.

Algunas de las normativas son:

- A. ISO 13849: “Seguridad de las máquinas. Partes del sistema de mando relativas a seguridad”
- B. EN 775: “Robot Manipuladores Industriales. Seguridad”
- C. IEC 62061: “Seguridad de las máquinas. Seguridad funcional de sistemas de mando eléctricos, electrónicos y electrónicos programables relativos a la seguridad”
- D. EN/IEC 61496: “Seguridad de máquinas. Equipos de protección electrosensibles”

Por ejemplo, los sensores fotoeléctricos en barrera de la serie SLA de la marca Pepperl+Fuchs cumplen la categoría 2 o 4 de dispositivos fotoeléctricos de seguridad con auto monitorización conforme a las normas EN 954-1 y EN 61496.

En la Figura 1. 12 se presenta la relación entre el Performance Level y el Safety Integrated Level según la Probabilidad de Falla Peligrosa por Hora. El procedimiento para el cálculo del  $PFH_d$  está detallado en la norma ISO 13849.

### On the Way to a Safe Machine: Determining the Performance Level (PL)

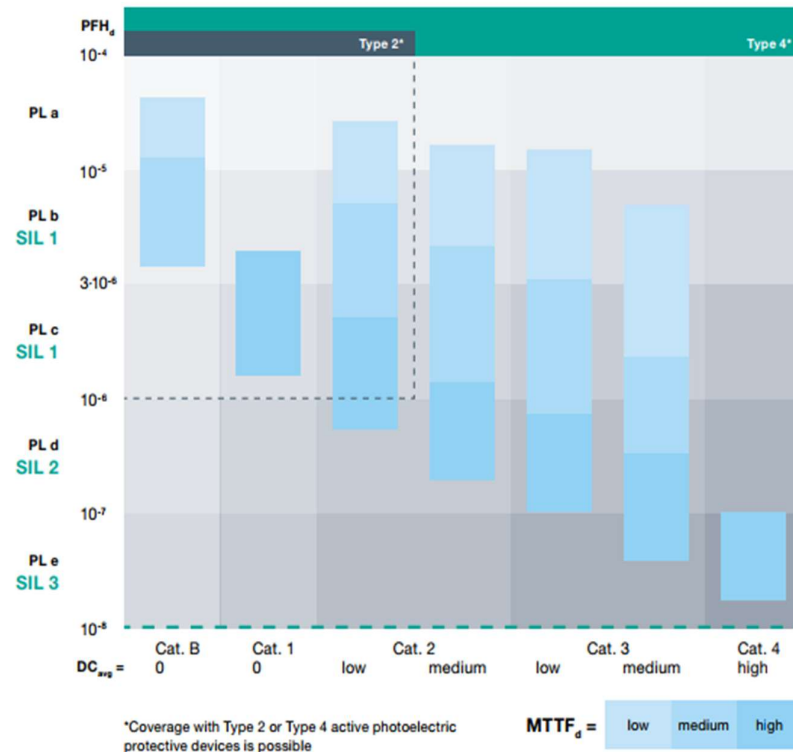


Diagram following EN ISO 13849-1 et al.

**Figura 1. 13 Determinación del Nivel de Performance (PL)**  
Fuente: PEPPERL+FUCHS<sup>13</sup>

- Normativa Nacional

La normativa nacional desde el punto de vista del implementador o cliente se rige principalmente por el Decreto Supremo 42F.

Además, para la implementación integral de medidas de seguridad en la empresa se debe utilizar la ley 29783. DS 005 2012 TR y su modificatoria 30222.

A continuación, se describe el DS 42F y su relación con la presente tesis.

#### A. Decreto Supremo 42F: Reglamento de Seguridad Industrial

El presente decreto se presentó en el marco del Proyecto de Reglamento de Seguridad Industrial y se aprobó el 22 de mayo de 1964 durante el gobierno de Fernando Belaunde Terry. El documento contiene 13 Títulos y 1327 artículos, y tiene como

<sup>13</sup> PEPPERL+FUCHS. (s.f.). Sensores de Seguridad. Recuperado el 29 de Enero de 2018, de [https://www.pepperl-fuchs.com/global/es/classid\\_45.htm](https://www.pepperl-fuchs.com/global/es/classid_45.htm)

objetivo dictar normas y demás disposiciones pertinentes en relación a la Ley de Promoción Industrial N°13270 con miras a garantizar condiciones de seguridad a los trabajadores y proteger las instalaciones y propiedades industriales con el objetivo de asegurar fuentes de trabajo y mejorar la productividad (Congreso de la República).

Los artículos relacionados al objeto de la presente tesis son los siguientes:

**TITULO CUARTO: Resguardos de Máquinas. Capítulo II: Motores Primarios y Equipos de Transmisión de Fuerza. Sección Segunda. Control de Fuerza**

Art. 226: Los botones de arranque y parada, pedales de embrague, cambiacorreas, etc., estarán aislados de tal manera que eviten ser accionados, en forma accidental.

Art. 231: Además del dispositivo de parada de cada máquina, se dispondrá en cada sección o departamento, de dispositivos de parada o conmutadores de emergencia, propiamente marcadas y fácilmente accesibles, los cuales detendrán rápidamente cada unidad de transmisión de fuerza.

**TITULO CUARTO: Resguardos de Máquinas. Capítulo III: Resguardos de normas para máquinas. Condiciones de los Resguardos**

Art. 232: Los resguardos deberán ser diseñados, contruidos, y usados de tal manera que ellos:

- a) Suministren una protección positiva.
- b) Prevengan todo acceso a la zona de peligro durante las operaciones.
- c) No ocasionen molestias ni inconvenientes al operador.
- d) No interfieran innecesariamente con la producción.
- e) Funcionen automáticamente o con el mínimo de esfuerzo.
- f) Sean apropiados para el trabajo y la máquina.
- g) Constituyan preferiblemente parte integrante de la máquina.
- h) Permitan el aceitado, la inspección, el ajuste y la reparación de la máquina.
- i) Pueda utilizarse por largo tiempo con un mínimo de conservación.
- j) Resistan un uso normal y el choque y no pueda fácilmente neutralizarse su función.
- k) No constituyan un riesgo en sí (sin astillas, esquinas afiladas, bordes ásperos u otras fuentes de accidentes); y
- l) Protejan, no solamente contra aquellos que puedan normalmente esperarse sino igualmente contra las contingencias inherentes del trabajo.

## CAPÍTULO 2

### DISEÑO CONCEPTUAL

En el presente capítulo se realiza el diseño del concepto final para el sistema. Para lograr dicho objetivo, se definen inicialmente las exigencias del sistema y la estructura de funciones del sistema. El capítulo concluye con un análisis técnico-económico de las soluciones encontradas combinando las alternativas de solución para cada función del sistema.

#### 2.1 Exigencias del Sistema

Las exigencias y deseos del sistema que se han considerado en la presente tesis, se presentan en el Anexo A.

A continuación, se detalla la justificación de las exigencias más importantes:

##### A. Función Principal:

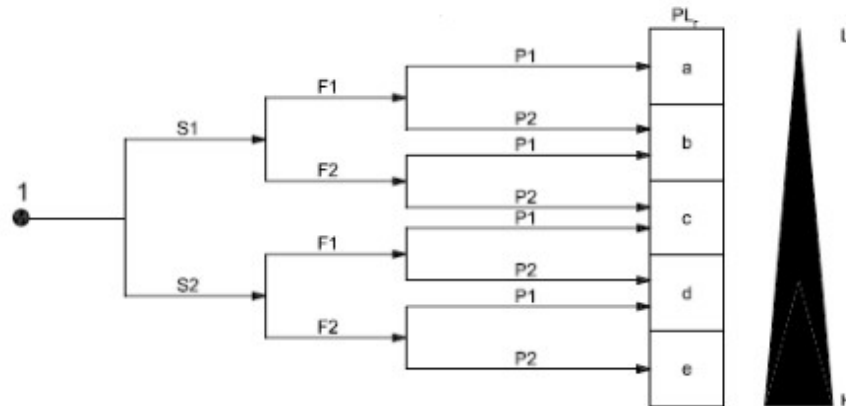
La función principal considerada engloba los enfoques del Reglamento de Seguridad Industrial dictado por el Decreto Supremo 42F relacionadas con un sistema de seguridad:

- a) Garantizar condiciones de seguridad a los trabajadores (empleados y obreros), en todo lugar en que éstos desarrollan sus actividades.
- b) Salvaguardar la vida, salud e integridad física de los trabajadores y terceros, mediante la prevención y eliminación de las causas de accidentes.

##### B. Performance:

Según la norma ISO 13849-1, para que un sistema tenga un Performance Level b este debe tener una Probabilidad de Falla Peligrosa por hora ( $PFH_D$ ) de  $10^{-6}$  a  $3 \times 10^{-6}$  fallas/hora (Knackstedt).

La exigencia del nivel se deriva de un análisis de riesgo según el método recomendado por la norma. Para dicho método se utiliza el diagrama mostrado en la Figura 2. 1.



**Figura 2. 1 Gráfica para determinación de PL según la función de seguridad**  
Fuente: Cetrificazioni Tecniche Ambiente Industria<sup>14</sup> y Congreso de la República<sup>15</sup>

En el gráfico se debe discernir entre 2 valores para 3 variables: Severidad de la lesión (S), la Frecuencia y/o Duración de la Exposición al riesgo (F) y la Posibilidad de Evadir el Peligro (P). La selección del valor para estas variables se puede realizar según la Tabla 2.

**Tabla 2. 1 Correspondencia de valores para determinación de PL**

Fuente: Elaboración propia a partir de información del Cerificazioni Tecniche Ambiente Industria<sup>10</sup>

Variables	1	2
Severidad	Lesión leve (normalmente reversible)	Lesión severa (normalmente irreversible)
Frecuencia	De raro a frecuente y/o de corta duración	De frecuente a constante y/o de larga duración
Posibilidad de Evasión	Posible bajo ciertas condiciones	Prácticamente imposible

### C. Señales (Información):

Los parámetros iniciales de la zona de delimitación de peligro del sistema deben ser una entrada de información ya que permite la característica de adaptabilidad del sistema final.

La Señal de Inicio del sistema es una entrada de información ya que permite la comunicación bidireccional con el controlador central de la planta o brazo robótico stand-alone. Asimismo, la señal de salida del estado del sistema permite la segunda mitad de la comunicación bidireccional.

La Señal de Stop del Brazo Robótico es la salida de control directa que interrumpe el movimiento del brazo y permite salvaguardar la integridad de la persona detectada por el sistema. Se evitará también colisiones con objetos intrusos al área de peligro.

<sup>14</sup> Cetrificazioni Tecniche Ambiente Industria. (s.f.). Functional Safety - Machinery. Milano.

<sup>15</sup> Congreso de la República. (s.f.). Decreto Supremo 42F. Lima.



#### D. Energía:

La alimentación del sistema está condiciona al voltaje y frecuencia de generación asumido para su uso, el cual será Perú (220 Voltios – 60 Hertz).

#### E. Montaje:

Estas exigencias responden al cumplimiento de la característica de adaptabilidad general del sistema.

#### F. Masa:

La presente exigencia responde al cumplimiento de la normativa dictada por el Decreto Supremo N° 005-2009-TR: “Reglamento de la Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo de los estibadores terrestres y transportistas manuales” presentado en el diario El Peruano el 24 de abril de 2009. Según esta normativa, se dispone que un trabajador no puede cargar más de 15 kg.

#### G. Operación:

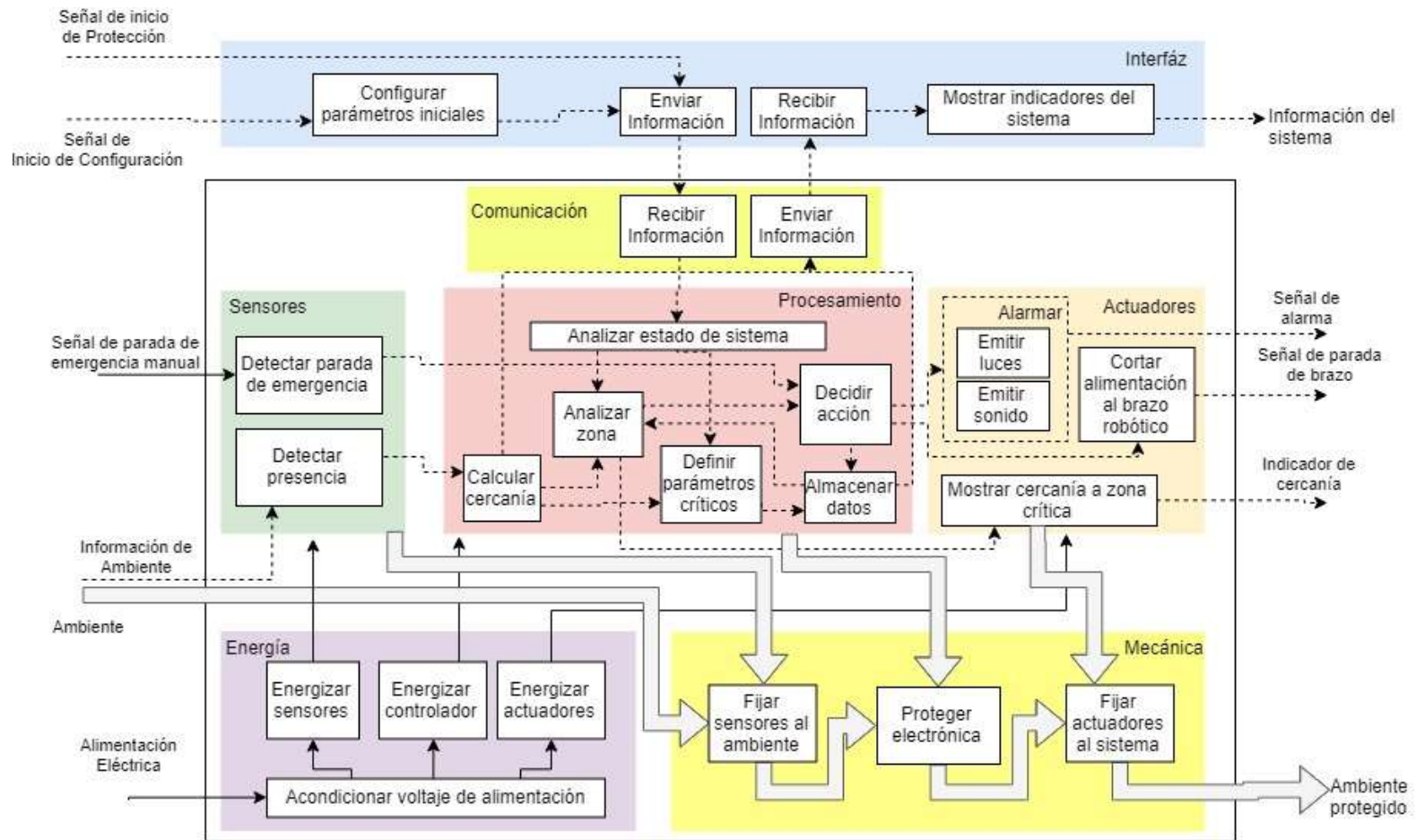
Las medidas mínimas han sido tomadas de los alcances máximos de los modelos más grandes de las tres top marcas en ventas a nivel mundial.

- ABB: IRB 7600-150/3.5: 3.5 m
- YASKAWA: MH900: 4,683 m
- KUKA: KR1000: 3,601 m

Por lo tanto, las medidas mínimas requeridas de operación son de 5,5 metros de radio.

## 2.2 Estructura de Funciones

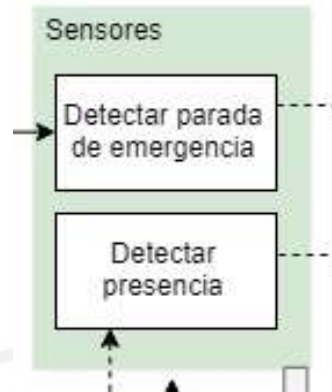
Con el fin de definir los elementos del sistema de seguridad, se analizarán las funciones internas y su interacción entre las entradas y salidas de cada uno. El detalle de la estructura y la conexión entre funciones se muestran a continuación:



**Figura 2. 2 Estructura de Funciones**  
**Fuente: Elaboración Propia**

A continuación, se presentan las funciones de la estructura del sistema divididas en dominios según la relación que guardan con el proceso:

#### A. Dominio de Sensores



**Figura 2. 3 Subsistema de sensores**  
Fuente: Elaboración Propia

A continuación se detallan los bloques mostrados en la Figura 2. 3:

- Detectar parada de emergencia:

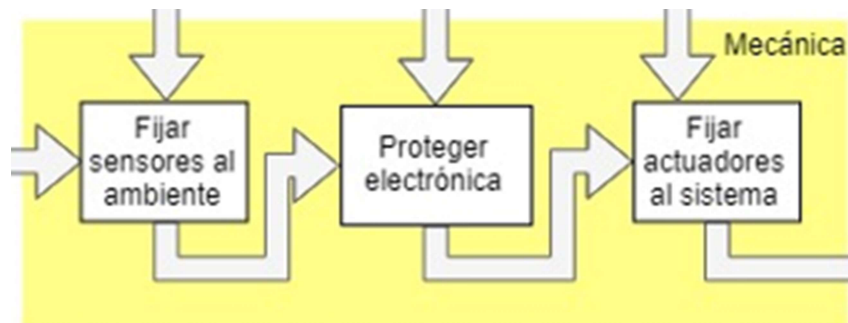
Permitir la solicitud de parada del sistema mediante la interacción física del usuario y emitir una señal de información para su procesamiento y reacción del sistema.

- Detectar presencia:

Emitir una señal de información del estado de la zona que rodea al brazo robótico al controlador, es decir, si algún objeto intruso se encuentra en el área físicamente detectable por el sensor. Este objeto puede ser un colaborador, alguna maquinaria o elemento en tránsito.

Además, esta función incluye la captación de puntos críticos para la delimitación de la zona crítica en la etapa de configuración inicial del sistema.

#### B. Dominio Mecánico



**Figura 2. 4 Subsistema Mecánica**  
Fuente: Elaboración Propia

A continuación se detallan los bloques mostrados en la Figura 2. 4:

- Fijar sensores al ambiente:

Permitir la sujeción de los sensores de manera permanente al ambiente durante el funcionamiento del sistema, tal que se mantenga la delimitación de la zona crítica y la precisión de la captación de las señales.

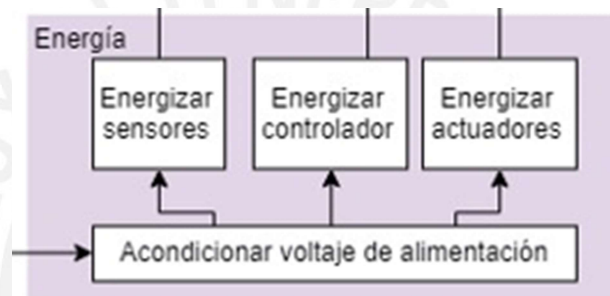
- Fijar actuadores al ambiente:

Permitir el posicionamiento de manera permanente al ambiente de los actuadores de alarma e indicadores para la correcta transmisión de información a los colaboradores.

- Proteger electrónica:

Evitar la afectación de los equipos electrónicos de control de la humedad, calor y corrosión hasta un nivel dentro de las especificaciones propias de los componentes.

### C. Dominio de Energía



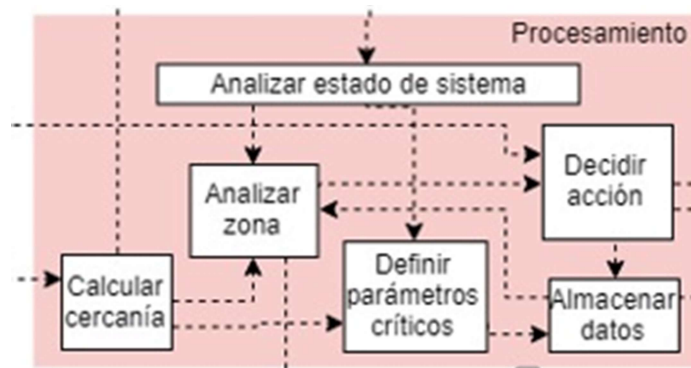
**Figura 2. 5 Subsistema de Energía**  
Fuente: Elaboración Propia

A continuación se detallan los bloques mostrados en la Figura 2. 5:

- Acondicionar energía y energizar:

Recoge la señal de 220/330/440 VAC y las transforma a 12 o 24 VDC según requerimiento de los actuadores y sensores.

### D. Dominio de Procesamiento



**Figura 2. 6 Subsistema de Procesamiento**  
Fuente: Elaboración Propia

A continuación se detallan los bloques mostrados en la Figura 2. 6:

- Analizar estado del sistema:

Indicar el estado general del sistema, pudiendo ser este de “Configuración” o de “Protección”, según la información comunicada desde la interfaz. El resultado del estado del sistema genera señales para proceder con la definición de puntos críticos o el inicio del proceso de protección.

- Analizar zona:

Decidir en qué zona se encuentra el objeto intruso: Danger o Warning a partir de la información de presencia y brindada por el sensor y en comparación con los puntos críticos almacenados luego del proceso de configuración.

- Definir parámetros críticos:

Permite guardar las coordenadas de los alrededores del brazo que pertenecen al borde de las zonas Danger o Warning permitiendo así delimitarlas.

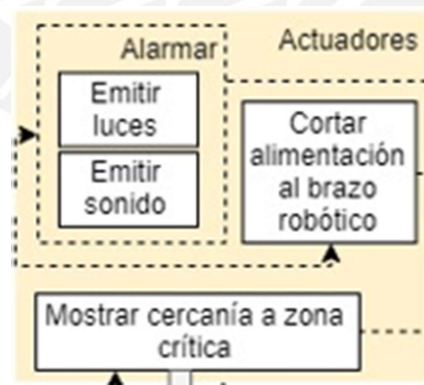
- Almacenar datos:

Guardar la información de acciones realizadas sobre el sistema y los parámetros críticos. Estos últimos con la finalidad principal de retroalimentar la función de “Analizar zona” brindando valores de comparación.

- Decidir acción:

Emitir las señales de acción a los actuadores según la información de la zona en la que se encuentra un objeto intruso y el estado del dispositivo de parada de emergencia.

#### E. Dominio de Actuadores



**Figura 2. 7 Subsistema de Actuadores**  
Fuente: Elaboración Propia

A continuación se detallan los bloques mostrados en la Figura 2. 7:

- Emitir luces:

Transmitir a través de una señal analógica de luz el estado de alarma a los operarios y usuarios.

- Emitir sonido:

Transmitir a través de una señal analógica de sonido el estado de alarma a los operarios y usuarios.

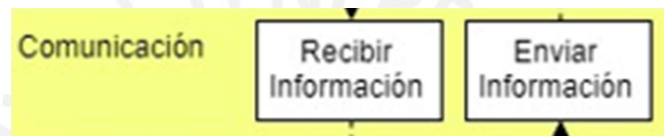
- Cortar alimentación del brazo robótico:

Emitir una señal de control de parada directa o indirecta al brazo robótico de manera que se realice una parada de emergencia.

- Mostrar cercanía a la zona crítica:

Mostrar en algún periférico que esté expuesto a la vista de los operarios y usuarios un indicador de cercanía al brazo robótico y la zona en la que se encuentra.

#### F. Dominio de Comunicación



**Figura 2. 8 Subsistema de Comunicación**  
Fuente: Elaboración Propia

A continuación se detallan los bloques mostrados en la Figura 2. 8:

- Enviar Información:

Transmitir información del sistema a través un protocolo de comunicación a la interfaz

- Recibir Información:

Recibir información del sistema a través un protocolo de comunicación desde la interfaz

### 2.3 Conceptos de Solución

A partir de la estructura detalla anteriormente, se proponen diferentes alternativas de tecnologías y conceptos que pueden dar solución a las funciones del sistema, las cuales se muestran en la matriz morfológica del Anexo B.

Como resultado de combinar alternativas para cada función del sistema, se obtuvieron los siguientes 3 conceptos de solución. Ver Tabla 2. 2.

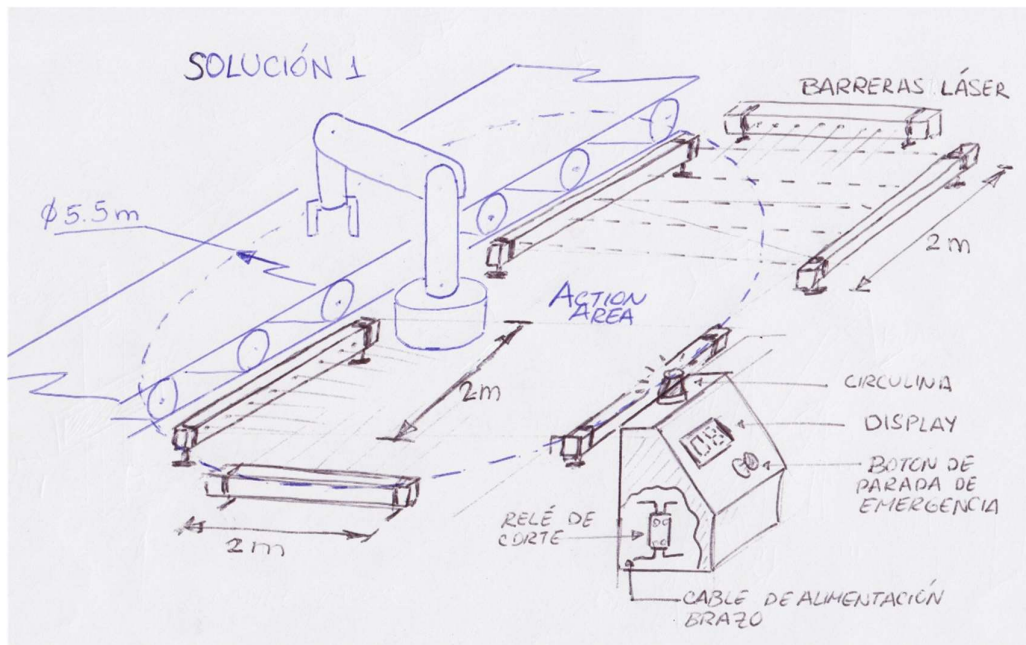
**Tabla 2. 2 Conceptos de solución para el sistema**  
Fuente: Elaboración Propia

<b>Funciones Específicas</b>	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>
Procesar Señales - Hardware	Conjunto de relés	PLC	PC Industrial
Analizar Estado del Sistema	Lógica booleana	Comparación de valores enteros	Comparación de valores enteros
Analizar Zona	Lógica booleana	Comparación de valores enteros	Comparación de valores enteros
Almacenar datos	Registros del controlador		
Definir parámetros críticos	Lógica booleana		
Decidir acción	Lógica booleana	Comparación de valores enteros	Comparación de valores enteros
Calcular cercanía	Lógica booleana	Comparación de valores enteros	Procesamiento de imágenes
Detectar parada de emergencia	Botón tipo hongo biestado	Botón tipo hongo biestado	Palanca
Detectar presencia	Cortinas láser	Escáner láser	Cámara Industrial
Acondicionar energía y energizar sistema	Fuente 24VDC industrial	Fuente 24VDC industrial	Fuente switching
Emitir luces	Circulina	Torre de luces	Torre de luces
Emitir sonido			
Cortar alimentación del brazo	Relé de potencia a alimentación de brazo	Relé de potencia a alimentación de brazo	Señal de control al controlador del brazo
Mostrar cercanía a zona crítica	Display	Display	Pantalla HMI
Fijar sensores al ambiente	Sujeción por soporte al suelo o muros	Sujeción por soporte al suelo o muros	Sujeción al techo
Fijar actuadores al ambiente	Sujeción al panel de control	Poste	Sujeción al techo
Proteger electrónica	Cobertura física		
Recibir Información	Periferia descentralizada	Cable UTP Ethernet	Cable USB
Enviar Información	Periferia descentralizada	Cable UTP Ethernet	Cable USB

A continuación, se detallarán las tres soluciones conceptuales encontradas:



### Solución 1: Barreras láser



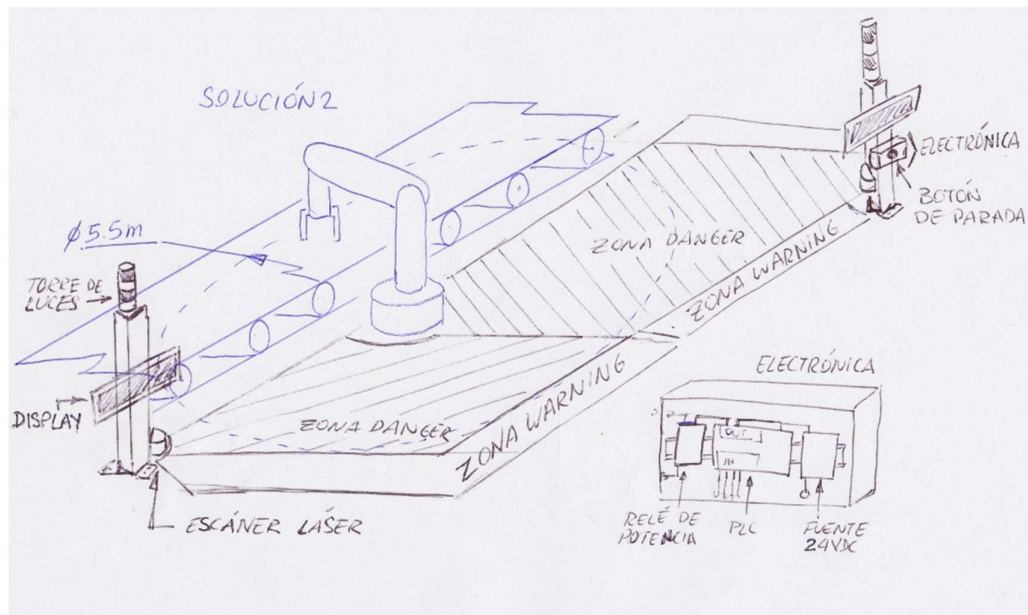
**Figura 2. 9 Solución 1**  
**Fuente: Elaboración Propia**

En este sistema la detección de elementos intrusos se realiza a través barreras láser ubicadas de manera horizontal. La señal de salida de estos sensores es tipo ON-OFF y es direccionada al controlador del sistema, el cual consta de un conjunto de relés que accionan el corte de la alimentación del brazo robótico a través de un relé de potencia.

Además, la lógica booleana cableada en los relés controladores incluye la activación de una circulina ubicada sobre el panel de control. En dicho panel, se mostrará el estado del sistema a través de un display ("RUN" o "STDBY"), así como un botón de parada de emergencia. Ver Figura 2. 9.



## Solución 2: Escáneres láser

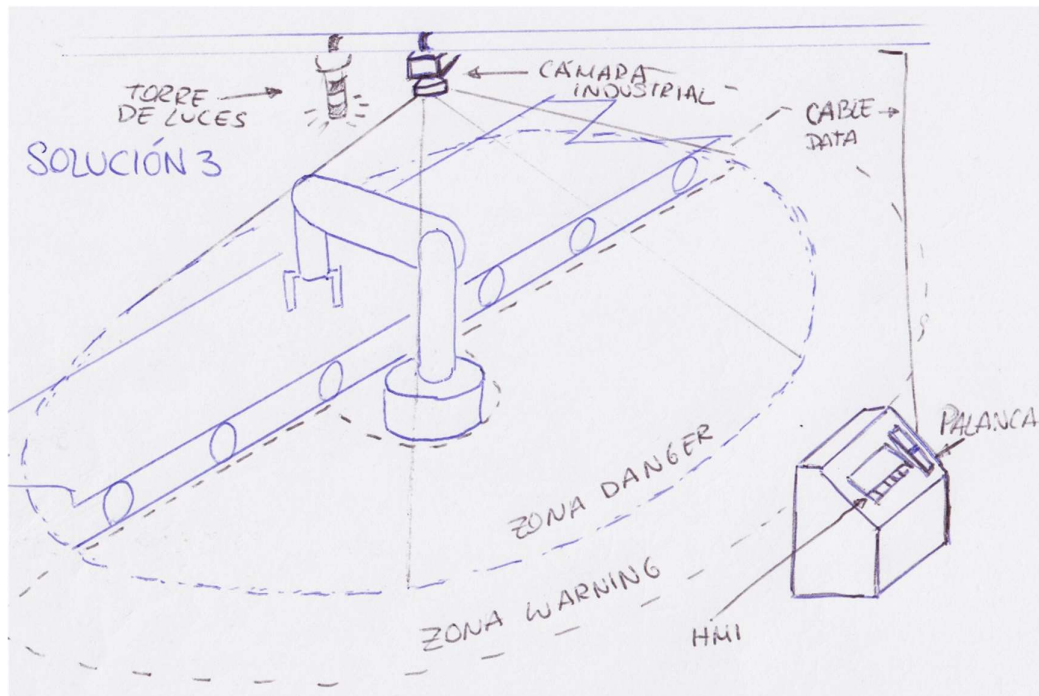


**Figura 2. 10 Solución 2**  
Fuente: Elaboración Propia

En este sistema la detección del objeto intruso se realiza a través de sensores láser tipo escáner acoplados a postes de metal de perfil cuadrado. La señal de salida de estos sensores permite directamente diferenciar entre un estado Protección en zona WARNING y un estado de Protección en zona DANGER. Las señales serán leídas por un controlador PLC, el cual se encuentra protegido en una caja acoplada a uno de los postes.

En cada poste de perfil cuadrado se colocarán displays para facilitar la lectura del estado de la máquina: “RUN” (Protección fuera de la zona DANGER o WARNING), “WARNING” (Protección en la zona WARNING) o “STDBY” (Protección luego de las acciones tomadas por una detección de intruso en la zona DANGER). Además, se utilizarán torretas de luces para emitir la alarma junto con la parada accionada por un relé de potencia. La señal de control de este relé es manejada por el PLC de seguridad. Un botón de parada de emergencia tipo hongo se ubicará en la caja que protege la electrónica. Ver Figura 2. 10.

### Solución 3: Reconocimiento por cámara



**Figura 2. 11 Solución 3**  
**Fuente: Elaboración Propia**

En este sistema la detección del objeto intruso se realiza a través del procesamiento de imágenes captadas por una cámara industrial, dicha cámara se encontrará ubicada por encima del brazo robótico permitiendo delimitar las zonas DANGER y WARNING alrededor del brazo.

Para el posicionamiento de la cámara es necesario que esta esté sujeta al techo o a una viga pasante por encima del brazo, del mismo modo una torreta de luces estará sujeta y emitirá la alarma de prevención y detención del sistema. Las señales de control e información de ambos componentes son llevados y acometidos hasta un panel de control, en el cual se encuentra una PC Industrial, la cual controla el proceso.

Además, en el panel de control también se encuentra una parada de emergencia manual tipo palanca y una pantalla HMI a través de la cual se puede realizar el proceso de delimitación de zonas DANGER y WARNING, así como visualizar el estado del sistema. Ver Figura 2. 11.

## 2.4 Análisis Técnico-económico

A continuación, se presenta el análisis de las soluciones según criterios técnicos y económicos seleccionados. Cada criterio de evaluación tiene un peso diferente según la importancia técnica o valor que agrega al sistema, los pesos de los criterios se asignan del 1 al 4 según la Tabla 2. 3.

**Tabla 2. 3 Criterios para asignación de pesos**  
Fuente: Elaboración Propia

Multiplicador	El criterio tiene relación directa con la función principal del sistema [EXG1]	La valoración del criterio se puede realizar de manera cuantitativa	Existe información suficiente para realizar la evaluación a todas las soluciones
1	No	No	Sí
2	No	Sí	Sí
3	Sí	No	Sí
4	Sí	Sí	Sí

### A. CRT1:

El peso asignado al criterio es 4, debido a que el MTTF es el factor principal para el cálculo del PL y este tiene relación directa con la función principal del sistema. Además, los valores de MTTF se pueden encontrar dentro de las características comerciales de los productos y en los anexos de la norma ISO 13849-1:2015.

### B. CRT2:

El peso asignado al criterio es 3, debido a que la velocidad de reacción del operario en una posible situación de emergencia y la velocidad de supervisión del sistema está ligada a la facilidad de lectura de los valores en la interfaz. Debido a que tiene afectación directa en la relación humano-máquina en situaciones de peligro, el cumplimiento de este criterio tiene relación directa con la función principal del sistema. Sin embargo, la facilidad no es un indicador cuantitativo.

### C. CRT3:

El peso asignado al criterio es 3, debido a que a través del cumplimiento de este criterio se puede alarmar al colaborador u operario antes de que llegue a la zona DANGER; es decir, de que el riesgo de sufrir un golpe aumente. Además, el análisis geométrico de la posición de los sensores y sus áreas de protección activa permite evaluar a todas las soluciones, mas no de manera cuantitativa.

### D. CRT4:

El peso asignado al criterio es 4, debido a que mide la protección de los colaboradores en la zona DANGER. Esta medición se puede realizar de manera cuantitativa a través del cálculo del porcentaje de cobertura respecto a la mínima zona de protección delimitada por la EXG8.

Cabe resaltar, que el área cubierta por los sensores se puede calcular con la información comercial de los sensores.

#### E. CRE1:

El peso asignado al criterio es 3, debido a que la característica de adaptabilidad del sistema permite cumplir la Función Principal en diferentes contextos y por lo tanto se reduce la posibilidad de disminuir el nivel de desempeño (PL) debido a modificaciones en el sistema.

Además, pese a que el criterio no puede ser medido cuantitativamente debido a la variedad de modificaciones que se sean necesarias realizar en un contexto en específico para con el fin de adaptar el sistema a él, dicha comparativa sí puede ser realizada varias veces y para todas las soluciones.

Respecto al carácter económico del criterio, se puede afirmar por lo anteriormente expuesto que el sistema será de mayor valor y generará menores costos en ingeniería en la medida que más adaptable sea.

#### F. CRE2:

El peso asignado al criterio es de 2, debido a que analiza el efecto del sistema en los costos durante una etapa previa al estado de Protección, de modo que no tiene relación directa con la Función Principal [EXG1]. Por otro lado, el criterio es medible de manera cuantitativa a través del conteo de los pasos en el procedimiento de montaje de los sistemas y sus tiempos aproximados de duración.

#### G. CRE3:

El peso asignado al criterio es de 2, debido a que analiza el efecto del sistema en el proceso de compra, la celeridad en el inicio del proceso de montaje y afecta directamente a los costos totales. El criterio puede ser medido a partir del porcentaje de equipos del sistema que puedan ser cotizados en el mercado peruano.

#### H. CRE4:

El peso asignado al criterio es de 2, debido a que analiza el efecto del sistema en los costos totales de seguridad en el contexto a ser instalado. El criterio puede ser medido comparando el presupuesto inicial [EXG12] con la suma de los precios de venta al público cotizados u encontrados en catálogos.

**Tabla 2. 4** Tabla de criterios y resultados de evaluación  
Fuente: Elaboración Propia

Código	Parámetros	Multiplicador	Solución 1 Barreras láser	Solución 2 Escáneres láser	Solución 3 Reconocimiento con cámara	Solución Ideal
<b>Criterios Técnicos</b>						
CRT1	Bajo Tiempo Promedio a la Falla [EXG2]	4	3	3	1	4
CRT2	Facilidad de lectura de los indicadores por parte del operario [EXG5]	3	2	3	2	4
CRT3	Delimitación de área crítica (DANGER y WARNING) [EXG7]	3	1	3	2	4
CRT4	Cobertura del área mínima de protección [EXG8]	4	1	2	3	4
<b>Subtotal Criterio Técnico Estandarizado</b>			0.51	0.69	0.53	<b>1</b>
<b>Criterios Económicos</b>						
CRE1	Adaptabilidad del sistema a diferentes contextos industriales [EXG6]	3	2	3	2	4
CRE2	Facilidad de Montaje [DES4]	2	2	2	1	4
CRE3	Disponibilidad de equipos en el mercado local [EXG10]	2	3	3	2	4
CRE4	Menores costos [EXG12]	2	3	2	1	4
<b>Subtotal Criterio Económico Estandarizado</b>			0.61	0.64	0.39	<b>1</b>

Según la Tabla 2. 4, cada solución ha sido puntuada con un número del 1 al 4, reservando el puntaje 4 para la solución ideal. La evaluación de las soluciones y justificación de los puntajes se encuentran a continuación:

#### Evaluación CRT1:

Para realizar la puntuación se realizará el cálculo de  $MTTF_D$  según el procedimiento estipulado por la norma ISO 13849-1:2015. El procedimiento indica el cálculo del  $MTTF_D$  para cada canal de actuación del sistema. El  $MTTF_D$  del sistema será el  $MTTF_D$  promedio de los canales según la siguiente fórmula:

$$MTTF_D = \frac{2}{3} * \left[ MTTF_{D C1} + MTTF_{D C2} - \frac{1}{\frac{1}{MTTF_{D C1}} + \frac{1}{MTTF_{D C2}}} \right]$$

El cálculo para un canal en particular se realiza a partir de la siguiente fórmula:

$$\frac{1}{MTTF_D} = \sum_{i=0}^{\tilde{N}} \frac{1}{MTTF_{Di}} = \sum_{j=0}^{\tilde{N}} \frac{n_j}{MTTF_{Dj}}$$

$MTTF_D$

Para el canal completo

$MTTF_{Di}$ ,  $MTTF_{Dj}$

Es el  $MTTF_D$  de cada componente que tiene contribución en la seguridad del sistema dentro del canal a evaluar

La segunda sumatoria de la ecuación es una simplificación para los canales con más de un componente igual, donde  $n_j$  es la cantidad de componentes  $j$ .

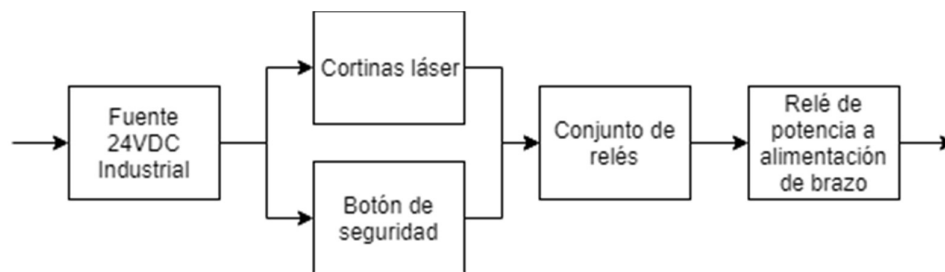
Para puntuar las soluciones se evaluarán los  $MTTF_D$  según la siguiente tabla:

**Tabla 2. 5 Puntajes para CRT1**  
Fuente: Elaboración Propia

MTTF <sub>D</sub>	Puntuación
Hasta 7 años	1
Entre 7 y 36 años	2
Entre 36 y 100 años	3
100 años a más	4

Se ha considerado que a partir de un MTTFD=7 años todos los PL posibles son iguales o mayores a nivel b, y que hasta un MTTFD=36 años se puede obtener un PL menor a nivel c. Además, sobre un MTTFD mayor a 100 todos los sistemas son nivel e. Estas equivalencias son según la Tabla K.1 de la norma ISO 13849-1:2015.

Para la **Solución 1** se presenta el diagrama de canales antes de la parada de emergencia:



**Figura 2. 12 Diagrama de canales relacionados a la función de seguridad para Solución 1**  
Fuente: Elaboración Propia

Para cuyos canales se presentan los siguientes valores de MTTFD en la Tabla 2. 6:

**Tabla 2. 6 Cálculo de MTTF para canales de la Solución 1**  
Fuente: Elaboración Propia

j	Componente	Cantidad n <sub>j</sub>	MTTF <sub>Dj</sub> (años)	1/MTTF <sub>Dj</sub> (1/años)	n <sub>j</sub> /MTTF <sub>Dj</sub> (1/años)
1	Fuente 24VDC Industrial, valores para LOGO!POWER 24VDC / 4A (MTBF = 2 391 480 horas)	1	273	3.66 x 10 <sup>-3</sup>	3.66 x 10 <sup>-3</sup>
2	Cortina láser, valores para Cortina Fotoeléctrica SICK C4000 Fusion (PFH <sub>D</sub> = 1.5 x 10 <sup>-8</sup> [1/horas]) <sup>1</sup>	1	3805	2.63 x 10 <sup>-4</sup>	2.63 x 10 <sup>-4</sup>
3	Botón de seguridad, valores típicos según norma ISO 13849-1:2015 Tabla C.1 (B <sub>10D</sub> = 100 000 ciclos) <sup>2</sup>	1	33 333	3 x 10 <sup>-5</sup>	3 x 10 <sup>-5</sup>
4	Conjunto de relés, valores para Módulo XPS – AC – Parada de Emergencia -24VDC Schneider	3	210.4	4.75 x 10 <sup>-3</sup>	1.43 x 10 <sup>-2</sup>
5	Relé de potencia a alimentación de brazo, valores para Módulo XPS – AC – Parada de Emergencia - 24VDC Schneider	1	210.4	4.75 x 10 <sup>-3</sup>	4.75 x 10 <sup>-3</sup>
Σ( n <sub>j</sub> / MTTFD <sub>j</sub> ) – Canal 1: Cortinas láser					2.35 x 10 <sup>-2</sup>

$\sum (n_j / \text{MTTF}_{Dj})$ – Canal 2: Botón de seguridad				$2.27 \times 10^{-2}$
$\text{MTTF}_D = 1 / \sum (n_j / \text{MTTF}_{Dj})$ (años) – Canal 1				44
$\text{MTTF}_D = 1 / \sum (n_j / \text{MTTF}_{Dj})$ (años) – Canal 2				43.6

1 Se asume una situación de 50% de peligro para el cálculo de transformación de PFH a MTTF [2]

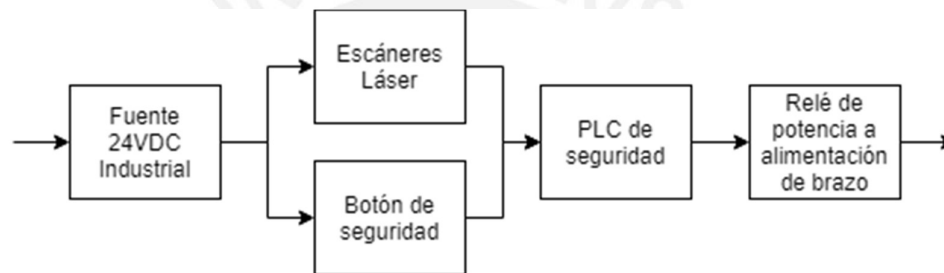
2 Para el cálculo se asume una cantidad de cuasi accidentes de 30 por año, para una planta productora de 300 personas en la cual una parada de emergencia dura 1 hora hasta que se restaure el funcionamiento normal ( $d_{op} = 30$  días/año,  $h_{op} = 1$  hora,  $t_{cycle} = 3600$  seg/ciclo) [1]. Para el cálculo del  $\text{MTTF}_D$  se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{MTTF}_D = \frac{B_{10D}}{0.1 * n_{op}}$$

$$n_{op} = \frac{d_{op} * h_{op} * 3600 \text{ seg/hora}}{t_{cycle}}$$

Usando la fórmula para promediar el  $\text{MTTF}_D$  de los canales, el  $\text{MTTF}_D$  de la solución 1 es 43.8, por lo tanto, su puntuación es de 3.

Para la **Solución 2** se presenta el diagrama de canales antes de la parada de emergencia:



**Figura 2. 13 Diagrama de canales relacionados a la función de seguridad para Solución 2**  
Fuente: Elaboración Propia

Para cuyos canales se presentan los siguientes valores de  $\text{MTTF}_D$  en la Tabla 2. 7:

**Tabla 2. 7 Cálculo de MTTF para canales de la Solución 2**  
Fuente: Elaboración Propia

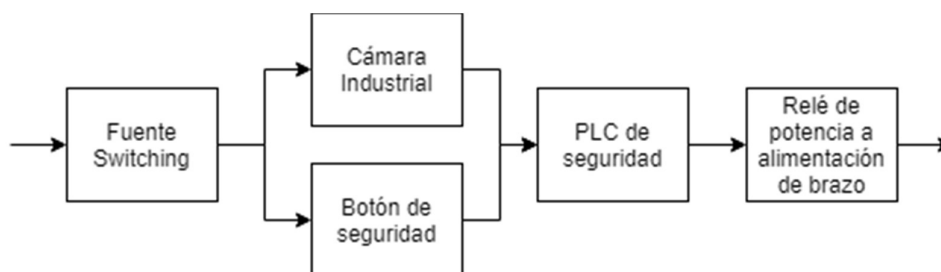
j	Componente	Cantidad $n_j$	$\text{MTTF}_{Dj}$ (años)	$1 / \text{MTTF}_{Dj}$ (1/años)	$n_j / \text{MTTF}_{Dj}$ (1/años)
1	Fuente 24VDC Industrial, valores para LOGO!POWER 24VDC / 4A (MTBF = 2 391 480 horas)	1	273	$3.66 \times 10^{-3}$	$3.66 \times 10^{-3}$
2	Escáner Láser, valores para TiM781S SICK	1	100	$1 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-2}$
3	Botón de seguridad, valores típicos según norma ISO 13849-1:2015 Tabla C.1 ( $B_{10D} = 100\ 000$ ciclos) <sup>1</sup>	1	33 333	$3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$
4	PLC de seguridad, valores para XPS AK safety module Schneider	1	154.5	$6.47 \times 10^{-3}$	$6.47 \times 10^{-3}$
5	Relé de potencia a alimentación de brazo, valores para Módulo XPS – AC – Parada de Emergencia - 24VDC Schneider	1	210.4	$4.75 \times 10^{-3}$	$4.75 \times 10^{-3}$

$\sum (n_j / \text{MTTF}_{Dj})$ – Canal 1: Escáneres láser				$3.49 \times 10^{-2}$
$\sum (n_j / \text{MTTF}_{Dj})$ – Canal 2: Botón de seguridad				$1.49 \times 10^{-2}$
$\text{MTTF}_D = 1 / \sum (n_j / \text{MTTF}_{Dj})$ (años) – Canal 1				40.2
$\text{MTTF}_D = 1 / \sum (n_j / \text{MTTF}_{Dj})$ (años) – Canal 2				67

1 Para el cálculo se asume una cantidad de cuasi accidentes de 30 por año, para una planta productora de 300 personas en la cual una parada de emergencia dura 1 hora hasta que se restaure el funcionamiento normal ( $d_{op} = 30$  días/año,  $h_{op} = 1$  hora,  $t_{cycle} = 3600$  seg/ciclo).

Usando la fórmula para promediar el  $\text{MTTF}_D$  de los canales, el  $\text{MTTF}_D$  de la solución 2 es 54.7, por lo tanto, su puntuación es de 3.

Para la **Solución 3** se presenta el diagrama de canales antes de la parada de emergencia:



**Figura 2. 14** Diagrama de canales relacionados a la función de seguridad para Solución 3  
Fuente: Elaboración Propia

Para cuyos canales se presentan los siguientes valores de  $\text{MTTF}_D$  en la Tabla 2. 8:

**Tabla 2. 8** Cálculo de MTTF para canales de la Solución 3  
Fuente: Elaboración Propia

j	Componente	Cantidad $n_j$	$\text{MTTF}_{Dj}$ (años)	$1 / \text{MTTF}_{Dj}$ (1/años)	$n_j / \text{MTTF}_{Dj}$ (1/años)
1	Fuente Switching, valores para Fuente de alimentación conmutada S8FS-C (MTBF = 135 000 horas)	1	15.4	$6.49 \times 10^{-2}$	$6.49 \times 10^{-2}$
2	Cámara Industrial, valores aproximados de un Sistema de Detección de Manos V200 Workstation SICK( $\text{PFH}_D = 5.6 \times 10^{-9}$ ) <sup>1</sup>	1	20384	$1.96 \times 10^{-4}$	$1.96 \times 10^{-4}$
3	Palanca de seguridad, valores típicos según norma ISO 13849-1:2015 Tabla C.1 ( $B_{10D} = 100\ 000$ ciclos) <sup>2</sup>	1	33 333	$3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$
4	PC Industrial, valores para VL2 BPC 1000 Phoenix Contact (Tiempo de vida de batería = 5 años – típico)	1	5	$2 \times 10^{-1}$	$2 \times 10^{-1}$
5	Relé de potencia a alimentación de brazo, valores para Módulo XPS – AC – Parada de Emergencia - 24VDC Schneider	1	210.4	$4.75 \times 10^{-3}$	$4.75 \times 10^{-3}$



$\sum (n_i / \text{MTTF}_{Dj})$ – Canal 1: Cámara Industrial				$2.7 \times 10^{-1}$
$\sum (n_i / \text{MTTF}_{Dj})$ – Canal 2: Botón de seguridad				$2.7 \times 10^{-1}$
$\text{MTTF}_D = 1 / \sum (n_i / \text{MTTF}_{Dj})$ (años) – Canal 1				3.7
$\text{MTTF}_D = 1 / \sum (n_i / \text{MTTF}_{Dj})$ (años) – Canal 2				3.7

1 Para el cálculo se asume que hay un 50% del performance que el sistema de detección de manos y con una exposición a 50% de situaciones peligrosas.

2 Para el cálculo se asume una cantidad de cuasi accidentes de 30 por año, para una planta productora de 300 personas en la cual una parada de emergencia dura 1 hora hasta que se restaure el funcionamiento normal ( $d_{op} = 30$  días/año,  $h_{op} = 1$  hora,  $t_{cycle} = 3600$  seg/ciclo) [1].

Usando la fórmula para promediar el  $\text{MTTF}_D$  de los canales, el  $\text{MTTF}_D$  de la solución 3 es 3.7, por lo tanto, su puntuación es de 1.

#### Evaluación CRT2:

Para realizar la puntuación se realizará un análisis cualitativo de la alternativa de la función “Mostrar cercanía a zona crítica” según las siguientes consideraciones:

- ¿La alternativa permite mostrar números y letras por encima de los 10 cm? (2 puntos)
- ¿La alternativa permite mostrar generar contraste entre el fondo y las cifras? (1 punto)

Según lo propuesto la puntuación para las soluciones es la siguiente:

Solución 1 (Display) = 3 puntos

Solución 2 (Display) = 3 puntos

Solución 3 (Pantalla HMI) = 2 puntos

#### Evaluación CRT3:

Para realizar la puntuación se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones para las soluciones:

- Si la solución no permite una delimitación de zonas sin aumentar la cantidad de componentes, la puntuación es de 1.
- Si la solución permite la delimitación de zonas con los componentes que incluye, pero esto requiere de una labor operativa que genere costos extra (programación, disposición mecánica, etc.), la puntuación es de 2.
- Si la solución permite la delimitación de zonas con los componentes que incluye sin requerir de una labor operativa que genere costos extra, la puntuación es 3.

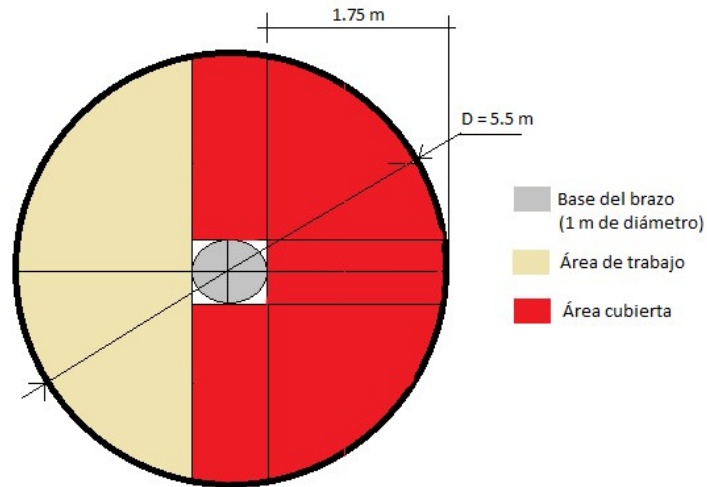
#### Evaluación CRT4:

Para realizar la evaluación de las soluciones se calcularán los porcentajes de cobertura del área mínima requerida ( $95.03 \text{ m}^2$ ) y el número de componentes requeridos para cumplir la tarea según la siguiente tabla:

**Tabla 2. 9 Puntajes para CRT4**  
**Fuente: Elaboración Propia**

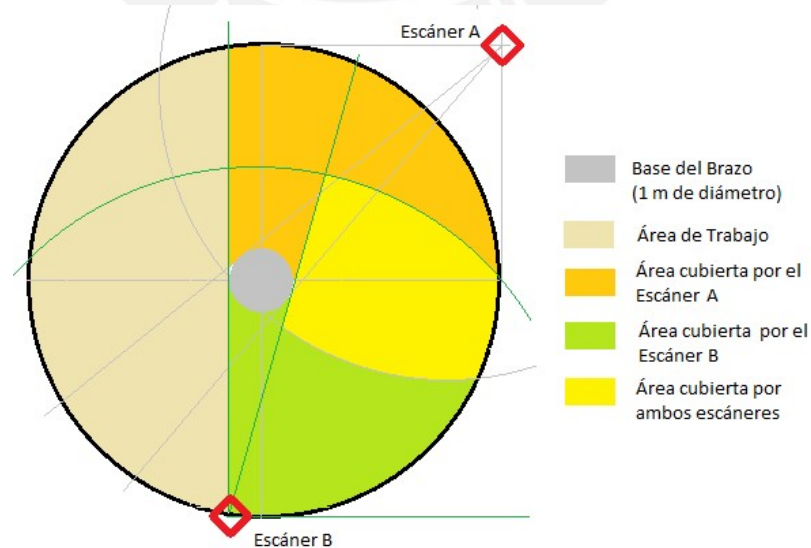
Porcentaje de cobertura por componente	Puntuación
Menos de 25 % de cobertura	1
Entre 25 y 50	2
Entre 50 y 100	3
100% de cobertura	4

Para la **Solución 1**, la cobertura del área se realiza como se muestra en la Figura 2. 15. En ella el área cubierta es  $49.27 \text{ m}^2$  con 3 sensores, por lo tanto, el Porcentaje de cobertura por componente es 17.28%. La puntuación para la Solución 1 según la Tabla 2. 9 es de 1.



**Figura 2. 15 Cobertura de área de la Solución 1**  
**Fuente: Elaboración Propia**

Para la **Solución 2**, la cobertura del área se realiza como se muestra en la Figura 2. 16. En ella el área cubierta es  $50.27 \text{ m}^2$  con 2 sensores, por lo tanto, el Porcentaje de cobertura por componente es 26.45%. La puntuación para la Solución 2 según la Tabla 2. 9 es de 2.



**Figura 2. 16 Cobertura de área de la Solución 2**

Fuente: Elaboración Propia

Para la **Solución 3**, la cobertura del área se realiza por completo exceptuando el Área de trabajo definida en la Figura 2. 15 y Figura 2. 16. Para esta solución el área cubierta es 50.27 m<sup>2</sup> con 1 sensor, por lo tanto, el Porcentaje de cobertura por componente es 52.89%. La puntuación para la Solución 3 según la Tabla 2. 9 es de 3.

#### Evaluación CRE1:

Para realizar puntuar las soluciones respecto a este criterio se utilizarán tres casos:

- Caso 1: El área de trabajo se extiende debido a que el brazo debe seleccionar objetos en un lado y colocarlos en otro. El plano de la vista de planta se visualiza en la Figura 2. 17.
- Caso 2: El área de trabajo se reduce debido a que el brazo robótico realiza operaciones de transformación, por lo que las zonas a cubrir son mayores debido a la facilidad del acceso a las mismas.
- Caso 3: No se tiene acceso al techo para realizar instalaciones de equipos.

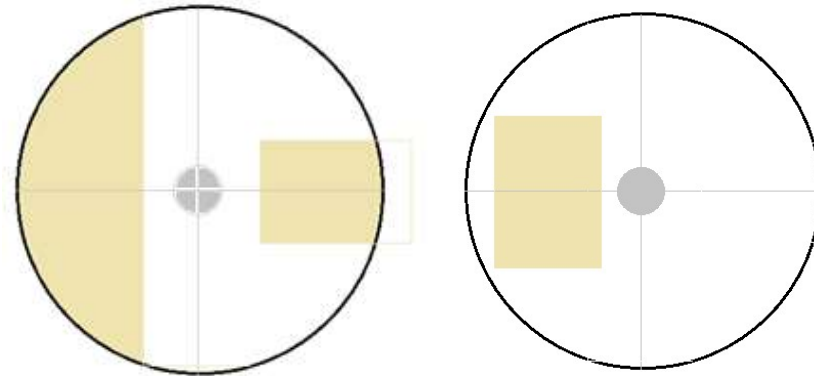


Figura 2. 17 Casos de cobertura

El color gris representa la Base del Brazo y el color beige, el Área de Trabajo.

Caso 1: Pick&Place, vista de planta (izquierda).

Caso 2: Trabajo en zona restringida (derecha).

Fuente: Elaboración Propia

A partir de los casos expuestos se puntuará a cada solución según la cantidad de casos en las que se pueda aplicar sin aumentar o disminuir la cantidad de sensores para no afectar el área cubierta.

Según lo mencionado, se procede a evaluar a las soluciones de la siguiente manera:

- Solución 1: 2 puntos, poca adaptabilidad para el caso 1.
- Solución 2: 3 puntos
- Solución 3: 2 puntos, poca adaptabilidad para el caso 3.

#### Evaluación CRE2:

Para realizar la evaluación de este criterio se tomarán en cuenta la cantidad de componentes a instalar y el tiempo estimado de montaje de cada uno de ellos según la Tabla 2. 10. No se considerarán los tiempos de montaje de los controladores, botones o palancas de emergencia, fuentes de alimentación ni cableado, debido a la similitud entre los tiempos de las soluciones. Los tiempos de calibración se consideran dentro de los tiempos de cada componente según corresponda

**Tabla 2. 10 Puntuación del criterio CRE2**  
**Fuente: Elaboración Propia**

Componente	Cantidad	Tiempo típico de montaje (minutos)	Tiempo Total (minutos)
<b>Solución 1</b>			
Barrera Láser	4	40	160
Circulina	1	20	20
Relé de potencia a alimentación del brazo	1	10	10
Display	1	20	20
<b>Total de Solución 1</b>			<b>210</b>
<b>Solución 2</b>			
Escáner láser	3	20	60
Torre de luces	2	20	40
Poste	2	30	60
Relé de potencia a alimentación del brazo	1	10	10
Display	2	20	40
<b>Total de Solución 2</b>			<b>210</b>
<b>Solución 3</b>			
Cámara Industrial <sup>1</sup>	1	240	240
Torre de luces	1	20	20
Pantalla HMI	1	30	30
<b>Total de Solución 3</b>			<b>290</b>

<sup>1</sup> Incluye el tiempo de acondicionamiento para trabajos en altura

Según la evaluación de tiempos realizada, se considerará el puntaje para cada solución según la diferencia de horas de montaje respecto a la solución ideal (1 hora):

- Solución 1: 2.5 horas (2 puntos)
- Solución 2: 2.5 horas (2 puntos)
- Solución 3: 4.8 horas (1 punto)

#### Evaluación CRE3:

Para realizar la puntuación de este criterio se tomarán en cuenta las siguientes preguntas y puntajes:

- A. ¿Hay 3 o más distribuidores locales de los sensores especializados a utilizar? (1 punto)
- B. ¿Hay 3 o más marcas en el mercado con casa matriz en el Perú? (1 punto)
- C. ¿La marca brinda servicio post-venta a través de su distribuidor directo? (1 punto)

Según las respuestas a dichas preguntas el puntaje es el siguiente:

- Solución 1: Hay más de 3 distribuidores a nivel nacional, entre ellos: SICK (Brammertz), Tapeswitch (DymsolPeru) y Allen-Bradley (Precisión). Los cuales brindan servicio post-venta, sin embargo los 3 son de procedencia extranjera. Las 3 marcas tienen líneas especializadas en seguridad. La puntuación asignada es de 3.
- Solución 2: Hay más de 3 distribuidores a nivel nacional, entre ellos: SICK (Brammertz), Tapeswitch (DymsolPeru) y Allen-Bradley (Precisión). Los cuales brindan servicio post-venta, sin embargo los 3 son de procedencia

extranjera. Las 3 marcas tienen líneas especializadas en seguridad. La puntuación asignada es de 3.

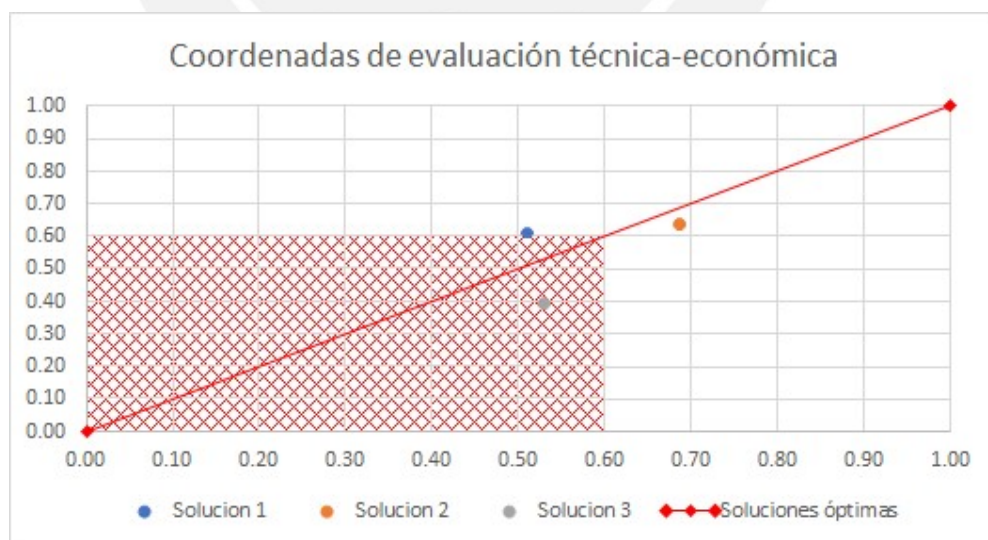
- Solución 3: Hay más de 3 distribuidores a nivel nacional, entre ellos: BST Eltromat (Omnitech Internacional), SICK (Brammertz) y TP Link. Los cuales brindan servicio post-venta, sin embargo los 3 son de procedencia extranjera. Además, de las tres marcas mencionadas solamente 1 (SICK) tiene una línea especializada en seguridad. La puntuación asignada es de 2.

#### Evaluación CRE4:

Para realizar la puntuación de este criterio se ordenará las soluciones según los costos totales para luego asignar un puntaje de 1 al de mayores costos, y 2 y 3 a las otras soluciones consecuentemente:

- Solución 1: 3 puntos, debido a que los relés y los sensores barreras son las alternativas más baratas para las sus funciones correspondientes en comparación con las de otras soluciones
- Solución 2: 2 puntos, debido a que los escáneres láser son equipos especializados y es necesario mayor infraestructura y tiempo de programación para implementar el sistema.
- Solución 3: 1 punto, debido a que los costos de programación y de trabajos en altura son mayores.

Finalmente, según los puntajes asignados y afectados por los multiplicadores correspondientes para cada criterio, se presenta la siguiente gráfica en la Figura 2. 18 en la cual se observa que la Solución 3 tiene una puntuación técnica y económica menor a 0.6, por lo que es descartada. Entre la Solución 1 y 2, es la número 2 la más cercana al punto de la solución ideal (1;1), por lo tanto, el concepto de solución elegido para el sistema es el “Escáneres Láser”.



**Figura 2. 18 Gráfica de relación técnica-económica**  
Fuente: Elaboración Propia

## 2.5 Solución Óptima

Para llegar a la solución óptima se realizarán mejoras en la Solución 2: Escáneres Láser. Se propondrán cambios en el diseño a partir del análisis de los criterios con menores puntajes en la solución ganadora.

CRT4:

La puntuación para este criterio es de 2 puntos, los cuales pueden subir hasta 3 si se disminuye el número de sensores necesarios en 1. Sin embargo, esta medida afectaría drásticamente a la adaptabilidad del sistema, ya que no se podría cubrir por completo el área si el contexto de instalación es para una operación Pick&Place.

Por ello, se procederá a dar mayor valor a la solución a través de la reducción de otros componentes en el análisis del CRE2 y CRE4.

CRE2:

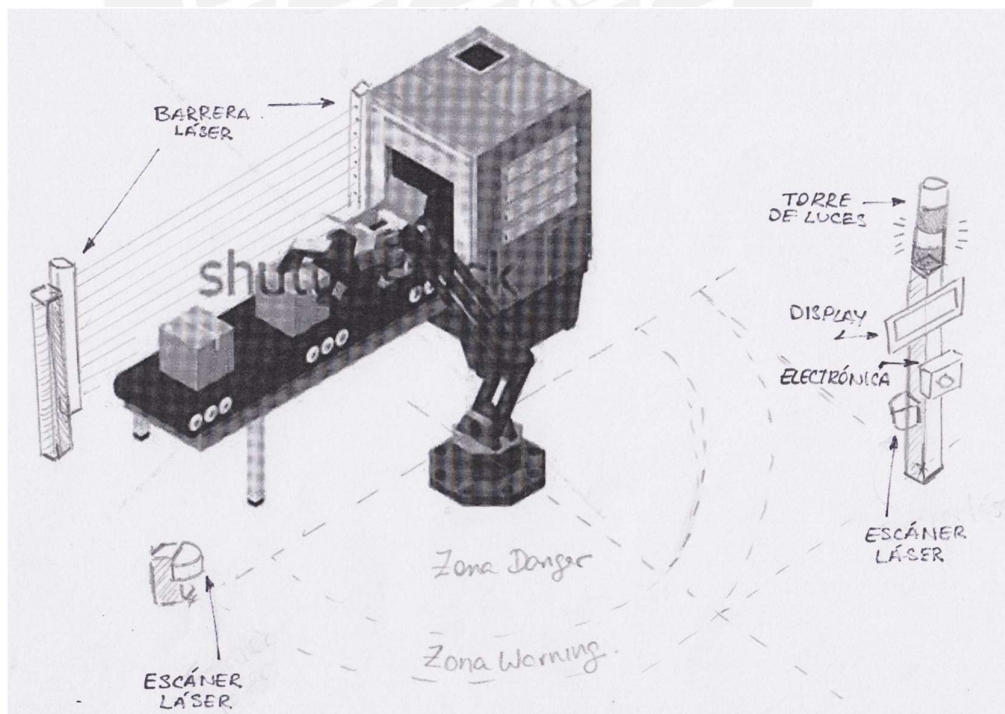
Para aumentar la calificación en este criterio es necesario reducir la cantidad de componentes. Se realizarán las siguientes modificaciones al diseño:

- A. Solo se utilizará una Torre de Luces y un Display.
- B. Al poste que no cargue la electrónica se le reducirá su tamaño de modo que el tiempo de montaje sea menor

CRE4:

Para aumentar la calificación en este criterio debemos reducir los costos en los sensores, es por ello que se reducirá el número de sensores escáner a 2 y se reemplazará uno de ellos por una barrera láser.

La solución final se verá como en la Figura 2. 19:



**Figura 2. 19 Concepto de Solución Óptimo**  
Fuente: Elaboración Propia

## CONCLUSIONES

A partir del trabajo realizado se concluye lo siguiente:

- Se diseñó preliminarmente un sistema de seguridad que es capaz de adaptarse a al menos 3 casos genéricos planteados y cumplir con la norma internacional de diseño ISO 13849-1:2015 con un nivel de desempeño PLb. Esto significa que la Probabilidad de Falla Peligrosa por hora del sistema diseñado ( $PFH_D$ ) es menor que  $10^{-6}$  a  $3 \times 10^{-6}$  fallas/hora.
- A partir de la investigación de la problemática planteada, se identificó que el mercado nacional tiene una proyección de crecimiento en el sector industrial hacia la automatización de procesos, lo que generará nuevas necesidades de seguridad. Dichas necesidades pueden ser cubiertas a través de la implementación de un sistema de seguridad adaptable a diferentes contextos de operación industrial como el que se ha diseñado conceptualmente en este documento.
- Se realizó un estudio del estado de la tecnología del cual se obtuvo que las tecnologías en tendencia para sistemas de seguridad son aquellas tipo láser (barreras y escáneres). Además, se encontró que existen unidades de control especializadas para sistemas de seguridad con una menor  $PFH_D$ .
- Se obtuvieron 3 soluciones preliminares a partir de la combinación de las alternativas de solución para las funciones dentro de una matriz morfológica: (1) Detección por Barreras Láser, (2) Detección por Escáneres Láser y (3) Reconocimiento por cámara. A continuación, se realizó un análisis técnico económico a las 3 soluciones proponiéndose y justificando ocho criterios: cuatro técnicos y cuatro económicos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Allen Bradley. (s.f.). *Dispositivos de seguridad de detección de presencia*. Recuperado el 30 de Enero de 2018, de <http://ab.rockwellautomation.com/es/Sensors-Switches/Operator-Safety>
- Automation, S. (s.f.). *Bordes Sensibles. Gama System*. Recuperado el 15 de Abril de 2019, de <http://www.starautomation.es/productos/bordes-gamma-system>
- BBC. (17 de Marzo de 2017). *Qué países tienen más robots en sus fábricas y cuán cierto es que nos están robando los puestos de trabajo*. Recuperado el Febrero de 2018, de <http://www.bbc.com/mundo/noticias-39267567>
- CEPYME. (2006). *Guía Técnica de Seguridad en Robótica*. Obtenido de ConectaPyme: [www.conectapyme.com/documentacion/2006robotica.pdf](http://www.conectapyme.com/documentacion/2006robotica.pdf)
- Certificazioni Tecniche Ambiente Industria. (s.f.). *Functional Safety - Machinery*. Milano.
- Congreso de la República. (s.f.). *Decreto Supremo 42F*. Lima.
- Dils, J. (16 de Enero de 2004). *Estados Unidos Patente n° US 2004/0194594 A1*.
- Duane Cofer, D. (8 de Junio de 2001). *Estados Unidos Patente n° US 7768549*.
- Empleo, M. d. (2018). *Data de accidentes anuales por categorías*.
- Federación Internacional de Robótica. (2018). *Informe Anual*.
- Gestión, R. (2015). *¿Robots peligrosos? Modelo cooperativo aspira a una relación robot-humano segura*. *Diario Gestión*. Obtenido de <https://gestion.pe/tecnologia/robots-peligrosos-modelo-cooperativo-aspira-relacion-robot-humano-segura-98556>
- Hoffman, G. (2 de Febrero de 1982). *Estados Unidos Patente n° US 4532501*.
- ISO 13849-1. (2015). *Safety of machinery - Safety-related parts of control systems. Part 1: General Principle of design*.
- Knackstedt, H. (s.f.). *ISO 13849-1 PL Calculations Simplified*. Ohio: C&E Sales, inc.
- OMRON. (s.f.). *Celda de carga robótica por visión o empaquetador de surtido*. Recuperado el 15 de Abril de 2019, de <https://industrial.omron.es/es/solutions/packaging/packaging-machine-automation-solutions/robotic-infeed-module>
- PEPPERL+FUCHS. (s.f.). *Sensores de Seguridad*. Recuperado el 29 de Enero de 2018, de [https://www.pepperl-fuchs.com/global/es/classid\\_45.htm](https://www.pepperl-fuchs.com/global/es/classid_45.htm)
- Robótica Industrial: Seguridad* (2014). [Película]. Recuperado el 29 de Enero de 2018, de <https://www.youtube.com/watch?v=WrwNKveMBNs>
- Rockwell Automation. (2011). *Safebook 4. Seguridad Industrial, Protección de Maquinaria, guardas y barreras físicas* (2014). [Película]. Recuperado el 29 de Enero de 2018, de <https://www.youtube.com/watch?v=d0dksGa9Gjo>
- SICK. (s.f.). *Dispositivos de protección optoeléctricos*. Recuperado el 6 de Febrero de 2018, de [https://www.sick.com/es/es/c/PRODUCT\\_ROOT#g184853](https://www.sick.com/es/es/c/PRODUCT_ROOT#g184853)
- SIEMENS. (s.f.). *Sirius 3SK1 Safety Relays*. Obtenido de <https://novedadesautomatizacion.net/sirius-3sk1-modulo-seguridad/>
- Wander Abramo, L., & Salazar, G. (s.f.). *El trabajador frente a la automatización: efectos sociales y percepción de los trabajadores*. Obtenido de [https://www-jstor-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/stable/3540584?seq=9#metadata\\_info\\_tab\\_contents](https://www-jstor-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/stable/3540584?seq=9#metadata_info_tab_contents)

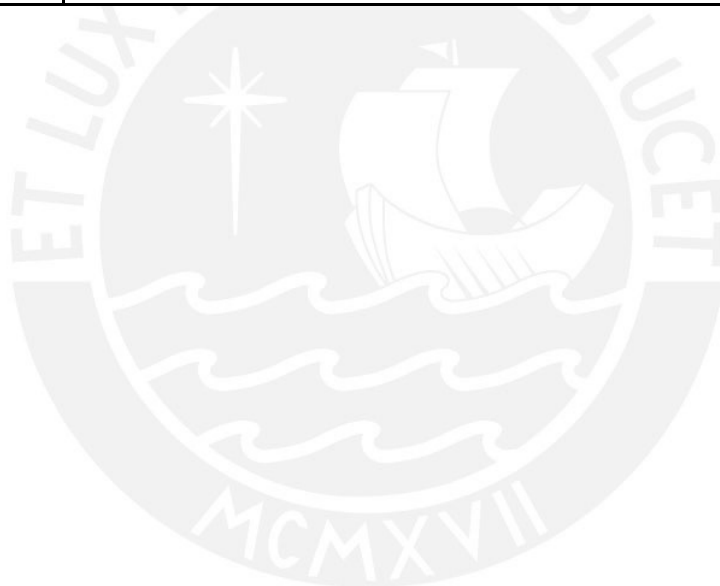


## ANEXO A: LISTA DE REQUERIMIENTOS















LISTA DE REQUISITOS		Página 1 de 3
Proyecto	Sistema de Seguridad Adaptable para Brazos Robóticos	Fecha: 6 de mayo de 2019
		Revisado: E. Villota
Curso	Proyecto de Fin de Carrera	Elaborado: Jorge H. Luna
Deseo o Exigencia	Descripción	Responsable
	Función Principal	
Exigencia <b>EXG0</b>	Proteger a los operarios de accidentes laborales causados por brazos robóticos por golpes, colisión o atrapamiento a operadores o colaboradores en general de la empresa	Jorge H. Luna
	Performance	
Exigencia <b>EXG1</b>	El sistema debe tener un PL b según la norma ISO 13849-1:2015.	Jorge H. Luna
Deseo <b>DES1</b>	El tiempo de respuesta total del sistema debe ser menor a 200 ms	Jorge H. Luna
	Señales (Información)	
Exigencia <b>EXG2</b>	Las entradas de información del sistema serán: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Parámetros iniciales (puntos para delimitación de zonas de peligro)</li> <li>• Señal de inicio</li> </ul> Las salidas serán: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estado del sistema</li> <li>• Señal de stop del brazo robótico</li> </ul>	Jorge H. Luna
Deseo <b>DES2</b>	El sistema debe tener una(s) señal(es) de salida que indique(n) el estado del brazo (Running, Warning o Stop) además de brindar la información de la cantidad de veces que se ha detenido	Jorge H. Luna












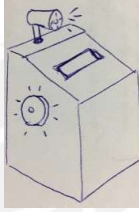
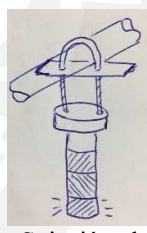




<b>LISTA DE EXIGENCIAS</b>		Página 2 de 3
<b>Deseo o Exigencia</b>	<b>Descripción</b>	<b>Responsable</b>
<b>Energía</b>		
Exigencia <b>EXG3</b>	La alimentación general del sistema debe ser de 220VAC – 60Hz	Jorge H. Luna
<b>Interfaz</b>		
Exigencia <b>EXG5</b>	Debe existir una interfaz para la comunicación gráfica entre el usuario y el sistema, de modo que se puede saber cuál es el estado del mismo y qué tan cerca se está de lanzar la señal de emergencia.	Jorge H. Luna
Deseo <b>DES3</b>	Desarrollo de una interfaz web desde la cual se pueda monitorear el estado de las señales.	Jorge H. Luna
<b>Instalación y Montaje</b>		
Exigencia <b>EXG6</b>	El hardware del sistema debe poder ser instalado en cualquier tipo de brazo robótico sin importar el diseño del mismo.	Jorge H. Luna
Exigencia <b>EXG7</b>	La instalación del sistema debe incluir una etapa de delimitación del área crítica que sea flexible a cualquier contexto	Jorge H. Luna
Deseo <b>DES4</b>	El tiempo de montaje debe ser menor de 3 jornadas de 9 horas de trabajo.	Jorge H. Luna
<b>Masa</b>		
Deseo <b>DES5</b>	El peso máximo de los componentes debe ser menos a 15 kg	Jorge H. Luna
<b>Operación</b>		
Exigencia <b>EXG8</b>	El área máxima de protección debe ser al menos 5,5 m x 5,5 m	Jorge H. Luna
Exigencia <b>EXG9</b>	El sistema entero debe cumplir con las exigencias del Reglamento de Seguridad Industrial aprobado en el Decreto Supremo 42-F	Jorge H. Luna
<b>Mantenimiento</b>		
Exigencia <b>EXG10</b>	Los dispositivos utilizados deben poder ser encontrados en el mercado peruano al igual que sus repuestos.	Jorge H. Luna

<b>LISTA DE EXIGENCIAS</b>		Página 3 de 3
<b>Deseo o Exigencia</b>	<b>Descripción</b>	<b>Responsable</b>
	<b>Software</b>	
Deseo <b>DES6</b>	El sistema contiene un protocolo de revisión de los estados de los sensores	Jorge H. Luna
	<b>Tiempo de Entrega</b>	
Exigencia <b>EXG11</b>	El diseño del sistema será entregado en el 1 julio de 2019	Jorge H. Luna
	<b>Costos</b>	
Exigencia <b>EXG12</b>	Los costos de implementación del sistema diseñado no superarán los S/. 10'000	Jorge H. Luna



## ANEXO B: MATRIZ MORFOLÓGICA

Subsistema		Funciones Específicas	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4	
Procesamiento	Hardware		 Conjunto de relés	 Microcontrolador	 PC Industrial	 PLC	
	Software	Analizar Estado del Sistema	Lógica booleana	Comparación de valores enteros			
		Analizar Zona	Lógica booleana	Comparación de valores enteros			
		Almacenar datos	Registros del controlador				
		Definir parámetros críticos	Lógica booleana				
		Decidir acción	Lógica booleana	Comparación de valores enteros			
		Calcular Cercanía	Lógica booleana	Comparación de valores enteros	Procesamiento de imágenes		
Sensores	Detectar parada de emergencia	 Botón tipo hongo biestado	 Palanca	 Pulsador			
	Detectar presencia	 Cortinas láser	 Escáner láser	 Tapetes de seguridad	 Cámara Industrial		
Energía	Acondicionar voltaje de alimentación	 Fuente 24VDC industrial	 Fuente switching	 Transformador			
	Energizar sensores						
	Energizar controlador						
	Energizar actuadores						

Actuadores	Emitir luces	 Circulina	 Torre de luces		
	Emitir sonido	 Circulina	 Torre de luces	 Campana	 Sirena
	Cortar alimentación del brazo	 Relé de potencia a alimentación de brazo	 Señal de control al controlador del brazo		
	Mostrar cercanía a zona crítica	 Pantalla HMI	 Display		
Mecánica	Fijar sensores al ambiente	Sujeción por soporte al suelo o muros	Sujeción al techo		
	Fijar actuadores al ambiente	 Poste	 Sujeción al panel de control	 Sujeción al techo	
	Proteger electrónica	 Cobertura física			
Comunicación	Recibir información	 Cable UTP Ethernet	 Cable USB	 Periferia descentralizada	
	Enviar información				