

Diseño e implementación de un prototipo de dispositivo electrónico de parada de emergencia supervisada para maquinaria industrial



PROTOTYPE DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN ELECTRONIC SUPERVISED EMERGENCY STOP DEVICE FOR INDUSTRIAL MACHINERY

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7481> | Recibido: 25/11/2014 • Aceptado: 28/01/2015

José Ignacio Suárez-Marcelo, Juan Álvaro Fernández-Muñoz y María Dolores Moreno-Rabel

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA. Dpto. Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática. Av. de Elvas, s/n - 06006 Badajoz. Tfno +34 924 289600. jmarcelo@unex.es

ABSTRACT

- According to EN ISO 12100 standard, every industrial machine must be designed and constructed in order to ensure its safety. This is accomplished by investing a great deal of material and economic efforts. However, these efforts are not always sufficient, thus forcing to use alternative safety measures in the management of these machines. The primary function of these measures is to reduce and/or eliminate the inherent risks associated to the machine, i.e. to prevent and/or reduce the damage occurred in an occupational accident. A wide range of safety measures is currently available on the market. Their complexity and cost usually vary depending on the implemented security feature. However, one type of low cost safety measure is mandatory for many machine types: the emergency stop device (ESD). Recently, a novel electronic ESD has been developed. This device is capable of automatically taking emergency stop actions when commanded by an external supervisory system connected to it. In addition, the device may also be incorporated to any emergency stop circuit. This device is the subject of the paper.
- **Key Words:** industrial safety, emergency stop device, ESD.

RESUMEN

La norma EN ISO 12100 obliga a que una máquina industrial sea diseñada y construida de forma que se garantice su seguridad, invirtiendo para ello grandes esfuerzos, tanto materiales como económicos. Sin embargo, estos esfuerzos no siempre resultan suficientes, lo que obliga a utilizar medidas de seguridad alternativas en el manejo de estas máquinas. La principal función de estas medidas es atenuar y/o eliminar los riesgos inherentes a la máquina, es decir, evitar y/o reducir los daños ocurridos en un accidente laboral.

En la actualidad, existe una amplia gama de medidas de seguridad, cuya complejidad y coste varían dependiendo de la función que implementen. No obstante, hay un tipo de medida de seguridad de bajo coste de uso obligatorio por normativa para varios tipos de máquina: el dispositivo de parada de emergencia (DPE).

Recientemente, se ha desarrollado un nuevo DPE electrónico capaz de actuar de forma automática al recibir órdenes de un sistema supervisor externo que, además, puede incorporarse al circuito de parada de emergencia de cualquier máquina. Este dispositivo es el objeto del presente trabajo.

Palabras Clave: seguridad industrial, dispositivo de parada de emergencia, DPE.

1. INTRODUCCIÓN

Una máquina industrial tiene asociados, desde su concepción, una serie de riesgos que pueden atenuarse o eliminarse desde su etapa de diseño mediante la aplicación de los principios de integración de la seguridad de máquinas recogidos en la norma europea EN ISO 12100 [1], desarrollada para cumplir los requisitos esenciales de la Directiva de Máquinas [2], con la que se considera conforme desde el 8 de abril de 2011 [3].

Aunque la forma más eficaz de minimizar los riesgos asociados a una máquina industrial es hacerlo en la fase de diseño, existen riesgos inherentes a la máquina que no pueden eliminarse y pueden provocar daños graves al operario. Por esta razón, existe en el mercado una amplia variedad de Medidas de Seguridad (MS) diseñadas con el objetivo de evitar, o al menos atenuar, las consecuencias de estos riesgos inherentes [4].

En general, para cada máquina existe un determinado conjunto de MS capaz de minimizar el riesgo asociado a ella. Sin embargo, la norma [1] establece una MS de uso obligatorio en máquinas industriales (a excepción de las portátiles y guiadas a mano): el Dispositivo de Parada de Emergencia (DPE).

Grupo	Tipo	Acción	Medida de Seguridad (MS)
Mandos de Accionamiento Manual	Dispositivo de Parada de Emergencia (DPE)	Parada de Emergencia	Botón de parada de emergencia (BPE)
			Cable de parada de emergencia
			Pedal de parada de emergencia
	Dispositivo de Activación Segura (DAS)	Activación Segura	Control de dos manos
			Control de pulsación sostenida
			Dispositivo de habilitación

Tabla 1: Clasificación de Mandos de Accionamiento Manual

Comparativa	DPE	DPE electrónico
Tipo de activación / liberación	Manual / Manual	Manual / Electrónica
Activación / liberación a distancia	No / No	Sí / Sí
Conocimiento del estado del CPE	No	Sí
Comunicación con un SJSS	No	Sí
Distinción entre situación de emergencia propia o externa	No	Sí

Tabla 2: Comparativa entre un DPE convencional y el DPE electrónico [8]

Un DPE es un tipo de Mando de Accionamiento Manual que proporciona la función de parada de emergencia, es decir, detener la máquina tan pronto como sea posible, sin generar peligros adicionales. El DPE consta de dos partes fundamentales: un interruptor de parada de emergencia (IPE) y un actuador mecánico manual que opera sobre este. En función del actuador, los DPE se clasifican en tres tipos [4-5]: Botón, Cable y Pedal de parada de emergencia (véase Tabla 1). En el caso de los botones de parada de emergencia (BPE), su forma habitual es un pulsador circular, con forma de seta, de color rojo sobre fondo amarillo, pudiendo además incorporar iluminación [4-5].

Cuando se acciona un DPE, este debe enclavarse e imposibilitar una acción de arranque de la máquina sin que se haya desenclavado previamente. Tanto la activación como la desactivación del DPE se producen por medios manuales. Esta característica hace que los DPE se asignen al grupo de Medidas de Protección Complementaria [1]. Normalmente, los DPE se disponen alrededor de la máquina, conectados en serie a un circuito de parada de emergencia (CPE), de forma que se facilite al operario alcanzar cualquiera de ellos en caso de existir una situación peligrosa. Los DPE siguen la norma EN ISO 13850 [6].

No obstante, para minimizar los riesgos de una máquina, es habitual complementar los DPE obligatorios con MS primarias, es decir, guardas y Dispositivos de Seguridad (DS) [1,5]. En los últimos años, la evolución de los DS de Detección de Acceso presenta una clara tendencia a dotarlos de un mayor grado de inteligencia y capacidad de proceso, posibilitando la detección inmediata de riesgos [4]. Estos dispositivos se caracterizan por conectarse al Circuito de Control (CC) de la máquina mediante una unidad de control, no a su CPE [1].

Recientemente, se ha desarrollado un Sistema Jerárquico Supervisor de Seguridad (SJSS) para máquinas industriales [7] capaz de combinar de forma efectiva la detección inmediata de acceso con la funcionalidad de la máquina. Su diseño permite incorporarlo a una amplia gama de máquinas semiautomáticas.

Probablemente, la incorporación más sencilla de un SJSS genérico a una máquina implica disponer de acceso a su CPE, sin modificar su funcionamiento. En comparación, el acceso a su CC resulta más costoso, pues implica modificar el cua-

dro de mandos de la máquina. Sin embargo, esta conexión se beneficiaría de la posibilidad de reanudación automática de su operación, si la máquina lo permitiera.

Siguiendo esta filosofía, se ha desarrollado recientemente un DPE electrónico [8] capaz de actuar según las instrucciones emitidas desde un SJSS genérico, tanto en su enclavamiento como liberación. Además, posee la capacidad de ser operado manualmente, de modo similar a un DPE convencional. Su diseño conceptual es genérico, adaptable a diferentes máquinas y su implementación real puede ser llevada a cabo de múltiples maneras. En la Tabla 2 se resumen las principales diferencias de este dispositivo respecto a un DPE convencional.

En el presente artículo se presenta el diseño y testeo de una posible implementación en prototipo de este DPE electrónico adaptado a una máquina concreta. El resto del artículo se ha estructurado de la siguiente manera: en la Sección 2 se presentan el esquema conceptual y las funciones principales del DPE electrónico, así como el prototipo desarrollado como plataforma de pruebas. En la Sección 3 se presentan los resultados de las pruebas de validación de funcionamiento a los que ha sido sometido este prototipo para, finalmente, en la Sección 4, exponer las principales conclusiones derivadas de dichos resultados.

2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

2.1. ESQUEMA CONCEPTUAL

El esquema conceptual del DPE electrónico [8] se muestra en la Fig. 1. Su principal característica es proporcionar una activación y liberación automática supervisada a través de un bus industrial estándar (p. e. RS485, RS232 o USB, entre otros) que comunica al dispositivo con un SJSS. No se considera el uso de comunicación inalámbrica con el SJSS, ya que este tipo de conexión presenta errores y problemas de interferencias electromagnéticas que dificultan su uso en entornos industriales, reduciendo la fiabilidad [9]. Con el fin de reducir su complejidad, se ha diseñado para poder recibir alimentación directa del bus estándar. También se puede accionar manualmente, de forma similar a un BPE.

Una unidad de control gestiona la comunicación con el SJSS, así como la conexión con el CPE de la propia máquina industrial. El DPE electrónico proporciona información visual (y/o sonora) tanto de su propio estado como del estado del CPE de la máquina industrial, y además es capaz de informar al SJSS de dichos estados a través del bus. Para ello, se conectan al CPE de la máquina dos elementos: 1) un relé cuyo contacto se conecta en serie con el resto de DPE de la máquina, y 2) un sistema de detección de corriente instantánea, que determina si hay situación de parada de emergencia. Su funcionamiento es el siguiente:

- Si no se detecta corriente, está activada la función de parada de emergencia. Es decir, alguno de los DPE de la máquina o el propio DPE electrónico se hallan enclavados (contacto del relé abierto).
- En caso contrario, la máquina está en modo de funcionamiento normal. Es decir, todos los DPE conectados al CPE, incluido el DPE electrónico, tienen sus contactos cerrados y, por tanto, circula corriente.

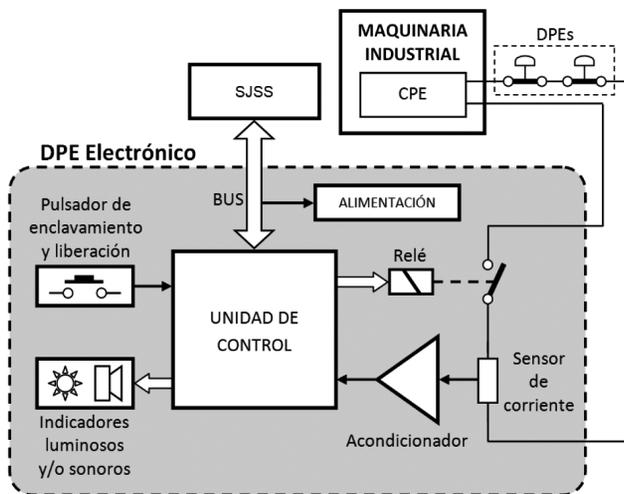


Fig. 1: Esquema conceptual del DPE electrónico [8]

El protocolo de comunicación del DPE electrónico con el SJSS a través del bus industrial está basado en comandos. Desde el punto de vista del dispositivo, estos comandos se dividen en dos tipos: de recepción y de transmisión.

Los comandos de recepción, emitidos desde el SJSS al DPE electrónico, tienen asociadas las siguientes acciones:

- Enclavar automáticamente el DPE electrónico.
- Liberar el DPE electrónico.
- Solicitar estado del CPE.

Los comandos de transmisión, que emite el DPE electrónico hacia el SJSS, son los siguientes:

- Detección de situación de emergencia en el CPE.
- Detección de regreso al estado normal (ausencia de emergencia).
- Envío de estado del CPE.
- Detección de emergencia por accionamiento del pulsador manual del DPE electrónico.
- Detección de liberación del DPE electrónico por accionamiento del pulsador manual.

2.2. IMPLEMENTACIÓN

2.2.1. Consideraciones preliminares

A la hora de implementar un prototipo de DPE electrónico, se han de tener en cuenta una serie de consideraciones importantes derivadas de su diseño. En primer lugar, es necesario establecer el método de medida de corriente del CPE. En [10] se hace una profunda revisión de diferentes métodos de medida de corriente. Entre ellos, destacan por su sencillez dos métodos: el basado en resistencia de derivación y el basado en sensor de efecto Hall. Otros métodos basados en bobinas, transformadores e incluso fibras ópticas añaden complejidad y coste innecesarios para la presente aplicación.

El uso de una resistencia de derivación tiene el inconveniente de producir una caída de tensión en el circuito de medida, así como una pérdida de potencia que lo hace inviable en sistemas de alta corriente. Sin embargo, es el método más sencillo y menos costoso, además de permitir medidas en DC y AC.

Por otra parte, los sistemas con sensores de efecto Hall no presentan estos inconvenientes, pero añaden cierta complejidad y coste al tener que utilizar un concentrador de campo (toroide). Además, sin dicho concentrador, son más propensos a fallos de alineamiento [10].

En el caso de un DPE electrónico, la finalidad del sensor de corriente es disponer de una medida de la corriente del CPE, con resolución suficiente para permitir a la unidad de control determinar correctamente el estado del circuito. Dado que la corriente del CPE está limitada a 2 A en DC [11], y que no resulta necesario disponer de una elevada resolución en la medida, resulta preferible utilizar el método de resistencia de derivación.

La inserción del DPE electrónico en serie con el CPE existente en la máquina aumenta la resistencia total equivalente del circuito, R_T . Esta resistencia, en una configuración habitual de conexión a un relé de seguridad, está limitada por las características eléctricas de este elemento. El relé trabaja con una tensión y corriente mínimas, V_{CPEmin} e I_{CPEmin} , que determinan la resistencia máxima permisible R_{Tmax} según la expresión

$$R_{Tmax} = R_R + \frac{V_{CC} - V_{CPEmin}}{I_{CPEmin}} \quad (1)$$

donde V_{CC} es la tensión de alimentación del CPE y R_R es la resistencia interna del relé de seguridad.

En cada caso, el valor real de resistencia del CPE está determinado por el tipo de cable utilizado, su longitud y las resistencias equivalentes de cada uno de los DPE existentes en estado liberado, además de la resistencia interna del relé de seguridad (R_R). Según la Fig. 2, al insertar el DPE electrónico

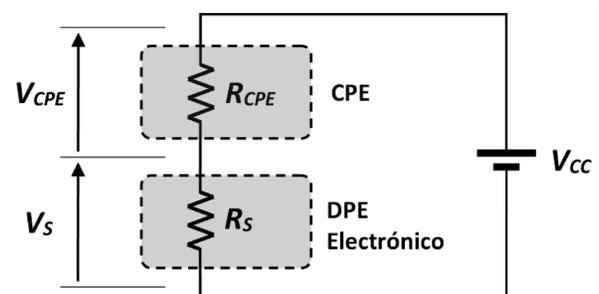


Fig. 2: Resistencias y voltajes asociados al DPE electrónico y al CPE

en el CPE, la contribución conjunta de su contacto de relé y la resistencia de derivación R_S debe estar limitada a

$$R_{lim} = R_{Tmax} - R_{CPE} \quad (2)$$

donde R_{CPE} es la resistencia equivalente del CPE en estado liberado, en ausencia del DPE electrónico.

Generalmente, en el sensor de corriente, es preferible trabajar con una R_S grande para mejorar la relación señal ruido. Por otra parte, el punto de inserción del DPE electrónico en el CPE existente no debe ser una limitación adicional a las que, por cuestiones de coste, acceso u otras, imponga una máquina concreta. Para independizar la medida de corriente de la posición de R_S y mejorar la relación señal ruido, es conveniente realizar una medida diferencial de V_S mediante un circuito de conversión I/V (véase Fig. 3).

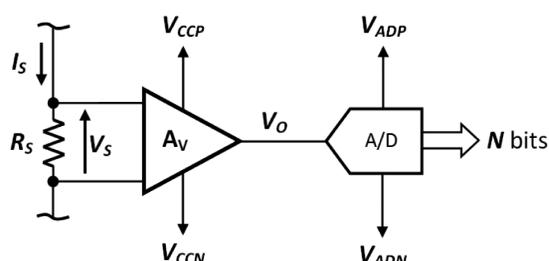


Fig. 3: Esquema del circuito de medida de corriente

Normalmente, estos circuitos disponen de una ganancia ajustable A_V que modifica la tensión V_o de entrada al convertidor A/D, elemento necesario para la lectura de datos desde la unidad de control. En la elección de R_S se debe establecer un límite inferior (R_{Smin}) que garantice que V_o alcance un valor mínimo (V_{Omin}) para obtener una adecuada resolución en la medida de corriente. A partir del análisis de los circuitos de la Fig. 2 y Fig. 3, se obtiene:

$$R_S > R_{Smin} = \frac{R_{CPE}}{A_V \frac{V_{CC}}{V_{Omin}} - 1} \quad (3)$$

Por otro lado, también es necesario que el valor máximo de R_S asegure que V_o esté siempre comprendida entre las alimentaciones positiva (V_{ADP}) y negativa (V_{ADN}) del convertidor A/D. Dicho valor se obtiene de la expresión:

$$R_S < R_{Smax} = \frac{R_{CPE}}{A_V \frac{V_{CC}}{V_{AD}} - 1} \quad (4)$$

donde $V_{AD} = V_{ADP} - V_{ADN}$ es el rango de funcionamiento del convertidor A/D.

Finalmente, la ubicación del DPE electrónico dentro del CPE también influye en la tensión de modo común presente en la entrada del convertidor I/V, V_{Scm} , que debe mantenerse dentro del rango admisible por el convertidor. Si el DPE electrónico se instala muy próximo al terminal positivo de V_{CC} , V_{Scm} será elevada, pero si se sitúa cerca del terminal negativo, V_{Scm} será baja. En ambos casos, podría ser necesario extender los límites de alimentación positivo V_{CCP} o negativo V_{CCN} del convertidor I/V para asegurar un correcto funcionamiento del sensor de corriente.

2.2.2. Desarrollo del prototipo

Como ejemplo de implementación del DPE electrónico [8], se presenta en este apartado el desarrollo de un prototipo funcional que responde al diagrama de bloques mostrado en la Fig. 4. Por sencillez, y sin perjuicio de usar otro tipo de bus industrial más adecuado para grandes distancias (p. e. RS485), se ha empleado un bus USB para la conexión con un SJSS genérico, instalado en un sistema dotado con este tipo de conexión (p. e. un ordenador tipo PC). Además, esto permite que el prototipo se alimente del propio bus USB, evitando el uso de alimentación externa.

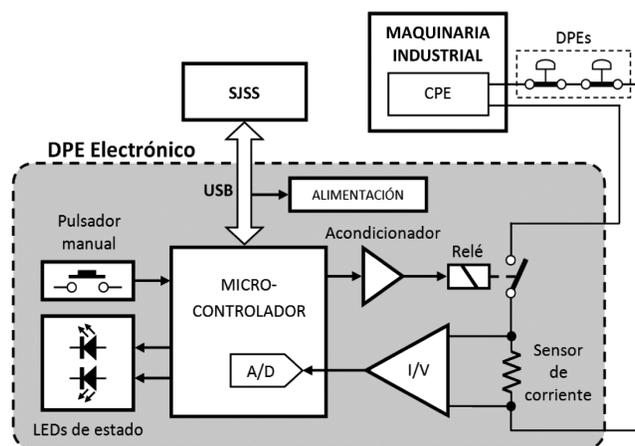


Fig. 4: Diagrama de bloques del prototipo de DPE electrónico

Para acelerar el proceso de validación del prototipo, se ha empleado un kit comercial [12] de bajo coste para el desarrollo rápido de aplicaciones con USB. El fabricante proporciona bibliotecas y códigos de ejemplo para una rápida programación de la interfaz USB. Así, los esfuerzos de diseño y programación se ven aliviados, centrándose toda la atención en el funcionamiento del prototipo.

El kit incorpora un microcontrolador PIC18F47J53 [13] de altas prestaciones dotado con un convertidor A/D de 10 bits con 13 canales, y toda la circuitería necesaria para la conexión directa a USB, sin necesidad de alimentación externa. A través de un conector, se facilita el acceso a todos los puertos de entrada y salida libres del microcontrolador. Además, dispone de un pulsador manual, usado para el enclavamiento y liberación manual del DPE electrónico, y dos indicadores LED que señalizan el estado del DPE electrónico y del CPE al que se conecta.

El prototipo consta de dos partes: por un lado, el kit de desarrollo para USB [12] y, por otro, una tarjeta diseñada para albergar el relé, el sensor de corriente, todos los circuitos de acondicionamiento, los bornes de conexión al CPE y un circuito inversor para extender el rango de alimentación del convertidor I/V. El kit se monta sobre un zócalo de la tarjeta, quedando el conjunto como se ilustra en la Fig. 5.

El circuito de acondicionamiento del relé ha sido diseñado de forma que, al caer la alimentación por cualquier motivo, el contacto del relé quede abierto, marcando así una situación de parada de emergencia. El convertidor I/V está basado en el chip TSC103 [14], que dispone de todas las etapas necesarias integradas en el mismo dispositivo, con un coste razonable.

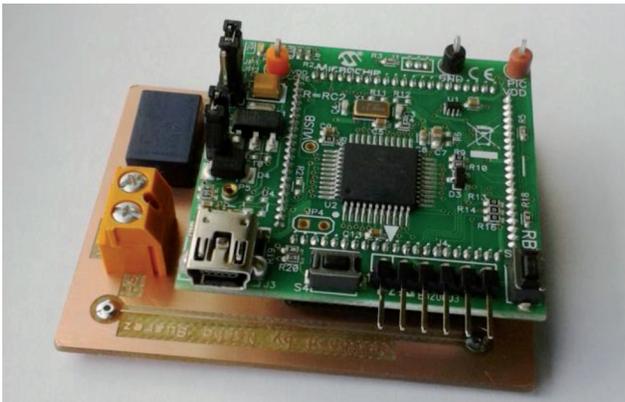


Fig. 5: Prototipo de DPE electrónico con conexión USB

2.3. FUNCIONAMIENTO

El prototipo de DPE electrónico se ha programado para detectar tres situaciones de emergencia:

- EM1: emergencia detectada por el SJSS.
- EM2: emergencia por el pulsador manual del DPE electrónico.
- EM3: emergencia por activación de algún otro DPE conectado al CPE de la máquina.

Dos indicadores luminosos (LED1 y LED2) indican las diferentes situaciones de emergencia. El dispositivo puede conmutar entre dos estados: enclavado (contacto del relé abierto) y liberado (contacto del relé cerrado). A continuación se explica su funcionamiento en detalle.

2.3.1. Inicialización del dispositivo

El DPE electrónico arranca por defecto en estado enclavado, con EM1 y EM2 activas. De esta forma, se garantiza un arranque seguro de la máquina que se pretende proteger. Para que el DPE electrónico pase a estado liberado es necesario, por un lado, que el SJSS indique que en la maquinaria no hay peligro (desactivación de EM1) y, por otro, que se accione el pulsador manual por parte de un operario (desactivación de EM2). Tras esto, el CPE de la máquina estaría en disposición de habilitar su arranque si todos los DPE a él conectados se encontraran liberados (contactos cerrados). Tras la inicialización, se pasa a un modo de funcionamiento continuo donde, según las situaciones que se produzcan, el DPE electrónico cambiará su estado entre dos posibles: liberado y enclavado.

2.3.2. Funcionamiento en estado liberado

Encontrándose el DPE electrónico en estado liberado, el funcionamiento es el siguiente:

- El relé está activado (contacto cerrado).
- Si no hay emergencia, los indicadores (LED1 y LED2) permanecen apagados.
- En todo momento se monitoriza la corriente del CPE. Si al menos uno de los DPE asociados a la maquinaria se encuentra activado (no hay corriente en el circuito), se detecta la situación EM3, en cuyo caso LED1 y LED2

parpadean. En caso de estar todos los DPE liberados, el flujo de corriente que se establece es detectado por el sensor, la situación EM3 desaparece y ambos indicadores permanecen apagados. Cualquier cambio en el CPE es comunicado al SJSS.

- El DPE electrónico pasa a estado enclavado si el SJSS detecta una situación peligrosa (EM1) o si el pulsador manual se activa (situación EM2).

2.3.3. Funcionamiento en estado enclavado

Encontrándose el DPE electrónico en estado enclavado, el funcionamiento es el siguiente:

- El relé está en reposo (contacto abierto). La situación EM3 no es posible detectarla, ya que el CPE se encuentra abierto.
- Si la situación es EM1, se enciende LED1; si es EM2, se activa LED2. En ambos casos queda indicado el estado de enclavamiento.
- El DPE electrónico pasa a estado liberado al desaparecer las situaciones EM1 (el SJSS no detecta peligro) y EM2 (el pulsador manual se acciona). Si alguna permanece activa, el DPE electrónico permanece enclavado.
- Cualquier cambio en EM2 es comunicado al SJSS.

3. RESULTADOS

3.1. INSTALACIÓN EN MÁQUINA INDUSTRIAL

El principal escollo en la instalación del prototipo de DPE electrónico descrito en la Sección 2 es su adaptación al CPE existente en la máquina. Idealmente, el punto de montaje en la máquina ha de ser tal que, mediante un fácil acceso, modifique lo mínimo posible el CPE existente y facilite la medida de corriente.

En el presente trabajo, para realizar las pruebas, el prototipo de DPE electrónico se ha instalado en una máquina industrial de corte por plasma/oxigás disponible en laboratorio (véase Fig. 6). Esta máquina posee tres BPE conectados al CPE en distintos puntos de la máquina, estando también conectados a la masa común del sistema. En el otro extremo del circuito, este se alimenta desde un relé de seguridad XPSATE [15]. Se ha elegido el punto de masa para insertar el prototipo, ya que cumple los requisitos mencionados anteriormente.



Fig. 6: Máquina industrial utilizada para las pruebas

El punto de inserción elegido implica que uno de los terminales de R_s está conectado a masa, lo que unido al hecho de que el prototipo se alimenta desde el bus USB, hace necesario el uso de un convertidor DC/DC inversor para generar V_{CCN} , con el fin de extender el rango de entrada V_{Scm} del convertidor I/V.

Como paso previo a la instalación, se han obtenido los parámetros operativos del CPE existente en la máquina reflejados en la Tabla 3. Estos datos determinan, mediante (2), el valor límite máximo operativo $R_{lim} \approx 370 \Omega$. Cualquier R_s por debajo de este valor garantiza el correcto funcionamiento del CPE de la máquina.

V_{CC}	$R_{I_{max}}$	V_{CPEmin}	R_{CPE}
21,0 V	2100 Ω	17,0 V	1729,6 Ω

Tabla 3: Parámetros de la máquina de prueba.

Para obtener una adecuada resolución en la medida, se ha elegido $V_{Omin} = 0,5 V_{AD}$. Esto implica una pérdida máxima de 1 bit en la resolución de medida, que resulta suficiente para detectar por *software* un cambio significativo en la corriente del CPE. Teniendo en cuenta que el convertidor I/V [14] permite escoger entre 4 ganancias A_V diferentes y sabiendo que $V_{AD} = 3,3 V$, se obtienen mediante (3) y (4) los valores para R_{Smin} y R_{Smax} que figuran en la Tabla 4.

A_V	20	25	50	100
R_{Smin} (Ω)	6,82	5,45	2,72	1,36
R_{Smax} (Ω)	13,70	10,94	5,45	2,72

Tabla 4: Valores de R_{Smin} y R_{Smax} en función de la ganancia A_V del convertidor I/V [14].

Los resultados indican que, en todos los casos, la limitación de la resistencia del DPE electrónico viene impuesta por la conversión I/V, alejándose suficientemente del valor límite (2). Para este caso, se ha escogido $R_s = 10 \Omega$, valor con el cual se obtiene una V_o que supera el 73% de V_{AD} con $A_V = 20$.

3.2. PRUEBAS EXPERIMENTALES

Una vez instalado en la máquina industrial, el prototipo de DPE electrónico se ha conectado por USB a un PC programado para emular el comportamiento de un SJSS genérico, para someterlo a dos tipos de pruebas: comprobaciones de operatividad para verificar su correcto funcionamiento y mediciones de tiempos de respuesta.

3.2.1. Comprobaciones de operatividad

Se han realizado los siguientes experimentos, todos ellos con el resultado esperado:

- 50 conexiones de alimentación con arranque en estado enclavado.
- 50 caídas de alimentación del dispositivo mediante desconexión del cable USB que lo une al SJSS, pasando a estado enclavado.

- 50 liberaciones del dispositivo desde el SJSS (mediante envío de comando) y 50 mediante pulsador manual. En cada caso, el 50% de las pruebas ha partido de ausencia de emergencia y el 50% restante de la situación EM3 (interruptor manual externo activado).
- 75 pruebas para detección de emergencias en las que solo se ocurre una situación, EM1 o EM2 o EM3, con 25 pruebas para cada situación, mezcladas en orden aleatorio. En todos los casos de EM2 y EM3 se ha enviado la información correctamente al SJSS y se han iluminado los LED correspondientes.
- 100 pruebas con situaciones de emergencia simultáneas y con desaparición en orden aleatorio: 25 para EM1/2, 25 para EM1/3, 25 para EM2/3 y 25 para EM1/2/3.

Las pruebas de operatividad han demostrado una alta fiabilidad de funcionamiento en todas las situaciones, con una velocidad de respuesta inmediata, tanto en enclavamientos como en liberaciones.

3.2.2. Mediciones de tiempos de respuesta

Se han realizado diferentes experimentos para medir varios tiempos de respuesta del DPE electrónico. Los tiempos de respuesta considerados son los siguientes:

- **Tiempo de enclavamiento supervisado (T_{ES}):** intervalo de tiempo transcurrido desde que se recibe el comando *enclavar* hasta que se desactiva el relé del DPE electrónico. Se divide en 2 intervalos de tiempo consecutivos, no solapados:
 - T_{ES1} : desde que se recibe el comando *enclavar* hasta que se da la orden de desactivar el relé.
 - T_{ES2} : desde que se da la orden de desactivar el relé hasta que se desactiva.
- **Tiempo de liberación supervisada (T_{LS}):** intervalo de tiempo transcurrido desde que se recibe el comando *liberar* hasta que se activa el relé del DPE electrónico. Se compone de 2 intervalos de tiempo consecutivos, no solapados:
 - T_{LS1} : desde que se recibe el comando *liberar* hasta que se da la orden de activar el relé.
 - T_{LS2} : desde que se da la orden de activar el relé hasta que se activa.

Se han realizado 100 medidas para todos los tiempos considerados, haciendo uso de un osciloscopio digital Tektronix TDS2024B, obteniendo los resultados estadísticos recogidos en la Tabla 5. Los tiempos T_{ES1} y T_{LS1} son prácticamente constantes, debido a que el tramo del programa que ejecuta el microprocesador en cada acción, y por tanto el número de ciclos de reloj, es siempre el mismo. Los tiempos de desactivación y activación del relé, T_{ES2} y T_{LS2} respectivamente, resultan tener una buena precisión. El tiempo medio total de enclavamiento (T_{ES}) es casi 0,41 ms menor que el de liberación (T_{LS}), siendo ambos, en todo caso, muy pequeños en comparación con el tiempo de respuesta instantánea del relé de seguridad de la máquina [15]. De los resultados obtenidos, puede afirmarse que el comportamiento del prototipo es fiable, rápido y preciso.

Acción	Tiempo de respuesta	Valor medio (ms)	Desviación típica (ms)
Enclavamiento	T_{ES1}	0,003664	~ 0
	T_{ES2}	1,1815	0,0031
	T_{ES}	1,1852	0,0031
Liberación	T_{LS1}	0,003914	~ 0
	T_{LS2}	1,5918	0,0114
	T_{LS}	1,5957	0,0114

Tabla 5: Tiempos de respuesta del prototipo de DPE electrónico

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado el desarrollo completo de un prototipo de DPE electrónico [8], capaz de ser operado remotamente desde un SJSS genérico en máquinas industriales. Su diseño conceptual es adaptable a diferentes máquinas y sus características operativas permiten múltiples implementaciones reales. Se han abordado las cuestiones técnicas más relevantes referentes a su instalación en una máquina real, donde se ha probado extensivamente.

El prototipo presentado hace uso del método de resistencia de derivación para la medida de corriente del CPE. Para poder ser adaptado a una máquina concreta, es necesario conocer tres parámetros fundamentales: la tensión y corriente mínimas de funcionamiento, V_{CPEmin} e I_{CPEmin} y la resistencia equivalente del CPE, R_{CPE} . Si fueran desconocidos, pueden determinarse fácilmente mediante experimentación con el CPE.

La posición de la resistencia de derivación influye en el voltaje de modo común presente a la entrada del convertidor I/V y, consecuentemente, en la elección de sus voltajes de alimentación. La elección de un valor para la resistencia de derivación implica un compromiso de diseño: no debe ser

muy pequeño, para favorecer la relación señal ruido y la resolución de medida; pero tampoco muy grande, para no alterar el funcionamiento del CPE y mantener el voltaje de entrada al convertidor A/D dentro de su rango de funcionamiento. Así, la ganancia del convertidor I/V es un parámetro adicional de diseño que proporciona un mayor rango de posibilidades en la elección de la resistencia de derivación.

En este trabajo, el prototipo se ha diseñado para ser compatible con un relé de seguridad de uso habitual en máquinas industriales. La adaptación al CPE existente de una máquina industrial ha resultado altamente satisfactoria, demostrando mediante una serie de pruebas funcionales y de tiempo de respuesta la validez del prototipo.

Los resultados obtenidos demuestran que el prototipo desarrollado presenta las siguientes características:

- Es capaz de actuar de forma automática como un DPE convencional, recibiendo para ello órdenes desde un SJSS externo, respetando en todo caso la normativa de seguridad aplicable a la máquina y su entorno.
- Puede integrarse en el CPE de una máquina industrial, sin modificar el funcionamiento manual de los DPE ya conectados a este.
- Es capaz de informar a un SJSS genérico (mediante comandos) y al operario (con indicadores luminosos) tanto de su propio estado como del estado del CPE.
- Puede enclavarse y liberarse de forma automática (a distancia) y manual.
- Su funcionamiento es rápido, preciso y fiable.

La estructura modular del prototipo flexibiliza el estudio de posibles ampliaciones o mejoras. Entre ellas, destaca la realización de medidas de corriente mediante sensor de efecto Hall. Este método de medida facilita aún más la inserción del prototipo en CPE más complejos y/o de gran longitud, donde el margen de resistencia R_{lim} sea mucho menor.

BIBLIOGRAFÍA

[1] CEN. *Seguridad de las máquinas. Principios generales para el diseño. Evaluación del riesgo y reducción del riesgo*. EN ISO 12100:2010. CEN: Bruselas, Bélgica, 09/10/2010.

[2] Parlamento Europeo y Consejo de la UE. Directiva 2006/42/CE relativa a las máquinas. DOUE, L 157, 09/06/2006.

[3] Parlamento Europeo y Consejo de la UE. Publicación de títulos y referencias de normas armonizadas conforme a la Directiva 2006/42/CE. DOUE, C 110, 08/04/2011.

[4] Caputo, AC, Pelagagge, PM, Salini, P. "AHP-based methodology for selecting safety devices of industrial machinery". *Safety Science*. 2013. Vol. 53-1, p.202-218. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2012.10.006>

[5] Macdonald, DM. *Practical Machinery Safety*. Newnes. Oxford, Reino Unido, 2004. ISBN: 9870750662703.

[6] CEN. *Seguridad de las máquinas. Parada de Emergencia. Principios para el diseño*. EN ISO 13850:2008. CEN: Bruselas, Bélgica, 25/05/2008.

[7] Universidad de Extremadura. "Sistema con fines de detección y prevención activa e inmediata de riesgos en maquinaria industrial". Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (WOPI). Patente Internacional. WO 093163 A1. 27/06/2013.

[8] Universidad de Extremadura. "Dispositivo electrónico de parada de emergencia con reposición automática supervisada". Modelo de Utilidad. ES 1116830 Y. 03/10/2014.

[9] Willig, A, Matheus, K, Wolisz, A. "Wireless technology in industrial networks". *Proc. IEEE*. 2005. Vol. 93-6, p.1130-1151. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2005.849717>

[10] Ziegler, S, Woodward, RC, Lu, HH-C, Borle, LJ. "Current sensing techniques: a review". *IEEE Sensors Journal*. 2009. Vol. 9-4, p.354-376. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2009.2013914>

[11] IEC. *Aparatos y elementos de conmutación para circuitos de mando. Aparato eléctrico de parada de emergencia con función mecánica de enclavamiento*. IEC 60947-5-5:2005. IEC: Ginebra, Suiza, 06/04/2005.

[12] Microchip Technology Inc. "PIC18F4XJ5X full-speed USB demonstration board user's guide". 07/04/2010. ISBN: 978-1-60932-117-8. Documento PDF [accedido 17/07/2015]: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/51806b.pdf>

[13] Microchip Technology Inc. "PIC18F47J53 Family Data Sheet". 21/06/2010. ISBN: 978-1-60932-306-6. Documento PDF [accedido 20/11/2014]: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39964B.pdf>

[14] STmicroelectronics NV. "TSC103 Datasheet". 31/01/2014. Documento PDF [accedido 17/07/2015]: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00258729.pdf>

[15] Schneider Electric. "Preventa™ Safety Relays Type XPSAV, XPSATE & XPSVNE". 13/03/2009. Documento PDF [accedido 17/07/2015]: http://download.schneider-electric.com/files?p_File_Id=65848258&tp_File_Name=9007CT0902.pdf