



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**ESTUDIO DE LA FIABILIDAD DE UN SISTEMA INSTRUMENTADO DE SEGURIDAD EN RELACIÓN A LAS PRÁCTICAS ONLINE EN UN PROTOTIPO DE UNA PLANTA DE NIVEL CON DEPÓSITO DE VOLUMEN VARIABLE EN EL LABORATORIO DE PLC'S DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA.**

**AUTORES:**

LUIS ENRIQUE LOOR CEBALLOS

EDWIN ISMAEL RAMÍREZ VELÁSTEGUI

# OBJETIVO GENERAL

Estudiar la fiabilidad de un Sistema Instrumentado de Seguridad mediante la implementación de un prototipo para una planta de control de nivel con depósito de volumen variable para prácticas online en el laboratorio de programadores lógicos controlables.



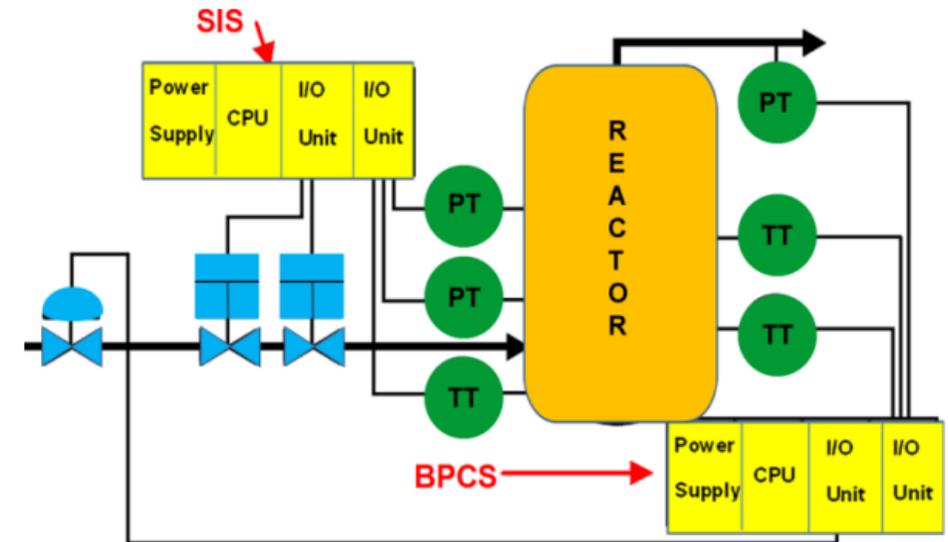
# SISTEMAS DE CONTROL

- *Sistema básico de control de proceso (BPCS)*
- *Sistema de Seguridad (SS)*
- *Sistemas instrumentados de seguridad (SIS)*



# SISTEMA BÁSICO DE CONTROL DE PROCESO

Es la capa de control automatizada que permite al proceso mantener las variables de operación dentro de los valores permitidos por el sistema.



Ejemplo de SIS y BPCS  
Fuente: (EXIDA)

# SISTEMA DE SEGURIDAD (SS)

Es una composición de sistemas y equipos que realizan tareas de seguridad tanto en materia de prevención como de mitigación. Pueden ser de accionar activo o pasivo, trabajando sobre la frecuencia de eventos peligrosos y/o sobre la consecuencia del evento.



# SISTEMA INSTRUMENTADO DE SEGURIDAD (SIS)

Sistema compuesto por sensores, procesadores lógicos y elementos finales de control cuyo propósito es implementar funciones de seguridad necesarias en caso de existir un evento de riesgo, y llevar al proceso a un estado seguro.



# INVESTIGACIÓN

Para determinar si es necesario implementar un sistema instrumentado de seguridad (SIS) en la microplanta de nivel, primero se obtuvo una bitácora de fallas; durante un tiempo de 180 días de estudio, evidenciando un promedio de tasa de fallas de 0,033 en el sistema.



# INVESTIGACIÓN

**TABLA 1**  
**OCURRENCIA DE FALLAS**

Elemento	Número de fallas ocurridas en 180 días	
	Sistema Deseado	Sistema Actual
Sistema de control	1	10
Relés de control	1	8
Sensores	1	4
Bombas	1	3
Fuente de poder	1	2



# INVESTIGACIÓN

Se evidenció que existe un alto riesgo de ocurrencia de fallas en varios elementos del sistema, esto indica que es necesario un cambio en la seguridad del sistema para prevenir fallas catastróficas.



# INVESTIGACIÓN

**TABLA 2**  
**TASA DE FALLAS SISTEMA IDEAL VS SISTEMA ACTUAL**

Elemento	Tasa de Falla Ideal	Tasa de Falla Real
Sistema de control	0,005	0,055
Relés de control	0,005	0,044
Sensores	0,005	0,022
Bombas	0,005	0,016
Fuente de poder	0,005	0,011



# INVESTIGACIÓN

El valor t estadístico obtenido es de  $p=0,044$  por lo que se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula, por lo tanto es fiable realizar la implementación de un sistema instrumento de seguridad para reducir el riesgo de fallas.

# PROPUESTA

La presente propuesta está orientada a la construcción de una micro planta de nivel para prácticas online con volumen variable que integra un sistema instrumentado de seguridad.

El punto de partida será el dimensionamiento de la micro planta de nivel, su sistema eléctrico y electrónico de control.



# DISEÑO DE UN SISTEMA INSTRUMENTADO DE SEGURIDAD (SIS)

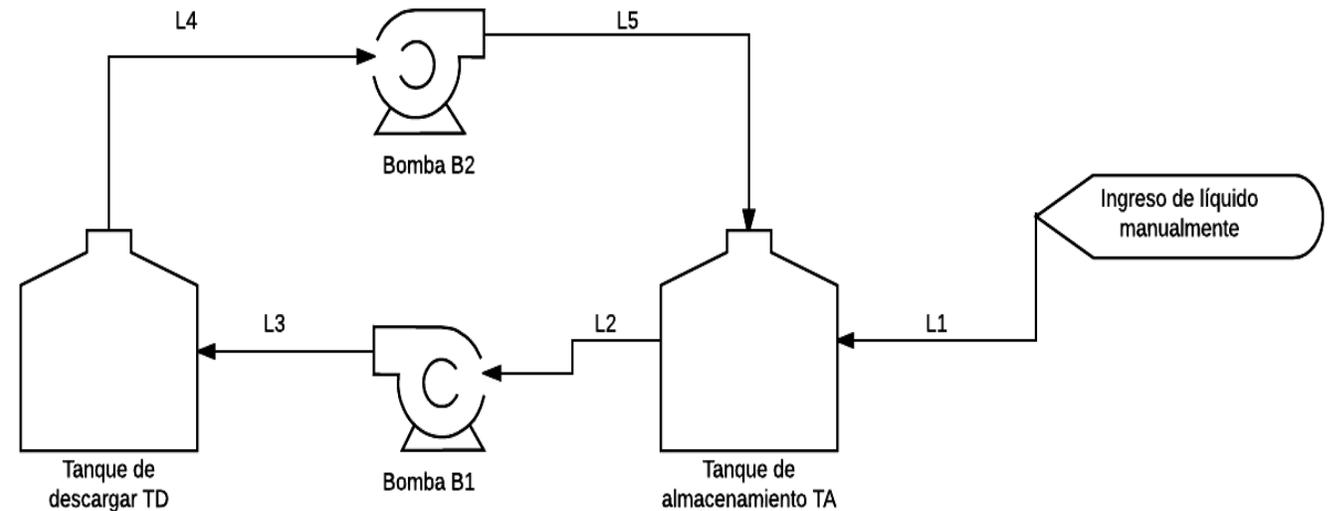
**TABLA 3**  
**ETAPAS DE DESARROLLO DE UN SIS**

Desarrollo del HazOp
Desarrollo de capas de protección (LOPA)
Desarrollo de especificación de requerimientos de seguridad (SRS)
Requerimientos funcionales
Calculo de SIL y bloques de seguridad
Diseño del ciclo de vida



# DESARROLLO DEL HAZOP

Para el desarrollo del HazOp es necesario disponer de un diagrama del sistema. Basándose en el diagrama se pueden detectar los peligros que pueden suscitarse y que elementos del sistema están involucrados.



**Esquema de funcionamiento del Sistema**

**TABLA 4**  
**RESULTADOS HAZOP**

EVENTO	CAUSAS	CONSECUENCIA	RIESGO			RECOMENDACIÓN
			CONSECUENCIA	PROBABILIDAD	RIESGO	
<b>Alto Nivel</b>	Derrame de líquido	Desborde del tanque	4	4	M	Instalar un lazo de seguridad el cual disponga de un sensor de nivel que active una alarma de alto nivel y apague la bomba B2.
<b>Bajo Nivel</b>	Falla Bomba B1	Bomba B1 se va a quemar	5	3	M	Instalar un lazo de seguridad que apague la bomba B1, debe disponer de un sensor de nivel y activar una alarma de bajo nivel
<b>Bajo Flujo</b>	Falla Bomba B1	Bomba B1 se va a quemar	4	4	B	Instalar un lazo de seguridad que apague la bomba B1 y active una alarma de bajo flujo
<b>Bajo Flujo</b>	Falla Bomba B1	Bomba B1 se va a quemar	4	3	B	Instalar un lazo de seguridad que apague la bomba B1 y active una alarma de bajo flujo
<b>Alto Nivel</b>	Derrame de líquido	Desborde del tanque	4	5	M	Instalar un lazo de seguridad que disponga de un sensor de nivel que active una alarma de alto nivel y apague la bomba B1

# DESARROLLO DE CAPAS DE PROTECCIÓN (LOPA)

Una vez realizado el HazOp se desarrolla el análisis de las capas de protección (LOPA), se analiza las situaciones de peligro que pudieran presentarse, sus causas de inicio y la frecuencia con la que pueden ocurrir.



# DESARROLLO DE CAPAS DE PROTECCIÓN (LOPA)

**TABLA 5**  
**OCURRENCIA DE FALLAS**

N	Descripción del Evento	Nivel de seguridad	Causa	Probabilidad de inicio	Ocurrencia de falla
1	Derrame de líquido	M	Falla control de nivel	0,005	0,055
2	Bomba B1 falla	M	Falla bomba B1	0,044	0,044
3	Bomba B2 se quema	M	Falla bomba B2	0,022	0,022
		M	Relés de control	0,016	0,016
4	Sistema de control averiado	S	Bloqueo del proceso	0,011	0,011



# DESARROLLO DE CAPAS DE PROTECCIÓN (LOPA)

**TABLA 6**  
**PROBABILIDAD DE FALLAS**

N	Diseño de Proceso General	Capas de protección			Prob. intermedia de riesgo	Nivel de integridad de la SIF	Nivel de SIL	Probabilidad de falla
		Alarma		Capas adicionales de fallas				
1	1	0,1	0,1	Sensor ultrasónico	0,00055	0,0317	SIL 1	0,0000174
2	1	0,1	0,1	Relé protector	0,00044	0,0304	SIL 1	0,0000133
	1	0,1	0,1	Relé protector	0,00022	0,0304	SIL 1	0,0000066
3	1	0,1	1	Fuente independiente	0,00016	0,0317	SIL 1	0,0000050
4	1	0,1	0,1	Alarma al usuario	0,00011	0,0317	SIL 1	0,0000034



# DESARROLLO DE ESPECIFICACIÓN DE REQUERIMIENTOS DE SEGURIDAD (SRS)

## Definición del proceso

El proceso analizado hace referencia a un sistema de control de nivel en tanques, en dicho proceso se usan bombas eléctricas para el llenado de los tanques las cuales son operadas de forma automática. Por el momento el prototipo se encuentra en una mesa de vigilancia para la supervisión de su proceso pero no cuenta con capas adicionales de protección.



# DESARROLLO DE ESPECIFICACIÓN DE REQUERIMIENTOS DE SEGURIDAD (SRS)

## Requerimientos generales

Ya que el sistema carece de un sistema básico de control de procesos (BPCS), el monitoreo lo realiza la mesa de vigilancia en la que se encuentra instalado el prototipo.

El sistema instrumentado de seguridad debe controlar el flujo y nivel del líquido al momento de su llenado y vaciado en los respectivos tanques y evitar la obstrucción de las tuberías.



# DESARROLLO DE ESPECIFICACIÓN DE REQUERIMIENTOS DE SEGURIDAD (SRS)

## Requerimientos de Software

Deberá desconectar todos los elementos finales si se llega a producir cualquier evento peligroso en la zona de proceso y a su vez actuar todas las alarmas para diagnosticar que tipo de falla ha ocurrido.

Esta compuesto de un rutina con sus respectivas subrutinas, las cuales se van a encargar de activar y controlar el lazo de seguridad.

Para comprobar el desempeño del programa de seguridad se debe, evaluar todas las SIF y comprobar si desempeña la acción correcta.



# REQUERIMIENTOS FUNCIONALES

Se registran las características funcionales de los equipos del sistema que tengan mayor probabilidad de presentar fallas .

Cabe mencionar que la tasa de demanda de la función instrumentada de seguridad (SIF) la obtuvimos del valor de la tasa de fallas que ocurren en el equipo que se está seleccionando ya que la acción con la que es utilizada la función instrumentada de seguridad viene de la mano con la tasa de falla que ocurre en el equipo o sistema que se está analizando.



# REQUERIMIENTOS FUNCIONALES

**TABLA 7**  
**REQUERIMIENTOS FUNCIONALES BOMBA 1**

<b>Fuente de Demanda:</b>	Falla bomba B1
<b>Descripción Funcional:</b>	Se debe respaldar al sistema en el momento que el flujo que pasa por la tubería L2 sea reducido.
<b>Estado seguro del proceso:</b>	Se debe apagar la bomba B1, en el momento que el flujo se empieza a reducir.
<b>Tasa de demanda de la SIF:</b>	0.014
<b>SIL determinado para la SIF:</b>	SIL1



# REQUERIMIENTOS FUNCIONALES

**TABLA 8**  
**REQUERIMIENTOS FUNCIONALES BOMBA 2**

<b>Fuente de Demanda:</b>	Falla bomba 2
<b>Descripción Funcional:</b>	Se debe respaldar al sistema en el momento que el fluido circule por la tubería T3, sin ningún obstáculo en el camino.
<b>Estado seguro del proceso:</b>	Se debe apagar la bomba B2, en el momento que el flujo se empieza a reducir.
<b>Tasa de demanda de la SIF:</b>	0.014
<b>SIL determinado para la SIF:</b>	SIL1



# REQUERIMIENTOS FUNCIONALES

**TABLA 9**  
**REQUERIMIENTOS FUNCIONALES CONTROLADOR**

<b>Fuente de Demanda:</b>	<b>Controlador Lógico</b>
<b>Descripción Funcional:</b>	Se debe proteger al sistema cuando el tanque 2 alcance el nivel máximo de llenado. De esa forma se desconectará la bomba para que el fluido ya no ingrese al tanque
<b>Estado seguro del proceso:</b>	Al desconectar la bomba se evitará que el fluido ingrese al tanque y provoque un derrame.
<b>Tasa de demanda de la SIF:</b>	0.15
<b>SIL determinado para la SIF:</b>	SIL2



# PROBABILIDAD DE FALLA A LA DEMANDA

Cálculo de elementos de seguridad	Valor
MTTR (Tiempo medido para reparación)	8 horas
CD (Cobertura de diagnóstico)	70%
T1	6 meses (3420 horas)
$\lambda_T$ (Tasa de fallas)	$1.59 \times 10^{-6}$ /hora
$\lambda_S$ (Tasa de falla segura)	$0.79 \times 10^{-6}$ /hora
$\lambda_D$ (Tasa de falla peligrosa)	$0.79 \times 10^{-6}$ /hora
$\lambda_{dd}$ (Tasa de falla peligrosa detectada)	$1.114 \times 10^{-7}$
$\lambda_{du}$ (Tasa de falla peligrosa no detectada)	$2.65 \times 10^{-7}$
SFF (Fracción de falla segura)	56%
Tiempo medio de detención en el subsistema	1473 seg
$PFD_{AV}$ (Probabilidad de falla a la demanda)	0.0011



# PROBABILIDAD DE FALLA A LA DEMANDA

Cálculo de elementos de seguridad	Valor
MTTR (Tiempo medido para reparación)	8 horas
CD (Cobertura de diagnóstico)	70%
T1	6 meses (3420 horas)
$\beta$ (Factor de causa común para fallas no detectadas)	20%
$\beta_D$ (Factor de causa para fallas detectadas)	20%
$\lambda_T$ (Tasa de fallas)	$1.59 \times 10^{-6} / \text{hora}$
$\lambda_S$ (Tasa de falla segura)	$0.79 \times 10^{-6} / \text{hora}$
$\lambda_D$ (Tasa de falla peligrosa)	$0.79 \times 10^{-6} / \text{hora}$
$\lambda_{dd}$ (Tasa de falla peligrosa detectada)	$1.114 \times 10^{-7}$
$\lambda_{du}$ (Tasa de falla peligrosa no detectada)	$2.65 \times 10^{-7}$
SFF (Fracción de falla segura)	56%
Tiempo medio de detención en el subsistema	1473 seg
$PFD_{AV}$ (Probabilidad de falla a la demanda)	0.0021

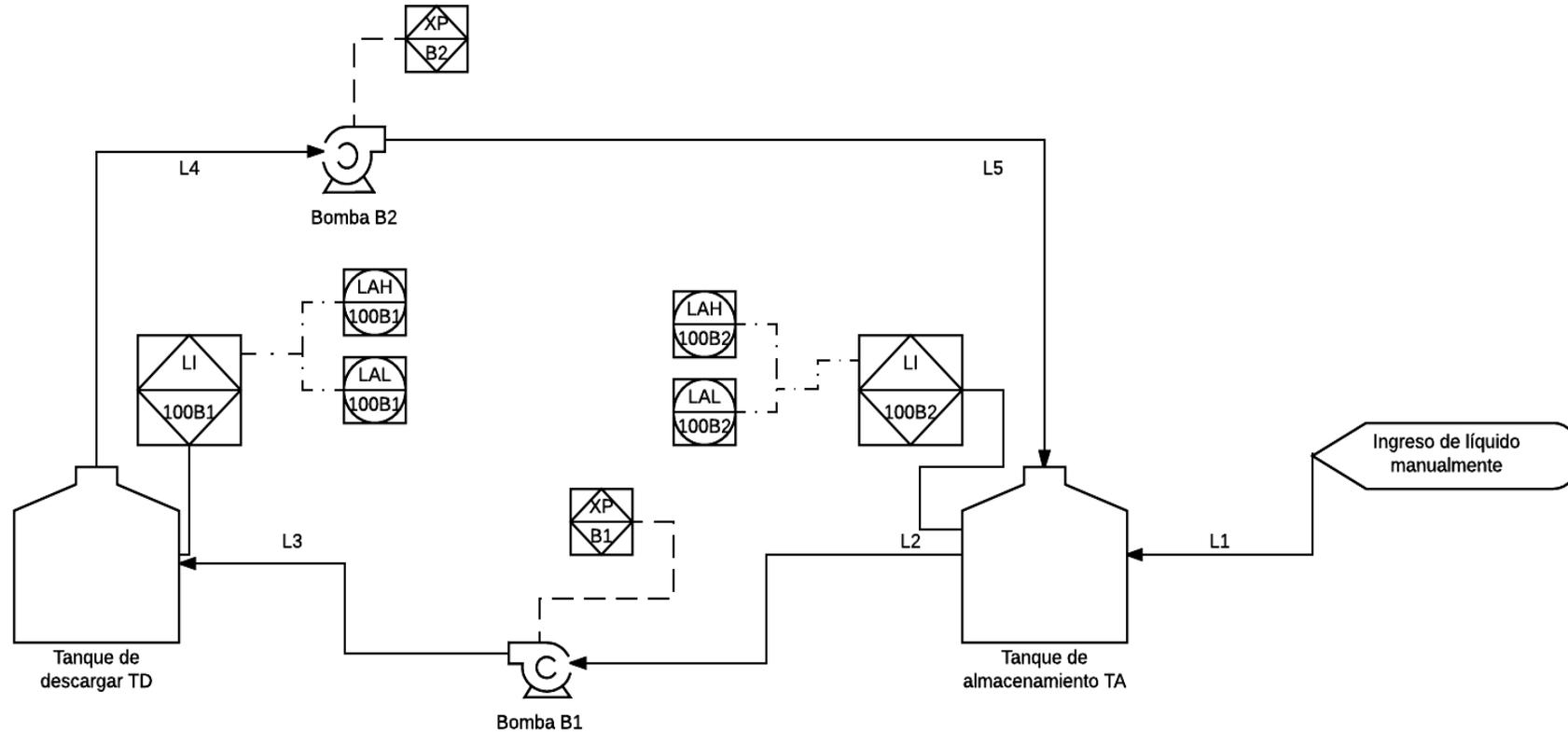


# PROBABILIDAD DE FALLA A LA DEMANDA

Cálculo de elementos de seguridad	Valor
MTTR (Tiempo medido para reparación)	8 horas
CD (Cobertura de diagnóstico)	70%
T1	6 meses (3420 horas)
$\lambda_T$ (Tasa de fallas)	$0.011 \times 10^{-3}$ /hora
$\lambda_S$ (Tasa de falla segura)	$5.70 \times 10^{-6}$ /hora
$\lambda_D$ (Tasa de falla peligrosa)	$5.70 \times 10^{-6}$ /hora
$\lambda_{dd}$ (Tasa de falla peligrosa detectada)	$7.85 \times 10^{-6}$
$\lambda_{du}$ (Tasa de falla peligrosa no detectada)	$18.33 \times 10^{-6}$
SFF (Fracción de falla segura)	68%
Tiempo medio de detención en el subsistema	14121.90 seg
$PFD_{AV}$ (Probabilidad de falla a la demanda)	0.037



# DISEÑO IMPLEMENTADO UN SIS



# COMPROBACIÓN DE LA HIPÓTESIS

**TABLA 13**  
**PROBABILIDAD DE FALLA SISTEMA SIN SIS VS SISTEMA CON SIS**

Descripción del evento	Probabilidad de falla inicial	Probabilidad de falla con un SIS
Derrame de fluido	0,055	0,0000174
Bomba B1 Falla	0,044	0,0000133
Bomba B2 falla	0,022	0,0000066
Falla sistema de control	0,011	0,0000034



# COMPROBACIÓN DE LA HIPÓTESIS

**TABLA 14**  
**ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

Prueba de muestras emparejadas								
Par 1	Diferencias emparejadas					t	g	Sig. (bilateral)
	Media	Desviación estándar	Media de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
				Inferior	Superior			
Fallas sin instalación de SIS - Fallas con instalación de SIS	,03298	,02007	,01003	,0010	,06493	3,286	3	,046



# CONCLUSIONES

- Se demostró la eficacia que tiene un sistema instrumentado de seguridad para reducir la probabilidad de fallas en un proceso de una planta de nivel con depósito de volumen variable para prácticas online en el laboratorio de PLC`s de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga.
- Para cumplir los requisitos exigidos en el prototipo y satisfacer las necesidades del cliente se implementó un módulo didáctico de una planta de nivel usando el diseño concurrente de elementos de máquinas.



# CONCLUSIONES

- La probabilidad de que ocurra una falla en un equipo o sistema siempre está presente debido a varios aspectos que transcurren en los instrumentos, por lo tanto es necesario plantear nuevos sistemas de seguridad que reduzcan la probabilidad de falla, sin olvidar que este valor nunca puede llegar a ser nulo.
- El estudio estadístico en relación al valor de probabilidad de fallas de un sistema instrumentado de seguridad, afirma la eficacia que tiene el SIS al momento de evitar futuras fallas en el proceso, aunque el costo económico representa un punto importante, se contrasta con planes de mantenimiento menos exhaustivos pero de igual importancia.



# RECOMENDACIONES

- La revisión periódica de los elementos de control contribuye a la prevención de eventos peligrosos, por ello, es necesario que se establezcan métodos documentados que indiquen los procedimientos así como los periodos en los cuales deben realizarse pruebas en el sistema de control
- La seguridad funcional debe tener su espacio dentro del marco de seguridad industrial en lo que se refiere a la industria de proceso. De la misma manera que se regula el cumplimiento de normas y lineamientos para la seguridad ocupacional, se debería establecer reglamentos que contemplen la implementación de sistemas de seguridad que cumplan normas internacionales como la IEC 61508 e IEC 61511.

