

(08-008) - Risk analysis by FMECA of a liquid fertilizer manufacturing plant

Fuentes Bargues , José Luis ¹; Miquel Forés, Lluís ²; Lerma Arce, Victoria ³; Sánchez Lite, Alberto ⁴

¹ PRINS Research Center, Universitat Politècnica de València, ² Universitat Politècnica de València, ³ ITACA. Universitat Politècnica de València, ⁴ Universidad de Valladolid

In all industrial processes, and more so in processes that work with chemical products or where atmospheres with a risk of fire and explosion can develop, risk situations can occur, which in the event of materializing in an accident can have a significant impact on the equipment, on people and the environment.

Risk analysis is the tool for the evaluation of the various risks associated with a given industrial installation, based on a systematic investigation that identifies, quantifies, and evaluates the hazards. Its main objective is the prevention and mitigation of the effects of accidents in potentially hazardous installations.

The object of the present communication is the risk analysis of a supply installation of a liquid fertilizer manufacturing plant employing the Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis (FMECA) technique. In this way, a risk classification will be obtained, and, depending on the risk factor, preventive and/or corrective measures will be prioritized so that these risks do not cause accidents or catastrophic situations.

Keywords: Risk assessment; FMECA; Liquid fertilizers; Process safety; Process Safety

Análisis de riesgos mediante FMECA de una planta de fabricación de fertilizantes líquidos

En todos los procesos industriales, y más en procesos que trabajan con productos químicos o donde se pueden desarrollar atmósferas con riesgo de incendio y explosión, se pueden producir situaciones de riesgo, que en caso de materializarse en accidente pueden tener un notable impacto sobre los equipos, sobre las personas y sobre el medio ambiente.

El análisis de riesgos es la herramienta para la evaluación de los diversos riesgos asociados a una determinada instalación industrial, a partir de una investigación sistemática que identifica, cuantifica y evalúa los peligros. Su objetivo principal es la prevención y mitigación de los efectos de los accidentes de las instalaciones potencialmente peligrosas.

El objeto de la presente comunicación es el análisis de riesgos de una instalación de suministro de una planta de fabricación de fertilizantes líquidos mediante la técnica de Análisis de los Modos de Fallo, Efectos y Criticidad (en inglés, FMECA: Failure Mode, Effects and Criticality Analysis). De esta manera se obtendrá una clasificación de los riesgos y en función del factor de riesgo se priorizarán las medidas preventivas y/o correctoras para que estos riesgos no provoquen accidentes o situaciones catastróficas.

Palabras clave: Evaluación riesgos; FMECA; Fertilizantes líquidos; Seguridad de procesos

Correspondencia: José Luis Fuentes Bargues; jofuebar@dpi.upv.es



©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

En todos los procesos industriales, especialmente aquellos que manipulan productos químicos, es posible que se generen situaciones de riesgo de incendio y explosión (Planas et al. 2014). En caso de producirse un accidente, este podría tener un impacto significativo en los equipos, las personas y el medio ambiente (Fuentes-Bargues et al. 2016). La complejidad y la gravedad de las consecuencias de los accidentes graves en las plantas industriales hacen imperativa la implementación de sistemas de gestión de riesgos (Casal 2018).

La norma ISO 31.000:2010 define la gestión del riesgo como las actividades coordinadas para dirigir y controlar una organización en lo que respecta al riesgo. Este proceso abarca diversas fases, que incluyen la comunicación y consulta, el establecimiento del contexto, la apreciación, el tratamiento, y el seguimiento y revisión del riesgo (ISO 2010).

La apreciación del riesgo implica identificar, analizar y evaluar los riesgos asociados a una determinada instalación industrial. Su principal objetivo es prevenir y mitigar los efectos de los posibles accidentes en instalaciones potencialmente peligrosas (ISO 2010). La elección de las técnicas de apreciación del riesgo adecuadas no es una decisión arbitraria ya que depende de factores como la complejidad del problema, los métodos disponibles para analizarlo, la cantidad de información disponible, la necesidad de datos cuantitativos y los recursos disponibles (Tixier et al. 2002; Marhaviilas, Koulouriotis & Gemeni 2011).

Entre las diferentes técnicas de apreciación de riesgos se encuentra el Análisis de los Modos de Fallo, Efectos y Criticidad (AMFEC; en inglés, FMECA: Failure Mode, Effects and Criticality Analysis), que puede ser aplicada en todas las fases del proceso de apreciación de riesgos, presentando una complejidad de aplicación media, y que permite la obtención de resultados cuantitativos (ISO 2011). Es una técnica que ha sido utilizada en diversos campos, como, por ejemplo, para identificar los modos de fallo de los diferentes sistemas (estructura, propulsión, electricidad y auxiliares) de buques pesqueros (Pillay & Wang 2003), para determinar los modos de fallo de máquinas herramientas en servicio (Du, Liao & Wang 2017), para la evaluación del ciclo de vida de un sistema de baterías (Cristaldi, Molena & Petkovski 2022) o para el análisis de equipos de manipulación industrial (Rouabhia-Essalhi, Boukrouh & Ghemari 2022).

El objeto de la presente comunicación es el análisis de riesgos de una instalación de suministro de una planta de fabricación de fertilizantes líquidos mediante la técnica AMFEC, obteniéndose una clasificación de los modos de fallo que permita la priorización de las medidas preventivas y/o correctoras para que estos riesgos no provoquen accidentes o situaciones catastróficas.

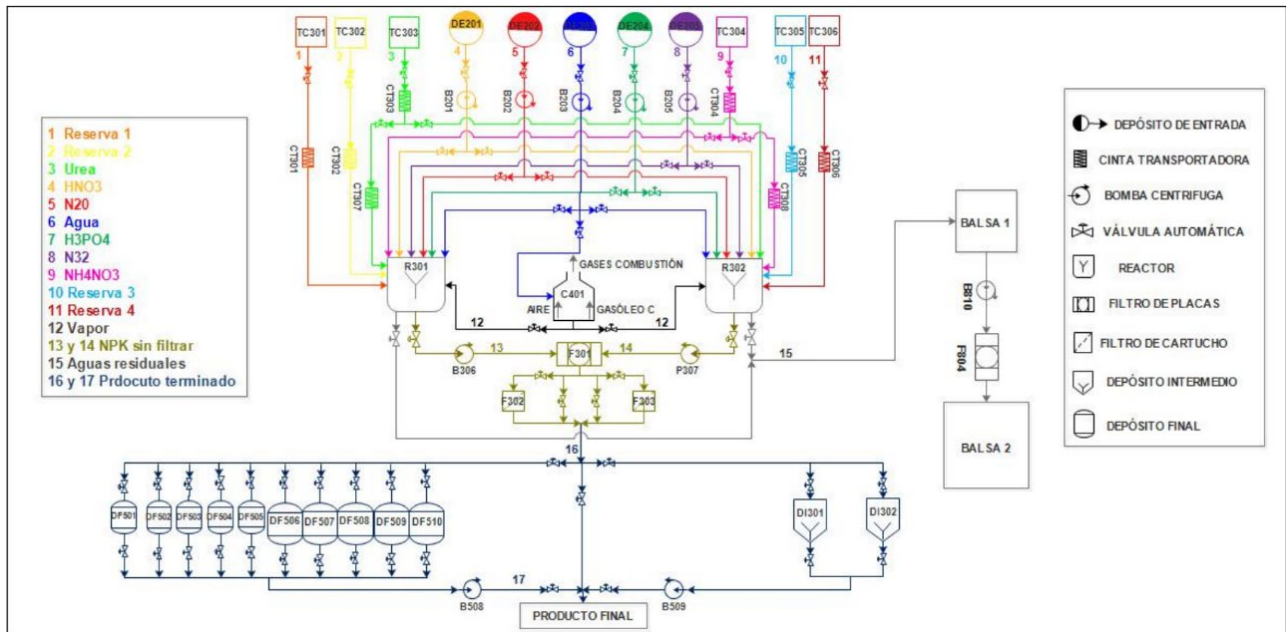
2. Descripción del proyecto

El proyecto objeto de la presente comunicación es una planta de fabricación de fertilizantes NPK líquidos. Por motivos de confidencialidad y por no afectar al análisis de riesgos del proceso, no se indica el emplazamiento. Los fertilizantes NPK, como los que se producen en esta planta, están formados por diferentes porcentajes de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). La cantidad de cada uno de ellos en el producto final se mide como el porcentaje de NO_3^- o NH_4^+ , P_2O_5 y K_2O .

En la Figura 1 se muestra el diagrama del proceso de fabricación. Para el análisis de riesgos del proceso la planta se ha dividido en tres sistemas principales. El primero es el sistema de Recepción y Almacenaje, donde se procede a la recepción y almacenaje de las materias primas, tanto sólidas como líquidas. A continuación, en el sistema Mezclado y Filtrado se han considerado todas las operaciones de carga de materias

primas en los reactores, así como el mezclado y el filtrado para la obtención de los diferentes tipos de fertilizantes, incluyendo también la depuración de aguas residuales. Finalmente se ha considerado el sistema de Almacenamiento del producto final y la Expedición de los fertilizantes líquidos a los vehículos de transporte.

Figura 1: Diagrama del proceso de fabricación de fertilizantes de la planta. Fuente: Ibáñez Estarrelles



3. Metodología

La metodología propuesta para el análisis de riesgos de la planta de fabricación de fertilizantes líquidos se ha estructurado en cuatro etapas. La primera etapa (A) comprende el estudio del proceso. La fase (B) comprende la identificación de riesgos, la fase (C) comprende el análisis de riesgos mediante la técnica de Análisis de los Modos de Fallo, Efectos y Criticidad (FMFEC) y la fase (D) comprende la evaluación de riesgos con los niveles definidos inicialmente. De esta manera se obtendrá una clasificación de los riesgos y en función del factor de riesgo se priorizarán las medidas preventivas y/o correctoras para que estos riesgos no provoquen accidentes o situaciones catastróficas.

3.1.- Metodología de Análisis de los Modos de Fallo, Efectos y Criticidad (AMFEC)

El Análisis de los Modos de Fallo, Efectos y Criticidad (AMFEC) es una técnica usada para identificar y analizar la fiabilidad en de sistemas, sus mecanismos de fallo, y el efecto producido por los mismos (AENOR 2008; AENOR 2018).

En el AMFEC, a partir de la información del funcionamiento del proceso, se identifican los posibles modos de fallos y cuáles serían los efectos en caso de que se produjeran, así como sus causas posibles. Para cada modo de fallo y con objeto de disponer de una clasificación cuantitativa de los modos de fallo que nos permita priorizar los cambios en el proceso o las medidas preventivas y/o correctoras pertinentes, se calcula un parámetro denominado Nivel de Prioridad de Riesgo (NPR) a partir de la expresión:

$$NPR = S \times O \times D \quad [1]$$

Donde:

S es la Severidad, es decir, la gravedad con que los efectos de un fallo afectan al sistema. En la Tabla 1 se presenta la escala de Severidad utilizada.

O es la Ocurrencia, es decir, la probabilidad de que un modo de fallo se manifieste en un tiempo establecido que suele coincidir con la vida útil del componente examinado. Puede definirse como un número de clasificación (o número índice) en lugar de la probabilidad real de ocurrencia. En la Tabla 2 se presenta la escala de Ocurrencia utilizada.

D es la Detección, es decir, la estimación de la posibilidad de identificar/diagnosticar y eliminar/prevenir la aparición de una avería antes de que sus efectos se manifiesten en el sistema. Este número se suele clasificar en orden inverso de los números de gravedad o incidencia: cuanto mayor sea el número de detección D, menos probable es la posibilidad de identificar la avería y viceversa. En la Tabla 3 se presenta la escala de Detección utilizada.

Tabla 1: Severidad del modo de fallo. Categorías, descripción y valores

Severidad	Descripción de la severidad del modo de fallo	Valor
Insignificante	Puede degradar al funcionamiento del elemento sin dañarlo ni tampoco al ambiente	1
Mínima	Puede afectar a alguna funcionalidad secundaria del elemento, pero no al ambiente	2
Pequeña	Puede dañar el funcionamiento del elemento sin impedir sus funciones principales y sin suponer una amenaza al ambiente	3
Leve	Puede dañar el funcionamiento del elemento y alterar sus funciones principales, pero sin suponer un peligro significativo para el ambiente	4
Baja	Puede impedir la realización de algunas funciones principales del elemento y afectar al ambiente sin ser un riesgo serio	5
Moderada	Puede impedir la realización de las funciones principales del elemento y suponer un riesgo significativo para el ambiente	6
Elevada	Puede dañar el funcionamiento completo del elemento y perjudicar el ambiente	7
Alta	Puede dañar el funcionamiento del sistema completo y producir problemas significativos al ambiente	8
Muy alta	Puede dañar gravemente el sistema completo y causar problemas importantes al ambiente	9
Máxima	Puede inhabilitar el sistema completo y causar daños graves al ambiente	10

Tabla 2: Ocurrencia del modo de fallo. Categorías, probabilidad y valores

Ocurrencia	Probabilidad de suceso equivalente a una cantidad de fallos	Valor
Remoto	1×10^{-10} /hora	1
Esporádico	1×10^{-9} /hora	2
Improbable	1×10^{-8} /hora	3
Ocasional	1×10^{-7} /hora	4
Casual	1×10^{-6} /hora	5
Posible	1×10^{-5} /hora	6
Probable	1×10^{-4} /hora	7
Potencial	1×10^{-3} /hora	8
Muy probable	1×10^{-2} /hora	9
Casi inevitable	1×10^{-1} /hora	10

Tabla 3: Detección del modo de fallo. Categorías, efectividad y valores

Detección	Efectividad de la detección	Valor
Casi segura	Se detectará casi con total seguridad	1
Muy alta	Se detectará casi siempre	2
Alta	Se detectará en muchas ocasiones	3
Elevada	Se detectará en la mayoría de las ocasiones	4
Moderada	Se detectará usualmente	5
Baja	Se detectará en pocas ocasiones	6
Muy baja	Se detectará en muy pocas ocasiones	7
Improbable	Se detectará de manera improbable	8
Remota	Se detectará en remotas ocasiones	9
Nula	No se detectará	10

El NPR no solo clasifica el modo de fallo en función de la severidad y de la probabilidad de que suceda sino también en función de los mecanismos de detección. Esto genera que una menor probabilidad de detección conducirá a un fallo con un NPR mayor, lo que supone la necesidad de resolver el modo de fallo con la máxima prioridad y rapidez.

En la Tabla 4 se muestra las categorías de los modos de fallo en función de los valores de NPR, así como las estrategias a desarrollar según la categoría.

Tabla 4: Categorías y estrategias de los NPR

NPR	Estrategia sobre medidas correctoras y preventivas.	Categoría
1 - 50	No se tomará ninguna medida correctora por el momento.	1
51 - 100	Se plantean soluciones o mejoras a largo plazo. No se incrementará la cantidad de revisiones de los elementos ni se realizará un seguimiento.	2
101 - 150	Se tomarán medidas correctoras a medio plazo. Se realizará un seguimiento de los modos de fallo para comprobar su evolución en el tiempo.	3
151 - 200	Se tomarán medidas correctoras a corto plazo. Se establecerán revisiones del funcionamiento de los elementos de forma más habitual.	4
> 201	Deben tomarse medidas correctoras y mejoras preventivas inmediatamente. Las revisiones y el mantenimiento se realizarán frecuentemente.	5

4. Aplicación al caso de estudio

Una vez analizado el proceso de funcionamiento de la planta de fabricación de fertilizantes líquidos y de cara al análisis de riesgos se ha dividido el proceso en sistemas, subsistemas y nodos tal y como muestra la Tabla 5.

En la Tabla 6 se muestra la identificación de los modos de los nodos y componentes del sistema 2 Mezclado y Filtrado. No se adjuntan los modos de fallos de los sistemas 1 y 3 debido a la extensión de la comunicación.

Tabla 5: Sistemas, Subsistema y Nodos del proceso de fabricación de fertilizantes líquidos

Sistemas	Subsistemas	Nodos	
1. Recepción y almacenaje	1.1 Recepción materias primas	1.1.1 Pesado del vehículo	
		1.2.1 Preparación del troje y alineación del vehículo	
	1.2 Almacenaje materias primas sólidas	1.2.2 Descarga y distribución de la materia prima	
		1.3.1 Colocación del vehículo y conexión de la manguera	
	1.3 Almacenaje materias primas líquidas	1.3.2 Llenado del depósito	
		1.3.3 Desconexión de la manguera y cerrado del depósito	
	2. Mezclado y filtrado	2.1 Carga materias primas sólidas	2.1.1 Llenado de tolvas mediante pala cargadora
			2.1.2 Transporte de materias sólidas mediante cinta transportadora
		2.2 Carga materias primas líquidas	2.2.1 Apertura de la válvula
			2.2.2 Bombeo del líquido mediante bomba centrífuga
2.3 Mezclado en reactores		2.3.1 Llenado de los reactores	
		2.3.2 Incorporación del agua proveniente de la caldera	
		2.3.3 Operación de los reactores	
		2.3.4 Vaciado de los reactores mediante la apertura de la válvula	
		2.3.5 Bombeo mediante bomba centrífuga	
2.4 Filtrado del producto		2.4.1 Llenado del filtro de placas	
	2.4.2 Operación del filtro de placas y recogida de sólidos		
	2.4.3 Salida del líquido filtrado mediante apertura de la válvula		
	2.4.4 Llenado de los filtros de cartuchos		
	2.4.5 Operación de los filtros de cartuchos		
	2.4.6 Vaciado del líquido filtrado		
2.5 Tratamiento aguas residuales	2.5.1 Apertura de válvula, canalización y llenado de la primera balsa		
	2.5.2 Bombeo de agua hacia un filtro de placas		
	2.5.3 Llenado del filtro de placas		
	2.5.4 Operación del filtro de placas y recogida de sólidos		
	2.5.5 Salida del líquido filtrado y llenado de la segunda balsa		
	2.5.6 Recogida de residuos sólidos y guardado		
3. Almacenamiento y expedición	3.1 Almacenamiento final	3.1.1 Apertura de válvula	
		3.1.2 Llenado de los depósitos intermedios o finales	
	3.2 Expedición producto final	3.2.1 Colocación del vehículo en la zona de descarga	
		3.2.2 Apertura de válvula de los depósitos	
		3.2.3 Llenado del vehículo	
		3.2.4 Pesado del vehículo	

Tabla 6: Modos de fallo identificados en los nodos y componentes del sistema 2

	Nodo		Componente		Modos de fallo
2.1.1	Llenado de tolvas mediante pala cargadora	2.1.1.1	Tolva	a	Sobrecarga de la tolva y derrames
		2.1.1.2	Pala cargadora	a	Inhabilitación de la pala cargadora
2.1.2	Transporte de materias sólidas mediante cinta transportadora	2.1.2.1	Cinta transportadora	a	Atascos o bloqueos de la cinta transportadora
				b	Derrames de materiales
2.2.1	Apertura de la válvula	2.2.1.1	Válvula	a	Fallo del accionador neumático
				b	Fallo en la apertura de la válvula (problema eléctrico, mecánico)
				c	Golpe de ariete
2.2.2	Bombeo del líquido mediante bomba centrífuga	2.2.2.1	Bomba	a	Fallos en el funcionamiento de la bomba (cavitación, desgaste, sellado, sobrecalentamiento, eléctricos, cebado...)
				b	Fugas en la tubería
2.3.1	Llenado de los reactores	2.3.1.1	Reactor	a	Introducción de cantidades inadecuadas
				b	Derrames o sobrellenado
2.3.2	Incorporación del agua proveniente de la caldera	2.3.2.1	Caldera	c	Contaminación de la mezcla por sustancias indeseadas
				a	Problemas de combustión
				b	Generación insuficiente de vapor
2.3.3	Operación de los reactores	2.3.3.1	Reactor	c	Fugas en la tubería de transporte
				a	Derrames o salpicaduras
				b	Problemas de sobrecalentamiento
				c	Avería del agitador vertical
2.3.4	Vaciado de los reactores mediante la apertura de la válvula	2.3.4.1	Válvula	d	Problemas de sellado del tanque del reactor
				a	Fallo del accionador neumático
				b	Fallo en la apertura de la válvula (problema eléctrico o mecánico)
2.3.5	Bombeo mediante bomba centrífuga	2.3.5.1	Bomba centrífuga	a	Fallos en el funcionamiento de la bomba (cavitación, desgaste, sellado, sobrecalentamiento, eléctricos, cebado...)
				b	Fugas en la tubería
2.4.1	Llenado del filtro de placas	2.4.1.1	Filtro de placas	a	Atasco en el filtro
				b	Fugas en el filtro
				c	Contaminación con otros tipos de fertilizante usados
2.4.2	Operación del filtro de placas y recogida de sólidos	2.4.2.1	Filtro de placas	a	Rotura de las placas o piezas del filtro
				b	Bloqueo u obstrucción del filtro
				c	Uso de los filtros incorrectos
2.4.3	Salida del líquido filtrado mediante apertura de la válvula	2.4.3.1	Válvula	a	Fallo del accionador neumático
				b	Fallo en la apertura de la válvula (problema eléctrico o mecánico)
2.4.4	Llenado de los filtros de cartuchos	2.4.4.1	Filtro de cartuchos	a	Bloqueo, atasco u obstrucción del filtro
				b	Fugas en el filtro
				c	Contaminación con otros tipos

Nodo		Componente		Modos de fallo	
					de fertilizante usados
2.4.5	Operación de los filtros de cartuchos	2.4.5.1	Filtro de cartuchos	a	Rotura de los cartuchos del filtro
				b	Fugas en el filtro
				c	Uso de los cartuchos incorrectos
2.4.6	Vaciado del líquido filtrado	2.4.6.1	Filtro de cartuchos	a	Obstrucción de la salida por fallo del equipo
				b	Fugas en la tubería
2.5.1	Apertura de válvula, canalización y llenado de la primera balsa	2.5.1.1	Válvula	a	Fallo del accionador neumático
				b	Fallo en la apertura de la válvula (problema eléctrico, mecánico o fugas)
		2.5.1.2	Primera balsa	a	Problemas en la canalización
				b	Sobrellenado de la balsa
2.5.2	Bombeo de agua hacia un filtro de placas	2.5.2.1	Bomba centrífuga	a	Fallos en el funcionamiento de la bomba (cavitación, desgaste, sellado, sobrecalentamiento, eléctricos, cebado...)
				b	Fugas en la tubería
2.5.3	Llenado del filtro de placas	2.5.3.1	Filtro de placas	a	Atasco en el filtro
				b	Fugas en el filtro
				c	Contaminación con otros tipos de fertilizante usados
2.5.4	Operación del filtro de placas y recogida de sólidos	2.5.4.1	Filtro de placas	a	Rotura de las placas o piezas del filtro
				b	Bloqueo u obstrucción del filtro
				c	Uso de los filtros incorrectos
2.5.5	Salida del líquido filtrado y llenado de la segunda balsa	2.5.5.1	Válvula	a	Fallo del accionador neumático
				b	Fallo en la apertura de la válvula (problema eléctrico o mecánico)
		2.5.5.2	Balsa	a	Sobrellenado de la balsa
2.5.6	Recogida de residuos sólidos y guardado	2.5.6.1	Residuos sólidos	a	Fallo en la recolección de los sólidos
				b	Sobrepase de la capacidad de llenado

Una vez identificados los modos de fallo, se procede para cada uno de ellos, a identificar el efecto que se generaría en el proceso, así como cuáles serían las posibles causas. Con estos datos y de acuerdo con la metodología descrita se procede a valorar la severidad del fallo, la probabilidad de ocurrencia del fallo: con la ayuda de manuales de fiabilidad de componentes (Dexter & Perkins 1982; Denson et al. 1991; USA 1998) o en base a la experiencia acumulada en la operación de los procesos, así como los sistemas de detección de los fallos y la rapidez en la detección.

En la Tabla 7 se presenta como ejemplo el análisis de los modos de fallo del nodo “2.3.3 Operación de los reactores”.

Una vez calculado el valor del NPR para todos los modos de fallo se procede a su categorización de acuerdo con los valores de la Tabla 4. En la Tabla 8 se presentan todos los valores de NPR ordenados de mayor a menor con las categorías de riesgo asociadas.

Tabla 8: NPR y categorías de riesgo

Referencia	NPR	Categoría	Referencia	NPR	Categoría
2.2.2.1.a			2.5.5.1.a		
2.3.5.1.a	252		3.1.1.1.a	84	
2.5.2.1.a		5	3.2.2.1.a		
2.3.3.1.c	210		2.1.2.1.a	80	
3.1.2.1.b			2.4.2.1.b		
1.3.2.1.a			2.4.5.1.b	75	
2.3.1.1.b			2.5.4.1.b		
3.1.2.1.a	147		1.3.1.1.a		
3.1.2.2.a			1.3.3.1.a	72	2
3.2.3.1.b			3.2.3.1.a		
2.3.4.1.b			2.2.2.1.b		
2.4.1.1.a		4	2.3.2.1.c	70	
2.4.3.1.b			2.3.5.1.b		
2.4.4.1.a			2.4.6.1.b		
2.5.1.1.b	140		2.5.1.2.b	60	
2.5.3.1.a			2.5.5.2.a		
2.5.5.1.b			1.3.2.1.b	56	
3.1.1.1.b			2.5.1.2.a	48	
2.4.2.1.a			2.1.2.1.b		
2.4.5.1.b	128		2.4.1.1.c	40	
2.5.4.1.a			2.4.4.1.c		
2.3.2.1.b	125		2.5.3.1.c		
2.3.2.1.a	120	3	2.5.6.1.b	32	
2.3.3.1.a			1.2.1.1.a		
2.2.1.1.b			2.3.3.1.b	30	
2.3.3.1.d	112		3.2.2.1.a		
3.2.2.1.b			1.2.1.1.b	27	
1.1.1.1.b			2.3.1.1.a	24	1
2.4.1.1.b			2.4.2.1.c		
2.4.4.1.b			2.4.5.1.c	18	
2.4.6.1.a	100		2.5.4.1.c		
2.5.3.1.b			1.2.2.1.a	14	
3.2.4.1.b			1.1.1.1.a	12	
2.5.6.1.a	96	2	3.2.4.1.a		
2.1.1.2.a	90		2.2.1.1.c	9	
2.2.1.1.a			3.2.2.1.c		
2.3.4.1.a			1.3.1.1.b	8	
2.4.3.1.a	84		2.1.1.1.a		
2.5.1.1.a					

Una vez clasificados los riesgos según las categorías, la organización establecerá el calendario para la puesta en marcha de las medidas correctoras y/o preventivas correspondientes. Las medidas propuestas irán destinadas a la corrección de cada modo de fallo, si bien, determinadas acciones, tanto técnicas como organizativas, pueden suponer la reducción del NPR de varios modos de fallos de un mismo componente o incluso de diferentes componentes. En la Tabla 9 se describen las medidas correctoras y preventivas para los modos de fallo clasificados como de categoría 5 y 4.

Tabla 9: Medidas preventivas y correctoras de los modos de fallo de las categorías 5 y 4

Categoría	Modos de Fallo	Descripción Medidas Preventivas y Correctoras
5		Disponer de equipo de respaldo en caso de avería general de la bomba, ya sea con una nueva o con reemplazos de sus componentes internos mecánicos, eléctricos y electrónicos.
	2.2.2.1.a	Establecer un sistema de monitoreo del funcionamiento continuo que permita detectar anomalías en el comportamiento, así como recabar datos sobre su rendimiento.
	2.3.5.1.a	Realizar un mantenimiento que incluya revisión de aspecto diario, lubricación semanal y limpieza interna trimestral, entre otras medidas que se puedan solicitar al fabricante para mejorar el funcionamiento de la bomba.
	2.5.2.1.a	Preparar al personal para la operación y mantenimiento de la bomba, incluyendo arranque y apagado, y la detección de fallos comunes.
		Implantar otros sistemas de protección como pueden ser medidores de temperatura o sensores de vibraciones en el motor, o medidores avanzados de presión en la bomba.
		Tener un motor de reserva en caso de avería grave del principal, de la misma manera que de sus componentes en caso de avería leve o necesidad de reparación.
4	2.3.3.1.c	Realizar un mantenimiento frecuente del motor, que incluya revisiones visuales diarias, lubricación y limpieza de conductos mensual, y test de rendimiento y revisión de conexiones trimestral.
	3.1.2.1.b	Formar a trabajadores en aspectos técnicos de funcionamiento del motor, para poder detectar anomalías y asegurar un funcionamiento correcto.
		Monitoreo de las condiciones de trabajo del motor, mediante medidores de temperatura o sensores de vibración.
	1.3.2.1.a	Realizar calibraciones periódicas del sistema de medición del nivel y establecer un mantenimiento preventivo que incluya limpieza y reemplazo de componentes deteriorados.
	3.1.2.1.a	Hacer revisiones visuales semanales del nivel del depósito para comprobar que se ajusta con los datos proporcionados por el sistema.
	3.1.2.2.a	Instalar un sistema de doble medidor de nivel, para comparar las mediciones de ambos y detectar más fácilmente los sobrelLENADOS.
	3.2.3.1.b	Capacitar a personal para la correcta lectura e interpretación de los datos proporcionados por el medidor de nivel.
	2.3.1.1.b	Instalar un sistema de alarma o aviso cuando se sobrepasa el nivel máximo permitido, tanto si lo detecta el medidor como si no, para poder evitar posibles derrames.
		Instalar una válvula paralela al circuito que pueda reemplazar a la principal temporalmente mientras se repara o cambia.
	2.3.4.1.b	Implementar un mecanismo de activación manual de la válvula para abrirla si el estado de esta lo permite, y más tarde detener el proceso y arreglarla cuando sea conveniente.
2.4.3.1.b	Realizar unas inspecciones mensuales para limpiar los componentes, eliminar la corrosión y otras obstrucciones, y reemplazar los componentes necesarios que estén desgastados o	

2.5.1.1.b	que el fabricante haya indicado cambiar cuando ha terminado su ciclo de vida. Revisión visual diaria de su funcionamiento y comprobación semanal de estanqueidad y del estado de los sellos.
2.5.5.1.b	Añadir medidores de presión que indiquen si el cierre o apertura no está funcionando correctamente.
3.1.1.1.b	Formar a personal en la operación, mantenimiento de la válvula, incluyendo procesos de limpieza y lubricación, y detección de fallos o deterioro de los componentes.

2.4.1.1.a	Capacitación de personal para realizar la instalación adecuada de las placas o los cartuchos. Los encargados de la instalación deben recibir las instrucciones claramente y se debe realizar una instrucción y una supervisión inicial.
2.4.4.1.a	Proporcionar a los encargados de los filtros manuales e instrucciones sobre el funcionamiento de los equipos, donde se indiquen los procedimientos a seguir en caso de duda o problema en la instalación de las placas o los filtros.
2.5.3.1.a	Implementar un proceso de verificación de la correcta instalación de los elementos en los equipos, mediante inspecciones visuales en cada cambio de componentes y mediante los controles pertinentes para comprobar que se han seguido los pasos correctos en la instalación de los filtros.

5. Conclusiones

La metodología AMFEC permite realizar el proceso de apreciación de riesgos completos, desde una identificación, análisis y evaluación de los riesgos, así como disponer de una clasificación que permita la priorización del tratamiento de los riesgos. La información necesaria para la aplicación de la técnica puede ser tanto cuantitativa como cualitativa, de manera que resulta fácil su adaptabilidad y aplicación a diferentes campos.

En el proyecto de planta de fabricación de fertilizantes líquidos los modos de fallo que presentan un mayor NPR son los fallos en accionadores neumáticos y en bombas, tanto en el llenado del reactor como en la salida del reactor hacia los depósitos de almacenamiento de producto final, así como posibles derrames en el llenado del reactor donde se produce la mezcla de los fertilizantes. Estos modos de fallo son relativamente fáciles de detectar mediante sensores y monitoreo en continuo del sistema, pero la determinación y sustitución del elemento o parte del subsistema a reparar/sustituir conlleva un mayor tiempo de análisis, así como de un grado de experiencia en el funcionamiento y mantenimiento de este tipo de instalaciones.

5. Referencias

- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). UNE-EN 60812:2008. Técnicas de análisis de fiabilidad de sistemas. Procedimiento de análisis de los modos de fallos y de sus efectos (AMFE).
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). UNE-EN IEC 60.812:2018. Análisis de los modos de fallo y de sus efectos (AMFE y AMFEC).
- Casal, J. (2018). Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-00740-4>
- Cristaldi, L., Molena, E. & Petkovski, E. (2022). In IIEE International Conference on Metrology for Extended Reality, Artificial Intelligence and Neural Engineering (MetroXRAINE), 34-39.
- Denson, W., Chandler, G., Crowell, W. & Wanner, R. (1991) Nonelectronic parts reliability data. Reliability Analysis Center, Rome, NY. 13440-8200.

- Dexter, A.H., Perkins, W.C. (1982). Component failure-rate data with potential applicability to a nuclear fuel reprocessing plant. E.I. du Pont de Nemours & Co., Savannah River Laboratory, Aiken, SC, 29808.
- Du, Y.B., Liao, L. & Wang, L.S. (2017). Failure Mode, Effects and Criticality Analysis of Remanufactured Machine Tools in Service. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 18(3), 425-434.
- Fuentes-Bargues, J.L., Gonzalez-Gaya, C., González-Cruz, M.C. & Cabrelles-Ramirez, V. (2016). Risk Assessment of a compound feed process based on HAZOP analysis and linguistic terms. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 44, 44 - 52. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.08.019>
- Ibáñez Estarellas, D. (2017). Diseño de una planta de producción de fertilizantes NPK líquidos con una producción de 300 Tm/día situada en el polígono industrial “El Tossalet” de Bèlgida. Trabajo Final de Grado de Ingeniería Química. Campus de Alcoy. Univerisitat Politècnica de València.
- International Standard Organization (ISO). ISO 31.000:2010. Risk Management. Principles and Guidelines on Implementation.
- International Standard Organization (ISO). ISO 31.010:2011: Risk Management. Risk Assessment Techniques.
- Marhavilas, P.K., Koulouriotis, D. & Gemeni, V. (2011). Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24, 477-523. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.03.004>
- Planas, E., Arnaldos, J., Darbra, R.M., Muñoz, M., Pastor, E. & Vílchez, J.A. (2014). Historical evolution of process safety and major-accident hazards prevention in Spain. Contribution of the pioneer Joaquim Casal. *J. Loss Prev. Process Ind.* 28, 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.04.005>
- Pillay, A., Wang, J. (2003). Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning. *Reliability Engineering & System Safety*, 79(1), 69-85. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(02\)00179-5](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(02)00179-5)
- Rouabhia-Essalhi, R., Boukrouh, E.H. & Ghemari, Y. (2022). Application of failure mode effect and criticality analysis to industrial handling equipment. *Int J Adv Manuf Technol* 120, 5269–5280. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09099-y>
- Tixier, J., Dusserre, G., Salvi, O. & Gaston, D. (2002). Review of 62 analysis methodologies of industrial plants. *J. Loss Prev. Process Ind.* 15, 291–303. [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(02\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(02)00008-6)
- United States America (USA). Department of Defense. (1998). Military Handbook. Electronic Reliability Design Handbook (MIL-HDBK.338B).

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

