







Artículo Original

# Estudio de confiabilidad de sistema de enfriamiento para balas de gas licuado de petróleo

## Reliability study of cooling system for liquefied petroleum gas bullets

Arlene Dámera Figueredo<sup>1</sup>  <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>, Wilmer Orlando Camero López<sup>1</sup>  <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>, Arnaldo Dámera Martínez<sup>1</sup>  <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>, Kenia Adela Ramos Espinosa<sup>1</sup>  <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

### Historial del artículo

Recibido: 30 julio 2019

Aceptado: 2 octubre 2019

<sup>1</sup>Centro de Ingeniería Ambiental de Camagüey, Camagüey, Cuba.  
Email: arlene@ciac.cu

Artículo de acceso abierto bajo licencia Creative Commons Atribución NoComercial CompartirIgual (CC-BY-NC-SA) 4.0.



**Resumen:** Se presenta una propuesta técnica de un sistema de seguridad de enfriamiento mecánico para cuatro balas de gas licuado de petróleo, destinadas a su almacenamiento. Para evaluar la fiabilidad del sistema se utilizó el método Analysis of Effects and Modes of Failures expanded (FMEAE). Dicho método expande las potencialidades del FMEAE tradicional, permitiendo realizar análisis y evaluaciones detalladas de sistemas industriales de cualquier complejidad y tipo. Se obtuvo como resultados que el Índice de Riesgo del Sistema (IRS) está dentro de la zona tolerable según la escala ponderada por el método de FMEAE.

**Palabras clave:** sistema de enfriamiento, seguridad, confiabilidad.

**Abstract:** A technical proposal of a mechanical cooling safety system for four bullets of liquefied petroleum gas, for storage is presented. To evaluate the reliability of the system, the Analysis of Effects and Modes of Failures expanded (FMEAE) method was used. This method expands the potential of the traditional FMEAE, allowing detailed analysis and evaluation of industrial systems of any complexity and type. It was obtained as results that the System Risk Index (IRS) is within the tolerable zone according to the scale weighted by the FMEAE method.

**Keywords:** cooling system, security, reliability

**Citación recomendada para este artículo:** Dámera Figueredo, A., Camero López, O., Dámera Martínez, A. y Ramos Espinosa, K. (2019). Estudio de confiabilidad de sistema de enfriamiento para balas de gas licuado de petróleo. *Monteverdia*, 12 (2), pp. 09-17. Recuperado de: <https://revistas.reduc.edu.cu/index.php/monteverdia/article/view/2687/2861>

### Introducción

Los avances de la ciencia y la tecnología han propiciado la satisfacción de la actual demanda energética y de otros servicios que hoy disfruta la humanidad en los países desarrollados y en gran parte de aquellos que integran el bloque de los llamados países de economías emergentes. Las mejoras sociales por el consumo (muchas veces excesivo) de estas fuentes de confort, han implicado que se incremente el potencial de riesgo a que se está expuesto diariamente, y de ello es testigo la estadística de muertes, lesiones graves y pérdidas económicas enormes, debidas a accidentes en el transporte y la industria nuclear y también la no nuclear, según Perdomo (2016).

En nuestro país, a lo largo de los años, los derivados de la industria del petróleo han adquirido cultura de seguridad. Sin embargo, los análisis de riesgo no se realizan y se actualizan como una práctica habitual del trabajo de la industria. Lo que se acomete, normalmente, bajo el imperativo de una exigencia de los órganos reguladores, es la presentación de un informe o reporte técnico donde se fundamenta un grupo de medidas necesarias para disminuir los riesgos de las instalaciones, y para ello se contrata un grupo consultor. Como resultado se elabora un plan de medidas a implementar a corto y largo plazo. Ello permite obtener la licencia requerida y, una vez logrado tal propósito, el informe de la evaluación de riesgos se archiva, a veces sin llegar a ser totalmente comprendido

por parte del explotador (Verde, 2012).

A pesar de lo descrito anteriormente, en Cuba se estipulan esfuerzos para implantar una cultura típica de la industria con altos requisitos de seguridad, como la nuclear, que propicie estudios de confiabilidad y de riesgo desde las etapas tempranas de diseño.

El objetivo de este trabajo es confeccionar un diseño mecánico de un sistema de seguridad para el enfriamiento de cuatro balas de almacenamiento de GLP, en las instalaciones destinadas para su llenado y analizar la confiabilidad de dicho sistema mediante el método Analysis of Effects and Modes of Failures expanded (FMEAe).

### **Materiales y métodos**

A diferencia de la metodología tradicional de FMEA, FMEAe (acrónimo de Failure Modes and Effect Analysis extended), evalúa la fiabilidad del objeto de estudio o el riesgo debido a la práctica relacionada con este, a partir del análisis de criticidad de los modos de falla postulados. Es decir, emplea la técnica de FMEA con alcance extendido a otras potencialidades de análisis presentes en técnicas cuantitativas como la de Análisis por Árbol de Fallas (Perdomo y Salomón, 2016a).

FMEAe parte de postular los modos de falla de un sistema previamente definido, para determinar los efectos que estos pueden provocar sobre la disponibilidad o confiabilidad del sistema, sobre la salud del personal y/o miembros del público, y sobre el medio ambiente, permitiendo además relacionar los costos directos de dichos efectos. Una vez determinados los efectos anteriores, se procede a la evaluación que incluye el análisis de criticidad de los modos de falla y de la fiabilidad o riesgo del sistema (Perdomo 2016). El formato que emplea es tabular, con una forma cómoda de presentación que permite incluir en la misma pantalla todas las variables involucradas.

Las nuevas potencialidades introducidas en FMEAe se relacionan a continuación:

- Determina de modo automático las fallas de causa común (FCC) y las incorpora como un componente-modo de falla dentro del análisis de criticidad. Ello permite incluir este tipo de fallas que suele ser dominante del riesgo en sistemas con alta redundancia.
- Determina las dependencias funcionales entre los componentes de los sistemas frontales y sus soportes,

lográndose detectar aquellas dependencias críticas a nivel de estos.

- Evalúa la criticidad de los componentes-modos de falla partiendo de índices cuantitativos de contribuciones relativas de estos a la falla del sistema objeto de estudio, a través de dos enfoques diferentes. Ello permite que el análisis de resultados se base en la aplicación del principio de Pareto, siendo más objetiva la toma de decisiones a partir de dichos resultados.

- Realiza un análisis de importancia de causas de fallas. Si los datos de causas más probables de los modos de falla analizados están disponibles en la instalación objeto de estudio, se puede determinar cuál o cuáles son las causas de mayor contribución a la indisponibilidad del sistema o al riesgo.

- Determina los tipos de componentes que más están aportando a la criticidad, y, por tanto, los tipos de componente de mayor importancia. Esto permite conocer los tipos de componentes que más aportan al riesgo y así de esta manera poder elaborar las acciones correctivas para componentes similares (por ejemplo, bombas centrífugas accionadas por motores eléctricos, válvulas mariposa accionadas por aire, etc.).

FMEAe incluye dos métodos distintos para determinar la criticidad de los componentes-modo de fallo. Uno es el método de Modelo de Fiabilidad de Componentes, que se emplea cuando hay suficiente disponibilidad de datos o el sistema es de tipo estandarizado, en el que pueden emplearse datos genéricos o provenientes de diseños similares. El otro es la Matriz de Riesgo que es intrínsecamente semicuantitativo y se emplea cuando hay insuficiencia o carencia de datos para emplear el método antes citado. La descripción de ambas metodologías es posible hallarla en varios trabajos publicados al respecto (Castillo, 2015; Perdomo y Salomón, 2016a, 2016b; Perdomo 2016).

La característica de expandido de este método lo diferencia del FMEA tradicional en la inclusión de una serie de mejoras que acercan el carácter cualitativo de este a las bondades de los métodos cuantitativos más usados, como el FTA. Estas mejoras a la técnica se presentan como opcionales en el diagrama de flujo de la figura 1, tal como se detalla en trabajos que describen esta metodología (Perdomo y Salomón, 2016a, 2016b), pues dependen del tipo y complejidad del sistema analizado y de la disponibilidad de datos y de ellas se utilizan en este trabajo las siguientes:

- Inclusión de las fallas de causa común en el listado de componentes-modos de fallo, que participan en la evaluación de criticidad (paso 2.1, figura 1).

- Inclusión de un indicador que evalúa fiabilidad global del sistema e indicadores de los componentes-modos de fallo (parte del paso 2.3, figura 1).

Este método se ha implementado en un software denominado ASeC, y ha sido aplicado con éxito a la evaluación de la seguridad y fiabilidad de prácticas radiológicas y otras con peligros de disímiles características.

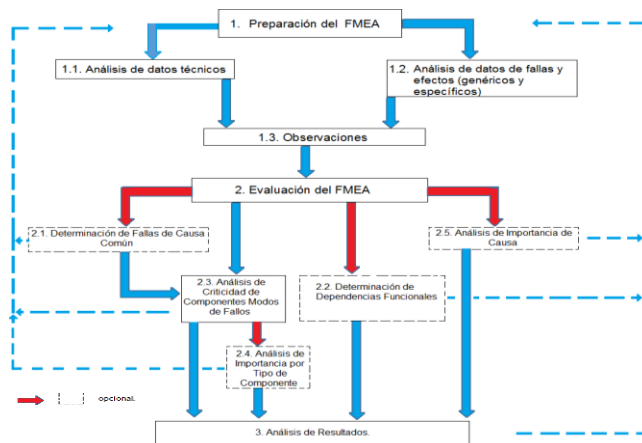


Fig. 1. Análisis detallado de sistemas mediante el método FMEAe. Diagrama de flujo del método (Perdomo y Salomón, 2016a, 2016b).

*Datos de confiabilidad cuantitativos para el FMEAe*

El esquema tecnológico propuesto para el Sistema de Enfriamiento (SE) como resultado de la evaluación del nivel de seguridad, se muestra en la figura 2.

En el régimen de operación normal el sistema de seguridad de enfriamiento se mantiene en espera. Todas las válvulas permanecen normalmente abiertas, excepto las válvulas manuales SE-V10 y SE-V20, válvulas de aislamiento del acueducto y de prueba de las dos líneas de abastecimiento de agua principales respectivamente, y las válvulas de no retorno SE-V12 y SE-V22, garantes de las descargas de las bombas hacia los rociadores.

Los datos de confiabilidad se obtienen de datos genéricos de equipos similares en la base de datos OREDA (2002), de reconocida utilidad (Campos-López, Tolentino-Eslava, Toledo-Velázquez y Tolentino-Eslava, 2019). El funcionamiento, características, modos de fallo y datos de confiabilidad de los principales componentes utilizados son mostrados en la tabla 1.

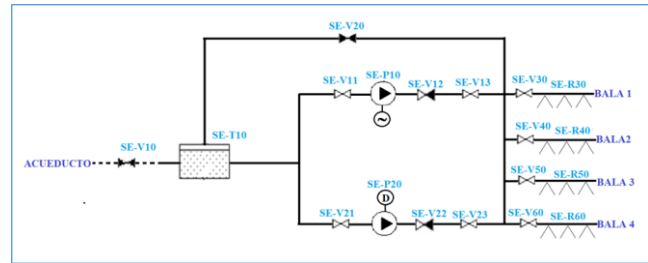


Fig. 2. Diseño del Sistema de Enfriamiento propuesto para balas de GLP (Dámara, 2018).

Tabla 1. Datos técnicos y de fiabilidad de algunos componentes típicos.

Componente (código)	Designación	Estado	Modo de falla	Denominación del equipo	Tasa de fallas
SE-V10	Aislamiento desde la fuente de abasto	Normalmente Cerrada	-No se modela	Válvula compuerta	$6.00 \times 10^{-7}$
SE-T10	Almacenamiento de agua	Lleno con nivel nominal	-Pérdida de contención	Tanque cisterna	$2.56 \times 10^{-7}$
SE-V11	Aislamiento de línea impar	Normalmente Abierta	-Fallo al mantener la posición -Error Humano tipo 1 al mantener la posición	Válvula compuerta	$6.00 \times 10^{-7}$ $1.00 \times 10^{-2}$
SE-P10	Suministrar caudal de agua a través de línea impar	En espera	-Fallo bomba al arrancar -Fallo bomba al operar tras arranque -Fallo motor al arrancar -Fallo motor al operar tras arranque	Bomba centrífuga con accionamiento eléctrico	$6.90 \times 10^{-7}$ $8.30 \times 10^{-7}$ $4.05 \times 10^{-6}$ $9.56 \times 10^{-6}$
SE-P20	Suministrar caudal de agua a través de línea par	En espera	-Fallo bomba al arrancar -Fallo bomba al operar tras	Bomba centrífuga con accionamiento diésel	$6.90 \times 10^{-7}$ $8.30 \times 10^{-7}$ $1.69 \times 10^{-5}$ $7.12 \times 10^{-6}$

			arranque -Fallo motor al arrancar -Fallo motor al operar tras arranque		
SE-V12	Evitar flujo inverso por línea impar	Normalmente Cerrada	-Fallo al abrir	Válvula de no retorno	$3.60 \times 10^{-7}$
SE-V13	Aislamiento de línea impar	Normalmente Abierta	-Fallo al mantener la posición -Error Humano tipo 1 al mantener la posición	Válvula compuerta	$6.00 \times 10^{-7}$ $1.00 \times 10^{-2}$
SE-V21	Aislamiento de línea par	Normalmente Abierta	-Fallo al mantener la posición -Error Humano tipo 1 al mantener la posición	Válvula compuerta	$6.00 \times 10^{-7}$ $1.00 \times 10^{-2}$
SE-V22	Evitar flujo inverso por línea par	Normalmente Cerrada	-Fallo al abrir	Válvula de no retorno	$3.60 \times 10^{-7}$
SE-V23	Aislamiento de línea par	Normalmente Abierta	-Fallo al mantener la posición -Error Humano tipo 1 al mantener la posición	Válvula compuerta	$6.00 \times 10^{-7}$ $1.00 \times 10^{-2}$
SE-V20	Prueba de flujo de las bombas	Normalmente Cerrada	-Fallo al cerrar -Error Humano tipo 1 al mantener la posición	Válvula compuerta	$5.09 \times 10^{-6}$ $1.00 \times 10^{-2}$
SE-V30	Aislamiento del rociador R30	Normalmente Abierta	-Fallo al mantener la posición -Fallo al	Válvula compuerta	$6.00 \times 10^{-7}$ $3.59 \times 10^{-6}$

			abrir		
SE-V40	Aislamiento del rociador R40	Normalmente Abierta	-Fallo al mantener la posición -Fallo al abrir	Válvula compuerta	$6.00 \times 10^{-7}$ $3.59 \times 10^{-6}$
SE-V50	Aislamiento del rociador R50	Normalmente Abierta	-Fallo al mantener la posición -Fallo al abrir	Válvula compuerta	$6.00 \times 10^{-7}$ $3.59 \times 10^{-6}$
SE-V60	Aislamiento del rociador R60	Normalmente Abierta	-Fallo al mantener la posición -Fallo al abrir	Válvula compuerta	$6.00 \times 10^{-7}$ $3.59 \times 10^{-6}$
SE-R30	Rociar agua	En espera	- Obstrucción por suciedad	Drenchers	$9.66 \times 10^{-7}$
SE-R40	Rociar agua	En espera	- Obstrucción por suciedad	Drenchers	$9.66 \times 10^{-7}$
SE-R50	Rociar agua	En espera	- Obstrucción por suciedad	Drenchers	$9.66 \times 10^{-7}$
SE-R60	Rociar agua	En espera	- Obstrucción por suciedad	Drenchers	$9.66 \times 10^{-7}$

a. Información obtenida de OREDA, 2002 y Novoa, 2018.

### Hipótesis del modelado

El modelo de árbol de fallas se desarrolla a partir de las características de diseño y operación del objeto de análisis y las siguientes hipótesis generales:

- Las bombas arrancan automáticamente por señal de incendio.
- El selector manual de la bomba motorizada eléctrica se encuentra seleccionado en posición AUTO (SI/AUTO/RESERVA/NO).
- El selector manual de la bomba motorizada diésel se encuentra seleccionado en posición RESERVA (SI/AUTO/RESERVA/NO).
- Para elegir la tasa de fallas de los componentes-modos de fallo, se considera que la distribución de falla es homogénea en correspondencia con la de la base de

datos consultada (OREDA, 2002).

- No se consideran las fallas de tuberías dado su bajo valor de la tasa de falla y que la presión de trabajo es suficientemente baja.

- Se consideran pruebas completamente eficientes dado que se realiza la comprobación real del caudal por las líneas correspondientes.

- Sólo se modela la parte mecánica del Sistema de Enfriamiento (no se incluyen los sistemas de apoyo como la instrumentación y control y la alimentación eléctrica).

- Se postula que las pruebas de los rociadores (limpieza) se realizan cada tres meses.

- Se postula que la duración de la prueba de los rociadores es de una hora, y se asume como tiempo de reparación de los mismos.

- Se asume que el tiempo entre pruebas de las bombas es de un mes, y este se realiza de manera escalonada con una diferencia de 10 días entre ramas redundantes.

- La válvula manual SE-V20 indisponibiliza al Sistema de Enfriamiento durante la prueba de las bombas.

- El tiempo de reparación de las válvulas manuales y de no retorno, así como de los motores, bombas y tanque cisterna se considera de 20 horas.

- La duración de la prueba de las bombas se asume que es de dos horas.

- La válvula SE-V10 de aislamiento del acueducto no se incluye en el modelo por no afectar la disponibilidad del mismo a corto y mediano plazos.

- Se asume que las válvulas manuales de aislamiento de los rociadores (drenchers) tienen candado o precinta para asegurar su posición correcta y evitar así errores humanos que dejen la misma en posición incorrecta tras una manipulación.

- Se asume que el tanque de almacenamiento de agua tiene una capacidad de 1000 m<sup>3</sup>.

- Se asume, considerando el criterio de un especialista de la Agencia de Protección Contra Incendios de Cuba, que las bombas tienen una capacidad nominal de 90 l/s (324 m<sup>3</sup>/h) y una carga aproximada de tres bar (E. Novoa, comunicación personal, 10 de noviembre de 2018).

- Se tomó un factor  $\beta$  de 0.1 para las fallas de causa

común, que representa el valor medio de los valores reportados en la literatura (OREDA, 2002).

#### *Descripción de los componentes-modos de fallo (sucesos básicos)*

En la tabla 2 se describen los sucesos básicos que son los posibles responsables de ocasionar una indisponibilidad en el sistema o de aumentar el riesgo o susceptibilidad a que falle el mismo.

Tabla 2. Descripción de los componentes-modos de fallo (sucesos básicos).

No	Sucesos Básicos	Descripción
1	LF-SE-R30-Q	Rociador SE-R30 a la espera se obstruye por suciedad
2	LF-SE-V30-D	Válvula manual normalmente abierta SE-V30 falla a mantener la posición por causas mecánicas
3	LF-SE-V30-O	Válvula manual normalmente abierta SE-V30 falla a abrir tras haber sido cerrada durante la prueba de los drenchers
4	LF-SE-R40-Q	Rociador SE-R40 a la espera se obstruye por suciedad
5	LF-SE-V40-D	Válvula manual normalmente abierta SE-V40 falla a mantener la posición por causas mecánicas
6	LF-SE-V40-O	Válvula manual normalmente abierta SE-V40 falla a abrir tras haber sido cerrada durante la prueba de los drenchers
7	LF-SE-R50-Q	Rociador SE-R50 a la espera se obstruye por suciedad
8	LF-SE-V50-D	Válvula manual normalmente abierta SE-V50 falla a mantener la posición por causas mecánicas
9	LF-SE-V50-O	Válvula manual normalmente abierta SE-V50 falla a abrir tras haber sido cerrada durante la prueba de los drenchers
10	LF-SE-R60-Q	Rociador SE-R60 a la espera se obstruye por suciedad
11	LF-SE-V60-D	Válvula manual normalmente abierta SE-V60 falla a mantener la posición por causas mecánicas
12	LF-SE-V60-O	Válvula manual normalmente abierta SE-V60 falla a abrir tras haber sido cerrada durante la prueba de los drenchers
13	H1-SE-V20-D	Error humano tipo 1 en la válvula manual SE-V20 al fallo a mantener la posición después de la prueba
14	LF-SE-V20-E	Válvula manual normalmente cerrada SE-V20 falla a cerrar después de la prueba
15	LF-SE-T10-T	Tanque de abasto de agua SE-T10 falla por rotura ante la demanda
16	LF-SE-V13-D	Válvula manual normalmente abierta SE-V13 falla a mantener la posición
17	H1-SE-V13-D	Error humano tipo 1 en la válvula manual SE-V13 al fallo de mantener la posición
18	LF-SE-V12-O	Válvula de no retorno SE-V12 falla a la apertura ante la demanda
19	CM-SE-V122-O	Falla de causa común de las válvulas de no retorno SE-V12 y SE-V22 a la apertura ante la demanda
20	LF-SE-P10-R	Bomba SE-P10 falla en operación

No	Sucesos Básicos	Descripción
21	CM- LF-SE-P10-R	Falla de causa común de las bombas SE-P10 y SE-P20 al operar
22	LF-SE-P10-S	Bomba a la espera SE-P10 falla al arranque
23	CM- LF-SE-P10-S	Falla de causa común de las bombas SE-P10 y SE-P20 al arrancar
24	LF-SE-V11-D	Válvula manual normalmente abierta SE-V11 falla a mantener la posición
25	H1-SE-V11-D	Error humano tipo 1 en la válvula manual SE-V11 al fallo de mantener la posición
26	LF-SE-V23-D	Válvula manual normalmente abierta SE-V23 falla a mantener la posición
27	H1-SE-V23-D	Error humano tipo 1 en la válvula manual SE-V23 al fallo de mantener la posición
28	LF-SE-V22-O	Válvula de no retorno SE-V22 falla a la apertura ante la demanda
29	LF-SE-P20-R	Bomba SE-P20 falla en operación
30	LF-SE-P20-S	Bomba SE-P20 a la espera falla al arranque
31	LF-SE-V21-D	Válvula manual normalmente abierta SE-V21 falla a mantener la posición
32	H1-SE-V21-D	Error humano tipo 1 en la válvula manual SE-V21 al fallo de mantener la posición
33	F-SE-AE10	Falla de alimentación eléctrica
34	LF-SE-M10-R	Motor SE-M10 falla en operación
35	F-SE-AC20	Falla de alimentación de combustible
36	LF-SE-M20-R	Motor SE-M20 falla en operación
37	LF-SE-M10-S	Motor SE-M10 falla al arranque
38	H1-SE-M10-S	Error humano tipo 1 en el motor SE-M10 al fallo de arranque
39	LF-SE-M20-S	Motor SE-M20 falla al arranque
40	H1-SE-M20-S	Error humano tipo 1 en el motor SE-M20 al fallo de arranque
41	F-SE-SEÑAL-IC-AUTO	Falla de la señal de Instrumentación y control (IC) de la automática
42	H3-SE-IC	Error humano de tipo 3 en el Sistema de Enfriamiento por Instrumentación y Control (IC)
43	F-SE-SEÑAL-IC-RES	Falla de la señal de Instrumentación y control (IC) de la reserva

6	FPE-SE-S12A	Falla Previa a la Entrada del segmento S12A del sistema SE
7	FPE-SE-S12B	Falla Previa a la Entrada del segmento S12B del sistema SE
8	FPE-SE-S12C	Falla Previa a la Entrada del segmento S12C del sistema SE
9	FPE-SE-S12D	Falla Previa a la Entrada del segmento S12D del sistema SE
10	FPS-SE-S23	Falla Previa a la Salida del segmento S23 del sistema SE
11	FLD-SE-S24	Falla Local de Derivación del segmento S24 del sistema SE
12	FPS-SE-S23A	Falla Previa a la Salida del segmento S23A del sistema SE
13	FPS-SE-S23B	Falla Previa a la Salida del segmento S23B del sistema SE
14	FPS-SE-S34	Falla Previa a la Salida del segmento S34 del sistema SE
15	FLB-SE-S23A	Falla Local de Bloqueo del segmento S12A
16	FLB-SE-S23B	Falla Local de Bloqueo del segmento S12A
17	F-SE-V13	Falla de la válvula manual V13 a mantener la posición
18	F-SE-V12	Falla de la válvula de no retorno V12 a la apertura
19	F-SE-P10	Falla de la bomba P10 ante la demanda
20	F-SE-V11	Falla de la válvula manual V11 a mantener la posición
21	F-SE-V23	Falla de la válvula manual V23 a mantener la posición
22	F-SE-V22	Falla de la válvula de no retorno V22 a la apertura
23	F-SE-P20	Falla de la bomba P20 ante la demanda
24	F-SE-V21	Falla de la válvula manual V21 a mantener la posición
25	F-SE-M10	Falla del motor M10 ante la demanda
26	F-SE-M20	Falla del motor M20 ante la demanda
27	F-SE-M10-S	Falla al arranque del motor M10 ante la demanda
28	F-SE-M20-S	Falla al arranque del motor M20 ante la demanda
29	F-SE-IC-AUTO	Falla de la Instrumentación y control (IC) de la automática ante la demanda
30	F-SE-IC-RES	Falla de la Instrumentación y control (IC) de la reserva ante la demanda

### Descripción de las compuertas

La descripción de las compuertas del árbol de fallas se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Descripción de las compuertas del árbol de fallas.

No	Compuerta	Descripción
1	F-SE	Falla el Sistema de Enfriamiento SE ante la demanda (Suceso Tope)
2	FPS-SE-S12A	Falla Previa a la Salida del segmento S12A del sistema SE
3	FPS-SE-S12B	Falla Previa a la Salida del segmento S12B del sistema SE
4	FPS-SE-S12C	Falla Previa a la Salida del segmento S12C del sistema SE
5	FPS-SE-S12D	Falla Previa a la Salida del segmento S12D del sistema SE

### Resultados y discusión

*Análisis de confiabilidad mediante el método FMEAe del sistema de enfriamiento propuesto*

El método de Análisis de Modos y Efectos de Fallo expandido se ha desarrollado con el fin de realizar evaluaciones detalladas de fiabilidad de sistemas, de cualquier grado de complejidad y clase (mecánicos, eléctricos y de instrumentación y control) enfocadas a estudios de disponibilidad, de seguridad y ambientales, con bases semi-cuantitativas (Castillo, 2015; Perdomo y Salomón, 2016a, 2016b; Perdomo, 2016).

En la figura 3 se muestran los resultados del FMEAe ordenados por Índice de Riesgo del Componente-modo

de falla (IRC) (Perdomo, 2016), teniendo en cuenta la siguiente consideración:

-Los efectos del análisis se tomarán igual a 1 o lo que es lo mismo, no se tendrán en cuenta, con el objetivo de asegurar que los resultados del FMEAe sea objetiva.

El valor promedio de los IRC del sistema, o lo que es lo mismo, Índice de Riesgo del Sistema (IRS) está dentro de la zona tolerable según la escala ponderada por el método de FMEAe, aunque presenta una incipiente degradación según la Escala Cualitativa de

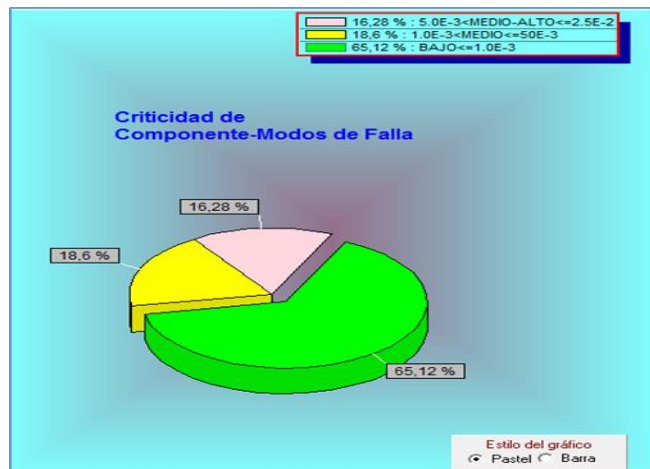


Fig. 3. Hoja de Resultados en ASeC\_FMEAe. Gráfico de Importancia por IRC.

Fiabilidad/ Riesgo ponderada por el método FMEAe (Perdomo, 2016) (figura 4). El valor calculado por el software ASEC es de  $3.04 \times 10^{-3}$ , lo que significa que, como promedio, de cada 1000 veces que es demandado el sistema, el mismo falla tres veces.



Fig. 4. Escala Cualitativa de Clasificación de Fiabilidad/Riesgo según FMEAe.

Los modos de fallos más significativos (figura 5) corresponden a los fallos locales a la apertura de las

válvulas manuales SE-V60, SE-V50, SE-V40 y SE-V30, el H1-SE-V20-D (error humano de tipo 1 en la válvula manual SE-V20 que deja la misma en posición incorrecta, después de la prueba de las bombas) y el LF-SE-V20-E (válvula manual normalmente cerrada SE-V20 falla a cerrar después de la prueba).

Método: Modelo Fiabilidad de Componentes			
No.	Componente-Modos de Fallo	IRC	IIR
1	LF-SE-V30.0	2,20E-02	7,23E+00
2	LF-SE-V40.0	2,20E-02	7,23E+00
3	LF-SE-V50.0	2,20E-02	7,23E+00
4	LF-SE-V60.0	2,20E-02	7,23E+00
5	H1-SE-V20.M	1,00E-02	3,29E+00
6	LF-SE-V20.E	9,50E-03	3,12E+00

IRS: 3,04E-03

Fig. 5. Hoja de Resultados en ASeC\_FMEAe. Ordenamiento de tabla de Resultado.

#### Análisis de sensibilidad

Los análisis de sensibilidad tienen como propósito conocer la influencia de determinado parámetro, variables o combinaciones de estas en la indisponibilidad final de los sistemas. Para que estos análisis tengan un resultado apreciable, deben realizarse a los componentes que más contribuyen a la indisponibilidad total de los sistemas, cuestión que se logra dirigiendo los estudios a los componentes más importantes, obtenidos de los análisis de importancia.

El estudio se centró fundamentalmente en los sucesos básicos H1-SE-V20-D (Error humano de tipo 1 en la válvula manual SE-V20 al fallo a mantener la posición después de la prueba de las bombas), LF-SE-V20-E (Válvula manual normalmente cerrada SE-V20 falla a cerrar después de la prueba) y en los fallos locales a la apertura durante la prueba de los rociadores de las válvulas manuales SE-V60, SE-V50, SE-V40 y SE-V30; pues los mismos tienen más del 10% de probabilidad a fallar, lo que los hace modos de fallo vitales a estudiar.

Como medida correctiva se propone que la válvula SE-V20 contenga una precinta o una cadena con candado, es decir, con cierre controlado; con el objetivo de eliminar el error humano a dejar el equipo en posición incorrecta. Esta probabilidad se tomará de  $10^{-6}$  para el nuevo modelado del Sistema de Enfriamiento, para simular la situación anterior. Por otro lado, se propone disminuir razonablemente el período de prueba de los

rociadores, que para este caso se toma una vez al mes. Otra acción significativa a realizar sería ejecutar los mantenimientos preventivos planificados de los equipos que tienen alto RAW durante las paradas planificadas de la instalación, y que estos sean supervisados por técnicos altamente capacitados (Dámara, 2018).

Si se realiza un análisis de sensibilidad de los sucesos modos de fallo más importantes, a partir del método FMEAE, poniendo en práctica las medidas correctivas señaladas anteriormente se obtiene que el Índice de Riesgo del Sistema toma un valor de  $1.20 \times 10^{-3}$  y se encuentra dentro de un rango tolerable según la escala ponderada por el método de FMEAE (Perdomo, 2016; Perdomo y Salomón 2016a). Esto significa que como promedio se espera que, de cada 1000 veces que es demandado el sistema, este falle una vez.

Los resultados obtenidos empleando el FMEAE para este estudio, se muestran en las figuras 6 y 7.



Fig. 6. Resultados obtenidos de sensibilidad en ASeC-FMEAE. Gráfico de Importancia por IRC.

Método: Modelo Fiabilidad de Componentes			
No.	Componente-Modos de Fallo	IRC	IIR
1	LF-SE-V20.E	9,50E-03	7,90E+00
2	LF-SE-V40.0	7,60E-03	6,32E+00
3	LF-SE-V50.0	7,60E-03	6,32E+00
4	LF-SE-V60.0	7,60E-03	6,32E+00
5	LF-SE-V30.0	7,60E-03	6,32E+00

IRS: 1,20E-03

Fig. 7. Resultados obtenidos de sensibilidad en ASeC\_FMEAE. Ordenamiento de tabla de Resultados.

El principal contribuyente a la falla del sistema es el suceso correspondiente al fallo local de la válvula SE-V20 a cerrar durante la prueba de las bombas con una contribución de  $9.50 \times 10^{-3}$  según el Índice de Riesgo del Componente-modo de falla. En valor le siguen el fallo local a abrir de las válvulas manuales SE-V30, SE-V40, SE-V50 y SE-V60 para la prueba de los rociadores; estos tienen una contribución de  $7.60 \times 10^{-3}$ . Esto evidencia que con el cumplimiento de las medidas correctivas propuestas se disminuye la probabilidad de fallo del sistema y la incidencia en errores humanos.

### Conclusiones

El análisis de la confiabilidad del sistema de seguridad propuesto, mediante el método Analysis of Effects and Modes of Failures expanded (FMEAE), revela que es fiable con la presencia de riesgos tolerables, según la Escala Cualitativa de Fiabilidad/ Riesgo ponderada por el método mencionado.

Se determina como uno de los resultados de los análisis, que el valor del Índice de Riesgo del Sistema es de  $3.04 \times 10^{-3}$ , o sea, que de cada 1000 veces que se demande al sistema este no debe cumplir su función, aproximadamente tres veces.

Se precisa además que los modos de fallos más significativos (figura 5) corresponden a los fallos locales a la apertura de las válvulas manuales SE-V60, SE-V50, SE-V40 y SE-V30 tras haber sido cerrada durante la prueba de los drenchers.

Se realizó un análisis de sensibilidad que permitió ver el comportamiento de los modos de fallos más significativos si se cumplen las medidas correctivas propuestas.

### Recomendaciones

Con el fin de reducir los errores humanos en el proceso, se recomienda la impartición de cursos orientados a mejorar la capacitación del personal para la realización de posteriores procedimientos, elevando en nivel de exhaustividad y rigurosidad que requieren los sistemas de seguridad en las instalaciones de gas licuado de petróleo.

### Financiamiento de la investigación

El desarrollo de esta investigación, se realiza bajo el auspicio del Centro de Ingeniería Ambiental de Camagüey, Cuba.



### Contribución de los autores

Dámara Figueredo: planeación de la investigación, conducción de la aplicación de la metodología, recopilación y procesamiento de la información, revisión documental, análisis de resultados, redacción del artículo y revisión final.

Camero López: planeación de la investigación, recopilación y procesamiento de la información, análisis de resultados, redacción del artículo y revisión final.

Dámara Martínez: planeación de la investigación, recopilación y procesamiento de la información, análisis de resultados, redacción del artículo y revisión final.

Ramos Espinosa: planeación de la investigación, recopilación y procesamiento de la información, análisis de resultados, redacción del artículo y revisión final.

### Conflictos de intereses

No existen conflictos de interés.

### Referencias

Perdomo Ojeda, M. (2016). *Métodos semicuantitativos avanzados para la seguridad y fiabilidad de la industria nuclear y otras prácticas riesgosas*. (Tesis doctoral inédita), Instituto Superior de Tecnología y Ciencias Aplicadas, La Habana, Cuba.

Verde, J. (2012). *Evaluación del riesgo asociado a la Bateria Central de Cárdenas aplicando el Método de Evaluación del Nivel de Seguridad*. (Tesis de maestría inédita), Instituto Superior de Tecnología y Ciencias Aplicadas, La Habana, Cuba.

Perdomo Ojeda, M y Salomón Llanes, J. (2016a). Análisis de modos y efectos de falla expandido: Enfoque avanzado de evaluación de fiabilidad. *Revista Cubana de Ingeniería* 7 (2), 5-14. Recuperado de <http://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/viewFile/509/pdf>

Perdomo Ojeda, M. y Salomón Llanes, J. (2016b). *Manual del usuario del código ASeC versión 1.2*.

Castillo, O. (2015). *Evaluación detallada de la fiabilidad del sistema de ventilación del Centro de Isótopos mediante el método FMEAe*. (Tesis de maestría inédita), Instituto Superior de Tecnología y Ciencias Aplicadas, La Habana, Cuba.

OREDA. (2002). *OREDA. Offshore Reliability Data Handbook 4th Edition*, SINTEF-OREDA: Trondheim, Norway.

Campos-López, O., Tolentino-Eslava, G., Toledo-Velázquez, M. y Tolentino-Eslava, R. (2019). Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, base de datos y criticidad de efectos. *Científica* 23 (1), 51-59. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61458265006>

Dámara Figueredo, A. (2018). *Evaluación Integral del Nivel de Seguridad de la UEB Depósito GLP Camagüey*. (Tesis de pregrado inédita), Instituto Superior de Tecnología y Ciencias Aplicadas, La Habana, Cuba.