

# Problemas resueltos de análisis de riesgos en instalaciones industriales

Elena Mulet Escrig  
Mar Carlos Alberola  
Vicente Chulvi Ramos  
Juan E. Ramos Barceló  
M.<sup>a</sup> Dolores Bovea Edo

# Problemas resueltos de análisis de riesgos en instalaciones industriales

Elena Mulet Escrig  
Mar Carlos Alberola  
Vicente Chulvi Ramos  
Juan E. Ramos Barceló  
M.<sup>a</sup> Dolores Bovea Edo



**U**NIVERSITAT  
**J**AUME • I

DEPARTAMENT D'ENGINYERIA MECÀNICA  
I DE CONSTRUCCIÓ

■ Codi d'assignatura 369

Edita: Publicacions de la Universitat Jaume I. Servei de Comunicació i Publicacions  
Campus del Riu Sec. Edifici Rectorat i Serveis Centrals. 12071 Castelló de la Plana  
<http://www.tenda.uji.es> e-mail: [publicacions@uji.es](mailto:publicacions@uji.es)

Col·lecció Sapientia, 45  
Primera edició, 2011  
[www.sapientia.uji.es](http://www.sapientia.uji.es)

ISBN: 978-84-693-7379-8



Aquest text està subjecte a una llicència Reconeixement-NoComercial-CompartirIgual de Creative Commons, que permet copiar, distribuir i comunicar públicament l'obra sempre que especifique l'autor i el nom de la publicació i sense objectius comercials, i també permet crear obres derivades, sempre que siguin distribuïdes amb aquesta mateixa llicència.  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/es/deed.ca>

# PRÓLOGO

Esta publicación recopila diversos casos prácticos de análisis de riesgo en instalaciones industriales, transportes e incluso de algún producto industrial, con el objeto de ofrecer una colección de ejercicios resueltos aplicando de forma completa y exhaustiva algunas de las metodologías de análisis de riesgos más importantes. La mayoría de los casos prácticos se refieren a sistemas en los que se manejan sustancias con algún grado de inflamabilidad, toxicidad o peligrosidad. La aplicación de métodos de análisis de riesgos está orientada tanto a la disminución de la probabilidad de ocurrencia de accidentes peligrosos, tales como incendios y explosiones, como a la mejora del funcionamiento.

El libro se estructura en seis bloques, un primer bloque introductorio seguido de otros cuatro estructurados de forma que cada uno contiene una breve descripción teórica seguida de los casos que han sido resueltos con una misma metodología de análisis de riesgos; el segundo bloque contiene los casos prácticos resueltos mediante el método de análisis de peligros y operatividad (HAZOP); el tercer bloque contiene los casos resueltos mediante el análisis modal de fallos y efectos con criticidad (AMFEC); el cuarto bloque, contiene los casos resueltos con el análisis del árbol de fallos (AF) y el quinto bloque los casos resueltos mediante el árbol de sucesos (AS). Finalmente se muestra una comparativa de los métodos de análisis de riesgos aplicados en los casos prácticos.

Dado que el objeto de esta publicación es facilitar el aprendizaje de los métodos de análisis de riesgos a través de ejercicios resueltos, los valores de probabilidad de fallo aplicados no se corresponden con valores reales de alguna instalación concreta, sino que se han estimado a partir de bases de datos de fallos como el RiAC Automated Data Book, publicado por el Reliability Information Analysis Center, o a partir de los datos disponibles en la bibliografía, o bien por estimación de la autoría.

Esperamos que esta colección sea una ayuda directa para todos los estudiantes de materias relacionadas con el análisis de riesgos, siempre utilizado como material complementario a una monografía teórica sobre análisis de riesgos, así como para otros profesores que imparten asignaturas sobre análisis de riesgos en instalaciones industriales.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores queremos expresar nuestro agradecimiento a Cristina Cantero, quien se ha encargado de los diagramas y esquemas que ilustran los casos, así como del maquetado del libro. También agradecemos las ayudas directas recibidas de Belinda López Mesa y de Sara Romero. A la Unitat de Suport Educatiu de la Universitat Jaume I, quien ha apoyado la iniciativa de realizar esta publicación. A nuestros compañeros Antonio y Paco, del Área de Proyectos de Ingeniería de la Universitat Jaume I y a Joaquín Navarro. También, cómo no, a nuestro alumnado, con quien hemos compartido la mayoría de los casos que aquí se presentan, y cuyos comentarios, críticas y sugerencias nos enriquecen día a día.

Los autores y las autoras

# ÍNDICE GENERAL

PRÓLOGO .....	3
AGRADECIMIENTOS .....	4
1. INTRODUCCIÓN TEÓRICA .....	6
2. MÉTODO HAZOP .....	8
2.1. Descripción teórica.....	8
2.2. Caso 1: HAZOP gasolinera.....	11
2.3. Caso 2: HAZOP radiadores.....	23
3. MÉTODO AMFE.....	32
3.1. Descripción teórica.....	32
3.2. Caso 1: AMFE gasolinera.....	39
3.3. Caso 2: AMFE embotelladora .....	52
3.4. Caso 3: AMFE panel de calefacción .....	62
3.5. Caso 4: AMFE calefacción con placas solares .....	75
4. MÉTODO DEL ÁRBOL DE FALLOS .....	90
4.1. Descripción teórica.....	90
4.2. Caso 1: AF embotelladora.....	96
4.3. Caso 2: AF depósito disolvente.....	106
4.4. Caso 3: AF cafetera .....	114
4.5. Caso 4: AF planta de residuos sólidos urbanos.....	119
4.6. Caso 5: AF refinería de azúcar .....	128
5. MÉTODO DEL ÁRBOL DE SUCESOS.....	137
5.1. Descripción teórica.....	137
5.2. Caso 1: AS depósito disolvente.....	141
5.3. Caso 2: AS fuga de butadieno .....	148
5.4. Caso 3: AS gasolinera .....	156
6. COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS .....	164
7. BIBLIOGRAFÍA.....	165

# 1. INTRODUCCIÓN TEÓRICA

El objetivo del análisis de riesgos es aumentar tanto la seguridad como el servicio y rendimiento de un sistema, disminuyendo la frecuencia de los accidentes y aumentando así la disponibilidad del sistema.

El análisis de riesgos se aplica tanto al diseño de una nueva instalación o producto como a cualquier modificación de estos y a su construcción o reparación. Existen varios grados de análisis de riesgos según la complejidad y alcance del mismo, si bien, de forma general, las fases de un análisis de riesgos son las que se resumen en la figura 1.1. y consisten en:

- La identificación del riesgo.
- El análisis de las consecuencias y daños.
- La cuantificación del riesgo como producto de la frecuencia del riesgo y los daños producidos.

Los problemas resueltos contenidos en este libro se centran en la fase de identificación y cuantificación de la frecuencia de los riesgos. Para cada fase existen diversos métodos y técnicas a aplicar, que se mencionan en la siguiente figura.

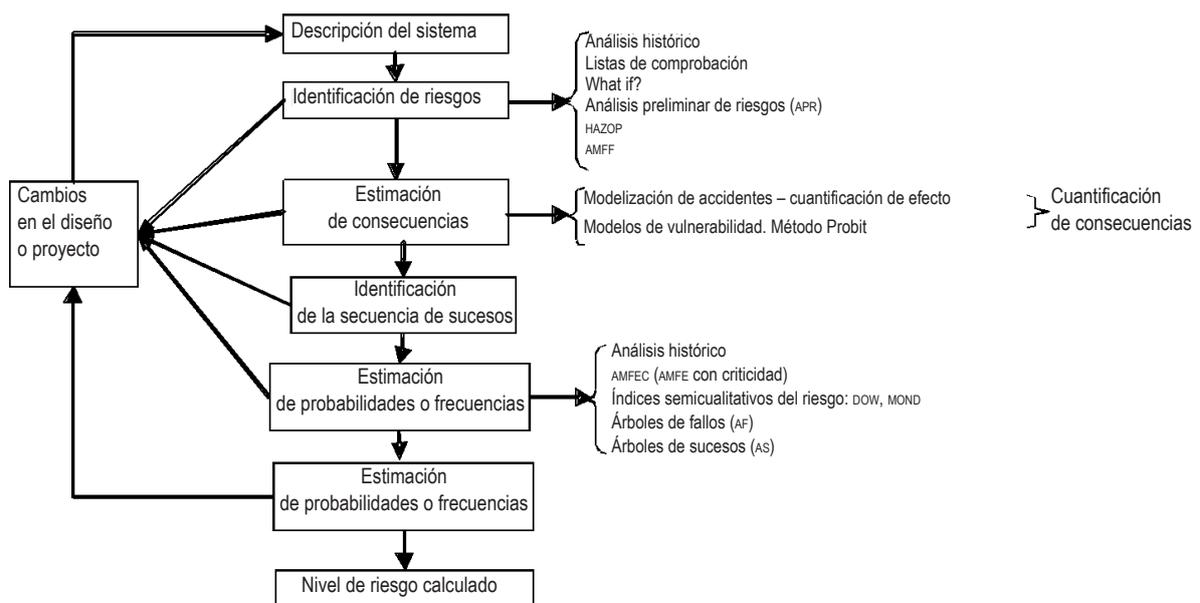


Figura 1.1. Esquema del análisis de riesgos

En función de las necesidades de cada caso, el análisis de riesgos que se deberá aplicar podrá ser más o menos completo. Cuanta mayor necesidad haya de reducir la probabilidad de fallo, por la magnitud de las consecuencias de este, mayor alcance tendrá el análisis y menor será el margen de error. Existen varios grados de análisis de riesgos según la complejidad y alcance del mismo:

- Identificación cualitativa simple.
- Aplicación de índices de riesgos muy elementales, poco precisos, pero para los que ya se requiere alguna estimación de consecuencias y frecuencias.
- Análisis de riesgos semicuantitativos en los que se estiman con amplio margen de error consecuencias y frecuencias de ocurrencia.
- Análisis de riesgos completos o cuantitativos, donde se aplica algún método de análisis cualitativo seguido por un estudio cuantitativo de cada riesgo. Por ejemplo, aplicando los métodos de árboles de fallos y árboles de sucesos.

Este libro presenta diversos casos prácticos, en los que se aplican los métodos HAZOP, AMFEC, análisis del árbol de fallos (AF) y árbol de sucesos (AS). Sobre este asunto pueden consultarse la monografía *Análisis del riesgo en instalaciones industriales* o la *Guía técnica: metodología para el análisis de riesgos, visión general*.

## 2. MÉTODO HAZOP

### 2.1. Descripción teórica

El análisis de peligros y operabilidad (*HAZard and OPerability analysis*, HAZOP) conocido también como *análisis funcional de operabilidad* (AFO), fue diseñado inicialmente en Inglaterra en la década de los setenta por la compañía Imperial Chemical Industries (ICI) para aplicarlo al diseño de plantas de fabricación de pesticidas.

El HAZOP es una técnica de identificación de riesgos inductiva basada en la premisa de que los accidentes se producen como consecuencia de una desviación de las variables de proceso con respecto de los parámetros normales de operación. La técnica se fundamenta en el hecho de que las desviaciones en el funcionamiento de las condiciones normales de operación y diseño suelen conducir a un fallo del sistema, y consiste en analizar sistemáticamente las causas y las consecuencias de unas desviaciones de las variables de proceso, planteadas a través de unas palabras guía.

La metodología del análisis comprende las siguientes etapas:

- 1) *Descripción de la instalación. Se describen los elementos de la instalación y su funcionamiento*
- 2) *Definición del objetivo y alcance. Consiste en delimitar las áreas del sistema a las cuales se aplica la técnica*
- 3) *Definición de los elementos críticos o nodos de estudio*

En cada área seleccionada se identificarán una serie de nodos o puntos claramente localizados en el proceso. Ejemplos de nodos pueden ser: la tubería de alimentación de una materia prima, la altura de impulsión de una bomba, la superficie de un depósito, etc. La técnica HAZOP se aplica a cada uno de estos puntos. Cada nodo vendrá caracterizado por unos valores deter-

minados de las variables de proceso: presión, temperatura, caudal, nivel, composición, viscosidad, etc. Los criterios para seleccionar los nodos tomarán, básicamente, en consideración, los puntos del proceso en los cuales se produzca una variación significativa de alguna de las variables del proceso.

4) *Definición de las desviaciones para cada una de las variables de proceso, a partir de las palabras guía*

El HAZOP consiste en una aplicación exhaustiva de todas las combinaciones posibles entre palabra guía y variable de proceso, descartándose durante la sesión aquellas combinaciones que no tengan sentido para un nodo determinado. La siguiente tabla muestra un ejemplo de palabras guía, aunque no son únicas.

Palabra guía	Significado	Parámetro de proceso	Ejemplo de desviación	Ejemplo de causa
NO	No se consiguen las intenciones previstas en el sistema	Temperatura Presión Nivel Reacción Composición	No hay flujo en una línea	Fallo de bomba, válvula cerrada, fuga, conducto de aspiración en vacío, obstrucción por sedimentos, etc.
MÁS / MENOS	Aumentos/disminuciones cuantitativas sobre la intención del sistema	Caudal Velocidad Tiempo Viscosidad	Más flujo	Válvula atascada abierta, lectura de flujómetro incorrecta
ADEMÁS DE	Aumento cualitativo. Se consiguen las intenciones del sistema y ocurre algo más	Mezcla Voltaje Adición Separación PH	El vapor consigue calentar el reactor, pero además, provoca aumento de temperatura en otros elementos	Suciedad en intercambiador, fallo regulador de temperatura, etc.
PARTE DE	Disminución cualitativa. Sólo parte de los hechos transcurren según lo previsto	Composición Mezcla Concentración	La composición del fluido de entrada es diferente de la prevista	Entrada de contaminantes, productos de corrosión, fallos de aislamientos
INVERSIÓN	Se obtiene el efecto contrario al deseado	Caudal Presión Composición	El flujo transcurre en sentido inverso; tiene lugar la reacción inversa	Bomba invertida, comunicación con sobrepresión, fallo de válvula antiretroceso, etc.
EN VEZ DE	No se obtiene el efecto deseado. En su lugar ocurre algo completamente distinto	Frecuencia Material Reacción Tiempo	Cambio de catalizador, fallo en el modo de operación prevista, parada imprevista, etc.	

Tabla 2.1. Ejemplo de palabras guía

5) *Identificar posibles causas de cada desviación*

Para cada desviación, se enumeran las posibles causas.

6) *Establecer las consecuencias posibles de la desviación y analizar cuál de las alternativas siguientes es aplicable al caso*

- Las consecuencias no entrañan riesgo: descartar esta desviación
- Las consecuencias entrañan riesgos menores o medianos: consideración de esta desviación en el siguiente paso.
- Las consecuencias entrañan riesgos mayores: consideración en el siguiente paso y envío para su análisis mediante un método más detallado y/o cuantitativo.

7) *Determinar medidas correctoras que eviten o palién las causas de las desviaciones*

Por último, se indicarán posibles medidas correctoras para cada una de las desviaciones. El resultado de un análisis HAZOP se presenta en un formato de tabla según se muestra en la siguiente tabla.

Sistema:			Fecha:		
Localización del nodo:			Realizado por:		
Variable	Palabra guía	Desviación	Causas posibles	Consecuencias posibles	Medidas correctoras

Tabla 2.2. Formato del HAZOP

## 2.2. Caso 1: HAZOP gasolinera

### 1) Descripción de la instalación

En el presente caso se analiza una gasolinera, donde se combinan los sucesos de descarga de combustible líquido desde un camión cisterna y el suministro de combustible a través de los surtidores, tal y como muestran los esquemas de las figuras 2.1 y 2.2. El camión cisterna se compone de:

- Cisterna, dividida en cuatro compartimentos (uno para cada tipo de combustible). Su función es la de contener el producto. Debe estar fabricada para aguantar presiones interiores y evitar fugas. Dispone de un sistema de ventilación de emergencia mediante una válvula de accionamiento por sobrepresión.
- Bocas de carga y descarga, una por compartimento. Cada boca de descarga está dotada de su correspondiente válvula de descarga (llave de corte) y manguera. Una bomba se encarga de la carga y descarga.
- Identificador de nivel: sonda para medir el nivel del líquido contenido en cada compartimento.
- Un recuperador de gases.
- Una toma de tierra.

En el proceso de descarga intervienen los siguientes elementos:

- Tubería flexible (manguera): comunica la boca de descarga de la cisterna con el punto de carga del depósito de la gasolinera.
- Boca de carga de la gasolinera: punto en el que el camión se conecta al depósito de la gasolinera. su cierre debe asegurar una conexión segura y, además, la estanqueidad frente a los vapores.
- Válvula del depósito: permite el paso de combustible al depósito e impide el retroceso del mismo.
- Válvula de seguridad: su función es la de evacuar combustible del depósito en caso de sobrepresión.

La zona de descarga contiene:

- Pararrayos
- Compresor
- Cuadro eléctrico
- Depósitos para cada tipo de combustible
- Red de venteo

La zona de repostaje está formada por:

- Surtidor multiproducto
- Tuberías, una por depósito, a la llave de corte correspondiente del surtidor

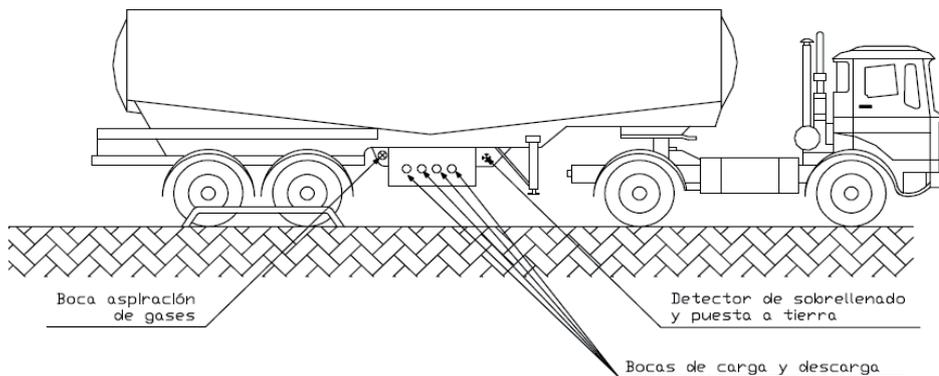


Figura 2.1. Esquema del camión

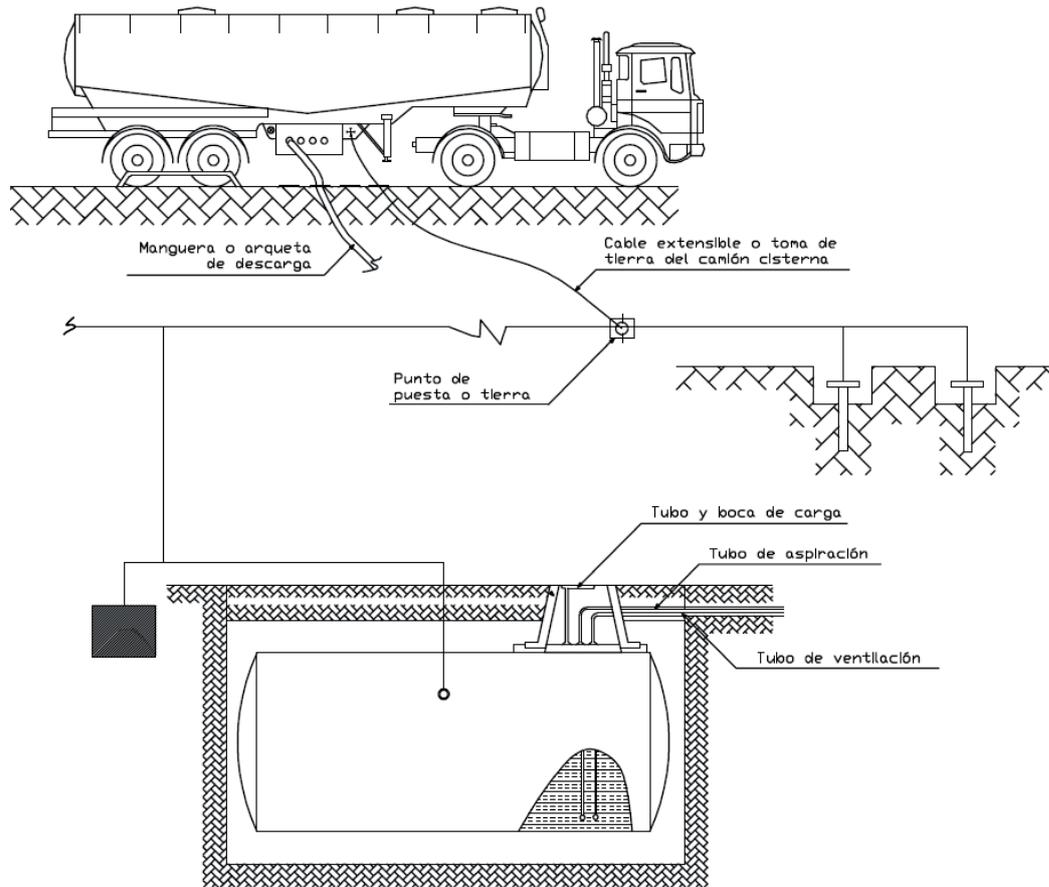


Figura 2.2. Esquema del proceso de llenado del depósito

El proceso de descarga sigue los siguientes pasos: el operario conecta la toma de tierra del camión a la línea de la gasolinera para evitar chispas por cargas electrostáticas. La línea de la gasolinera, que suministra corriente al cuadro eléctrico, está a su vez conectada a un pararrayos. A continuación, el operario conecta la manguera a la boca de carga y descarga del camión correspondiente al tipo de combustible a trasegar, y el otro extremo a la boca de carga del depósito de la gasolinera correspondiente. La boca de aspiración del recuperador de gases se conecta a la red de venteo del depósito para evitar que los vapores generados en el depósito durante la descarga salgan a la atmósfera. Ahora el operario puede activar la válvula (llave de corte) correspondiente del camión para permitir la salida del combustible y la bomba (compresor), que ayuda al trasego del mismo. Del depósito salen las tuberías (una por producto) hacia el surtidor de gasolina.

## 2) Definición del objetivo y alcance

Se pide identificar los peligros utilizando la metodología HAZOP para los posibles accidentes derivados de una desviación de las variables de proceso con respecto a los parámetros normales de operación en la instalación anteriormente citada.

## 3) Definición de los elementos críticos o nodos de estudio

N.º	Denominación	N.º	Denominación
1	Boca de carga y descarga del compartimento de gasolina 95	13	Depósito de gasóleo B
2	Boca de carga y descarga del compartimento de gasolina 98	14	Red de venteo
3	Boca de carga y descarga del compartimento de gasóleo A	15	Tubería del depósito a la llave de corte del surtidor de gasolina 95
4	Boca de carga y descarga del compartimento de gasóleo B	16	Tubería del depósito a la llave de corte del surtidor de gasolina 98
5	Llave de corte de la toma del compartimento de gasolina 95	17	Tubería del depósito a la llave de corte del surtidor de gasóleo A
6	Llave de corte de la toma del compartimento de gasolina 98	18	Tubería del depósito a la llave de corte de la toma de gasóleo B
7	Llave de corte de la toma del compartimento de gasóleo A	19	Surtidor multiproducto con los respectivos boquereles
8	Llave de corte de la toma del compartimento de gasóleo B	20	Cuadro eléctrico
9	Recuperador de gases	21	Compresor
10	Depósito de gasolina 95	22	Pararrayos
11	Depósito de gasolina 98	23	Toma de tierra
12	Depósito de gasóleo A		

Tabla 2.3. Identificación de nodos

## 4) Definición de las desviaciones para cada una de las variables de proceso, a partir de las palabras guía

Nodo(s)	Variable	Palabra guía	Desviación
1, 2, 3, 4	Estanqueidad	NO	Cae combustible fuera
	Paso libre		Sobrepresión en la manguera
	Conexión		Derrame
1, 2, 3, 4	Producto	OTRO	Mezcla de productos
5, 6, 7, 8	Cierre	NO	No se puede parar el paso de caudal
	Actuación		Pasa caudal cuando no debe o no pasa cuando debe
5, 6, 7, 8	Cierra	MÁS	Válvula fuera de funcionamiento Rotura de válvula
9	Estanqueidad	NO	Grietas en la conducción o juntas en mal estado

Nodo(s)	Variable	Palabra guía	Desviación
9	Presión	MÁS	No llegan los gases; el recipiente no resiste
	Temperatura		Se alcanza el FP del gas y por ello se genera un punto de ignición
10, 11, 12, 13	Estanqueidad	NO	El depósito tiene fugas
10, 11, 12, 13	Nivel	MÁS	Rebose
	Presión		El depósito no resiste
	Temperatura		Aumenta la temperatura del producto y, por tanto, aumenta la presión
14	Libre paso	NO	Falta de control de presión; variación de presión
	Ausencia de grietas		Aberturas en la conducción
15, 16, 17, 18	Conservación	NO	Derrame
19	Estanco	NO	Abertura
	Parada		Sigue suministrando producto después del llenado
20	Intensidad	MÁS	Fallo de aislamiento
	Tensión		
	Temperatura		
21	Velocidad	MÁS	Bloqueo o fallo del rodete
	Presión		Parada del motor Obturación del compresor
22	Conductividad eléctrica	NO	Rotura de la toma de tierra del pararrayos; corrosión
23	Conductividad eléctrica	NO	Corrosión; rotura

Tabla 2.4. Definición de desviaciones

### 5) Identificar posibles causas de cada desviación

Nodo(s)	Desviación	Causas posibles
1, 2, 3, 4	Cae combustible fuera	Golpe o desgaste de la junta de la boca de carga y descarga
	Sobrepresión en la manguera	Falta de limpieza de los elementos asociados al trasvase de combustible
	Derrame	Ineficiencia del operario al conectar; desgaste/oxidación de la conexión sin percibir por el operario al conectar
1, 2, 3, 4	Mezcla de productos	Error humano
5, 6, 7, 8	No se puede parar el paso de caudal	Golpe; no revisión por el operario; fallo de estanqueidad
	Pasa caudal cuando no debe o no pasa cuando debe	Error humano
5, 6, 7, 8	Válvula fuera de funcionamiento	Error humano
	Rotura de válvula	Desgaste de elementos; mantenimiento ineficiente

Nodo(s)	Desviación	Causas posibles
9	Grietas en la conducción o juntas en mal estado	Golpe; envejecimiento de la conducción; corrosión; mantenimiento ineficiente
9	No llegan los gases; el recipiente no resiste	Obstrucción de la conducción
	Se alcanza el FP del gas y por ello se genera un punto de ignición	Existencia de un foco de calor
10, 11, 12, 13	El depósito tiene fugas	Impacto; corrosión y grietas; mantenimiento ineficiente
10, 11, 12, 13	Rebose	Ineficiente control del nivel
	El depósito no resiste	Error humano: se supera la capacidad máxima
	Aumenta la temperatura del producto y, por tanto, aumenta la presión	Existencia de un foco de calor
14	Falta de control de presión; variación de presión	Obstrucciones en conducto
	Aberturas en la conducción	Material desgastado o corrosión
15, 16, 17, 18	Derrame	Desgaste de elementos; mantenimiento ineficiente
19	Abertura	Golpe, desgaste; deterioro de la manguera por envejecimiento
	Sigue suministrando producto después del llenado	Fallo humano; fallo del sistema automático de parada por depósito lleno
20	Fallo de aislamiento	Sobrecarga eléctrica
		Exceso de temperatura por un foco de calor
21	Bloqueo o fallo del rodete	Mal mantenimiento
	Parada del motor	
	Obturación de compresor	
22	Rotura de la toma de tierra del pararrayos; corrosión	Envejecimiento y mal mantenimiento
23	Corrosión; rotura	Mal mantenimiento o rotura por acción de roedores

Tabla 2.5. Definición de causas

6) *Establecer las consecuencias posibles de la desviación y analizar cuál de las siguientes alternativas es aplicable al caso*

- Las consecuencias no entrañan riesgo: descartar esta desviación.
- Las consecuencias entrañan riesgos menores o medianos: consideración de esta desviación en el siguiente paso.
- Las consecuencias entrañan riesgos mayores: consideración en el siguiente paso y envío para su análisis mediante un método más detallado y/o cuantitativo.

Nodo(s)	Causas posibles	Consecuencias posibles
1, 2, 3, 4	Golpe o desgaste de la junta de la boca de carga y descarga	Derrame de combustible
	Falta de limpieza de los elementos asociados al trasvase de combustible	Reventón
	Ineficiencia del operario al conectar; esgaste/oxidación de la conexión sin percibir por el operario al conectar	Derrame del combustible
1, 2, 3, 4	Error humano	No hay pureza del combustible
5, 6, 7, 8	Golpe; no revisión por el operario; fallo de estanqueidad	Derrame
	Error humano	Falta de suministro o derrame
5, 6, 7, 8,	Error humano	No sale todo el producto
	Desgaste de elementos; mantenimiento ineficiente	No se puede accionar
9	Golpe; envejecimiento de la conducción; corrosión; mantenimiento ineficiente	Fuga de gases
9	Obstrucción de la conducción	Reventón
	Existencia de un foco de calor	Reventón; BLEVE <sup>1</sup>
10, 11, 12, 13	Impacto; corrosión y grietas; mantenimiento ineficiente	Derrames o fugas enterradas
10, 11, 12, 13	Ineficiente control del nivel	Derrames o fugas enterradas
	Error humano: se supera la capacidad máxima	Reventón
	Existencia de un foco de calor	BLEVE
14	Obstrucciones en conducto	Dificultad de aspiración en el surtidor
	Material desgastado o corrosión	Entrada de tierra en el depósito, pérdida de volumen útil
15, 16, 17, 18	Desgaste de elementos; mantenimiento ineficiente	Derrame
19	Golpe, desgaste; deterioro de la manguera por envejecimiento	Derrame
	Fallo humano; fallo del sistema automático de parada por depósito lleno	Derrame
20	Sobrecarga eléctrica	Cortocircuito y creación de un punto de ignición
	Exceso de temperatura por un foco de calor	
21	Mal mantenimiento	Queda fuera de servicio la instalación de aire
22	Envejecimiento y mal mantenimiento	Más puntos de ignición posibles
23	Mal mantenimiento o rotura por acción de roedores	Más puntos de ignición potenciales

Tabla 2.1. Definición de consecuencias

<sup>1</sup> BLEVE: *boiling liquid expanding vapor explosion*.

7) *Determinar medidas correctoras que eviten o pallien las causas de las desviaciones*

Nodo(s)	Consecuencias posibles	Comentarios y medidas correctoras
1, 2, 3, 4	Derrame del combustible	Limitar acceso a la zona de descarga
	Reventón	Mejorar mantenimiento
	Derrame del combustible	Mejorar mantenimiento; formación
1, 2, 3, 4	No hay pureza del combustible	Conexiones de manguera <i>poka-yoke</i> <sup>2</sup>
5, 6, 7, 8	Derrame	Limitar acceso a la zona de descarga
	Falta de suministro o derrame	Formación
5, 6, 7, 8,	No sale todo el producto	Formación
	No se puede accionar	Mejorar mantenimiento
9	Fuga de gases	Mejorar mantenimiento
9	Reventón	Mejorar mantenimiento
	Reventón; BLEVE	Eliminar los posibles focos de calor de la zona; plan de prevención
10, 11, 12, 13	Derrames o fugas enterradas	Mejorar mantenimiento
10, 11, 12, 13	Derrames o fugas enterradas	Formación; avisador acústico de nivel
	Reventón	Avisador acústico de nivel
	BLEVE	Eliminar los posibles focos de calor de la zona; plan de prevención
14	Dificultad de aspiración en el surtidor	Mejorar mantenimiento
	Entrada de tierra en el depósito, pérdida de volumen útil	Mejorar mantenimiento
15, 16, 17, 18	Derrame	Mejorar mantenimiento
19	Derrame	Mejorar mantenimiento; topes de proximidad para vehículos
	Derrame	Mejorar mantenimiento; avisador acústico de llenado
20	Cortocircuito y creación de un punto de ignición	Mejorar mantenimiento. Eliminar los posibles focos de calor de la zona; plan de prevención
21	Queda fuera de servicio la instalación de aire	Mejorar mantenimiento
22	Más puntos de ignición posibles	Mejorar mantenimiento
23	Más puntos de ignición potenciales	Mejorar mantenimiento

Tabla 2.7. Medidas correctoras

<sup>2</sup> *Poka-yoke*: técnica de diseño para una fabricación a prueba de errores.

Nodo(s)	Variable	Palabra guía	Desviación	Causas posibles	Consecuencias posibles	Comentarios y medidas correctoras
1, 2, 3, 4	Estanqueidad		Cae combustible fuera	Golpe o desgaste de la junta de la boca de carga y descarga	Derrame de combustible	Limitar acceso a la zona de descarga
	Paso libre	NO	Sobrepresión en la manguera	Falta de limpieza de los elementos asociados al travase de combustible	Reventón	Mejorar mantenimiento
1, 2, 3, 4	Conexión		Derrame	Ineficiencia del operario al conectar; desgaste/oxidación de la conexión sin percibir por el operario al conectar	Derrame del combustible	Mejorar mantenimiento; formación
			Producto	OTRO	Mezcla de productos	Error humano
5, 6, 7, 8	Cierre		No se puede parar el paso de caudal	Golpe; no revisión por el operario; fallo de estanqueidad	Derrame	Limitar acceso a la zona de descarga
	Actuación	NO	Pasa caudal cuando no debe o no pasa cuando debe	Error humano	Falta de suministro o derrame	Formación
5, 6, 7, 8	Cierra	MÁS	Valvula fuera de funcionamiento	Error humano	No sale todo el producto	Formación
			Rotura de válvula	Desgaste de elementos; mantenimiento ineficiente	No se puede accionar	Mejorar mantenimiento
9	Estanqueidad	NO	Grietas en la conducción o juntas en mal estado	Golpe; envejecimiento de la conducción; corrosión; mantenimiento ineficiente	Fuga de gases	Mejorar mantenimiento
	Presión		No llegan los gases; recipiente no resiste	Obstrucción de la conducción	Reventón	Mejorar mantenimiento
9	Temperatura	MÁS	Se alcanza el PP del gas y por ello se genera un punto de ignición	Existencia de un foco de calor	Reventón; BLEVE	Eliminar los posibles focos de calor de la zona; plan de prevención
			Estanqueidad	NO	El depósito tiene fugas	Impacto; corrosión y grietas; mantenimiento ineficiente

Nodo(s)	Variable	Palabra guía	Desviación	Causas posibles	Consecuencias posibles	Comentarios y medidas correctoras
10, 11, 12, 13	Nivel		Rebose	- ineficiente control del nivel	Derrames o fugas enterradas	Formación; avisador acústico de nivel
	Presión	MÁS	El depósito no resiste	- error humano: se supera la capacidad máxima	Reventón	Avisador acústico de nivel
	Temperatura		Aumenta la temperatura del producto y, por tanto, aumenta la presión	Existencia de un foco de calor	BLEVE	Eliminar los posibles focos de calor de la zona; plan de prevención
14	Libre paso	NO	Falta de control de presión; variación de presión	Obstrucciones en conducto	Dificultad de aspiración en el surtidor	Mejorar mantenimiento
	Ausencia de grietas		Oberturas en la conducción	Material desgastado o corrosión	Entrada de tierra en el depósito, pérdida de volumen útil	Mejorar mantenimiento
15, 16, 17, 18	Conservación	NO	Derrame	Desgaste de elementos; mantenimiento ineficiente	Derrame	Mejorar mantenimiento
19	Estanco		Obertura	Golpe, desgaste; deterioro de la manguera por envejecimiento	Derrame	Mejorar mantenimiento; topos de proximidad para vehículos
	Parada	NO	Sigue suministrando producto después del llenado	Fallo humano; fallo del sistema automático de parada por depósito lleno	Derrame	Mejorar mantenimiento; avisador acústico de llenado
20	Intensidad		Fallo de aislamiento	Sobrecarga eléctrica	Cortocircuito y creación de un punto de ignición	Mejorar mantenimiento
	Tensión	MÁS	Fallo de aislamiento	Sobrecarga eléctrica	Cortocircuito y creación de un punto de ignición	Mejorar mantenimiento
	Temperatura		Fallo de aislamiento	Exceso de temperatura por un foco de calor	Cortocircuito y creación de un punto de ignición	Eliminar los posibles focos de calor de la zona; plan de prevención.

Nodo(s)	Variable	Palabra guía	Desviación	Causas posibles	Consecuencias posibles	Comentarios y medidas correctoras
21	Velocidad	MÁS	Bloqueo o fallo del rodete	Mal mantenimiento	Queda fuera de servicio la instalación de aire	Mejorar mantenimiento
	Presión		Parada del motor Obturación de compresor	Mal mantenimiento	Queda fuera de servicio la instalación de aire	Mejorar mantenimiento
22	Conductividad eléctrica	NO	- rotura de la toma de tierra del pararrayos; corrosión	Envejecimiento y mal mantenimiento	Más puntos de ignición posibles	Mejorar mantenimiento
23	Conductividad eléctrica	NO	- corrosión; rotura	Mal mantenimiento o rotura por acción de roedores	Más puntos de ignición potenciales	Mejorar mantenimiento

Tabla 2.8: Tabla informe final (BLEVE: *boiling liquid expanding vapor explosion*, *poka-yoke*: diseño a prueba de errores)

## 8) Esquema de la instalación mejorada

Considerando las medidas correctoras propuestas, el esquema final de la instalación mejorada queda del modo representado en el siguiente esquema, donde se ve que se ha optado por añadir conexiones *poka-yoke* a las mangueras, un indicador acústico de llenado en el depósito y otro en el surtidor, y topes de proximidad para vehículos.

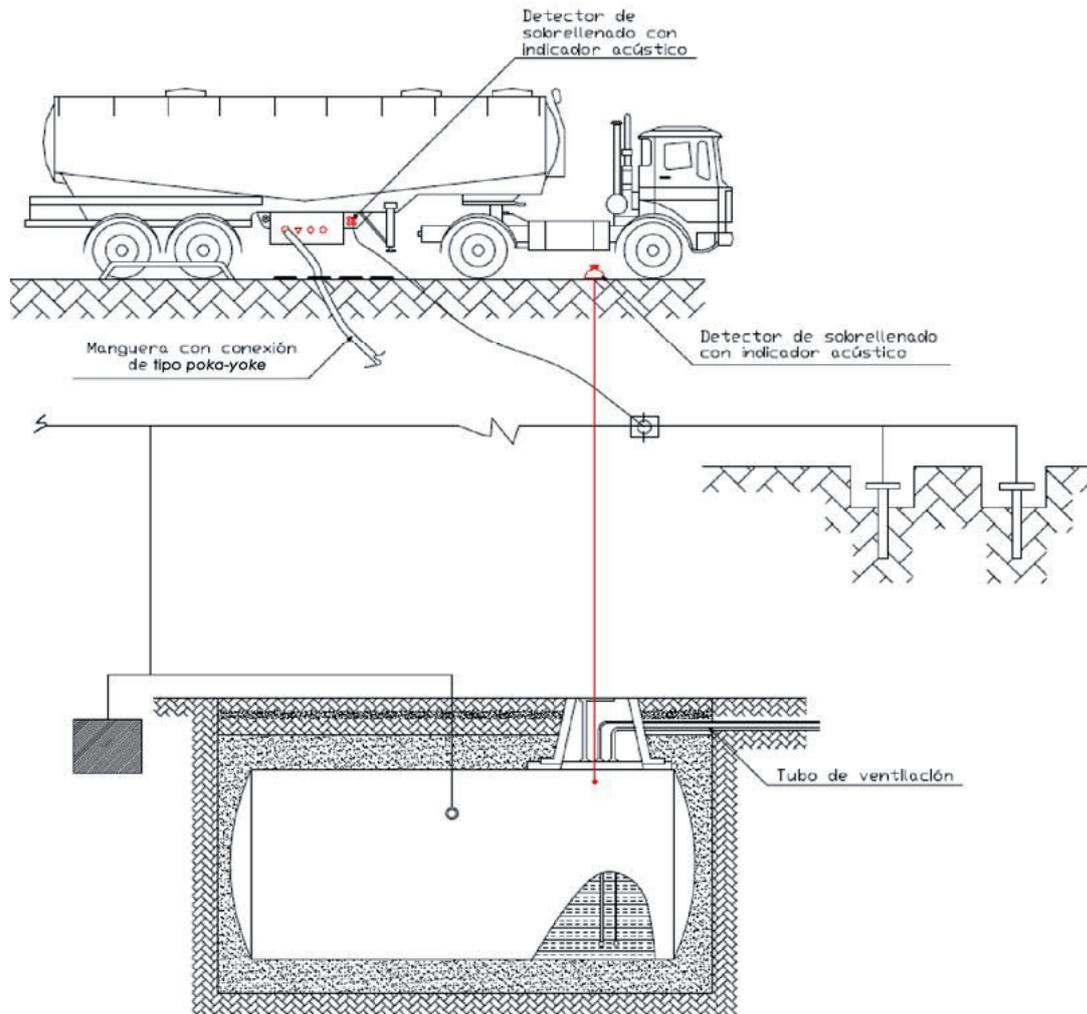


Figura 2.3. Esquema del proceso de llenado mejorado

El diseño de las conexiones de la manguera mediante técnicas de *poka-yoke*, impedirá que el operario conecte la manguera a la boca equivocada, por lo que no se producirá una mezcla de distintos combustibles en el llenado del depósito. Los avisadores acústicos impedirán que se produzcan derrames por exceso de combustible. Los topes de proximidad entre los vehículos impedirán que se produzcan golpes accidentales con los surtidores, que podrían saldarse con derrames.

Además, habría que incluir la mejora del plan de mantenimiento y la formación específica del operario encargado de supervisar la operación, logrando así que las tareas se realicen en mayor medida conforme a los procedimientos. Todas estas medidas dotarán al sistema de un funcionamiento más fiable que el actual.

## 2.3. Caso 2: HAZOP radiadores

### 1) Descripción de la instalación

El caso supone una instalación de calefacción con caldera eléctrica, tal y como muestra el esquema de la figura 2.4. La instalación se compone de:

- Tubería de entrada de agua fría con válvula de cierre.
- Sistema de grifería, con sendos grifos para salida de agua fría y caliente.
- Caldera con conexión a red eléctrica y toma de tierra, con una salida de agua caliente y dos entradas de agua fría (una de la alimentación y otra de la recirculación de los radiadores).
- Conducciones de agua fría, una para alimentar la grifería y la caldera, y otra de retorno a la caldera. Esta última dispone de un manómetro para regular la presión.
- Dos conducciones de agua caliente, una para alimentar la grifería y otra para alimentar a los radiadores, ambas procedentes de la caldera. Esta última dispone de un manómetro para regular la presión y de una válvula de seguridad para evitar sobrepresiones.
- Entre ambas conducciones, fría y caliente, con origen y destino respectivamente de los radiadores, existe una válvula de *bypass* para disminuir la cantidad de agua que va a los radiadores.
- Dos radiadores, cada uno de ellos con una válvula de regulación a la entrada.

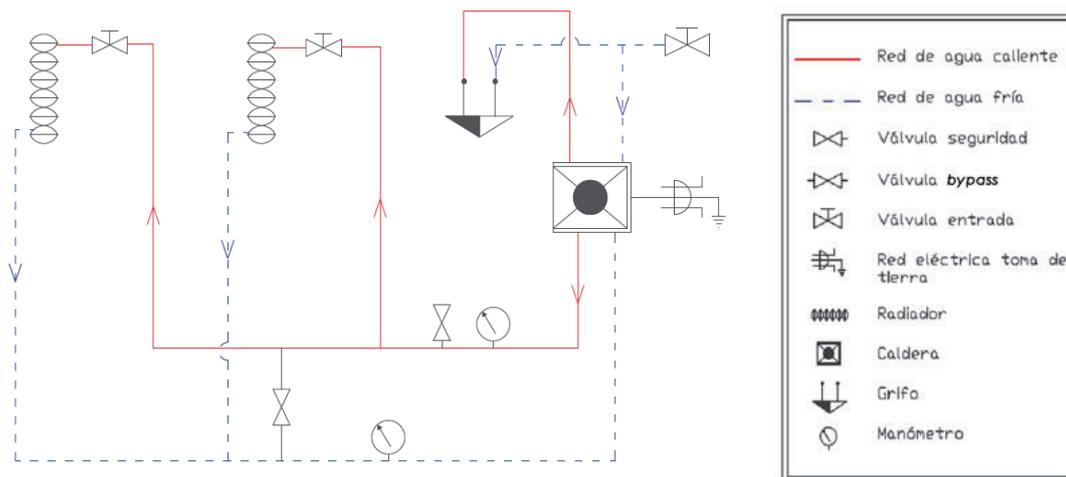


Figura 2.4. Esquema de la instalación de calefacción

El circuito funciona del siguiente modo: la válvula de entrada permite el paso del agua desde la tubería de entrada al sistema. La tubería se separa en dos tramos, uno con salida directa al grifo de agua fría, mientras que el otro se dirige a la caldera. La caldera, conectada a la red eléctrica, calienta el agua, que se dirige por una parte al grifo de agua caliente y por la otra, a la red de radiadores. Esta red dispone de un manómetro para visualizar la presión del sistema y de una válvula de seguridad que expulsa el líquido sobrante en caso de sobrepresión del sistema. A la entrada de cada uno de los radiadores hay una válvula de entrada que permite regular o cortar el suministro de agua caliente a los mismos. La línea de retorno a la caldera dispone, asimismo, de un manómetro para comprobar la presión del sistema. Entre la línea de agua caliente de entrada a los radiadores y la de agua fría de salida de los mismos existe un *bypass* destinado a la recuperación de flujo caliente hacia la caldera en el caso de que el sistema tenga poca demanda térmica.

## 2) Definición del objetivo y alcance

Se pide identificar los peligros utilizando la metodología HAZOP para los posibles accidentes derivados de una desviación de las variables de proceso con respecto a los parámetros normales de operación en la instalación anteriormente citada.

### 3) Definición de los elementos críticos o nodos de estudio

N.º	Denominación	N.º	Denominación
1	Tubería de entrada	11	Manómetro frío
2	Válvula de entrada	12	Manómetro caliente
3	Caldera	13	Válvula seguridad
4	Conducto agua fría entrada a grifo	14	Válvula <i>bypass</i>
5	Conducto agua fría entrada a caldera	15	Válvula regulación radiador 1
6	Conducto agua caliente caldera a grifo	16	Válvula regulación radiador 2
7	Conducto agua caliente caldera a radiadores (tramo común)	17	Radiador 1
8	Conducto agua caliente a radiador 1	18	Radiador 2
9	Conducto agua caliente a radiador 2	19	Alimentación de la red eléctrica
10	Conducto agua fría de radiadores a caldera	20	Toma de tierra

Tabla 2.9. Identificación de los nodos de la instalación de calefacción

### 4) Definición de las desviaciones para cada una de las variables de proceso, a partir de las palabras guía

Nodo(s)	Variable	Palabra guía	Desviación
1, 4, 5, 6	Caudal	NO	No llega agua a su destino
1, 4, 5, 6	Caudal	MENOS	Llega poco caudal
2	Caudal	MÁS	No se puede parar el paso de caudal
3	Temperatura	NO	No calienta
3	Temperatura Presión	MÁS	Aumento de la temperatura y, a consecuencia de ello, de la presión interior
3	Temperatura	MENOS	La caldera calienta menos de lo que se indica en termostato
7, 8, 9	Caudal	NO	No llega agua a uno o ambos radiadores
7, 8, 9	Caudal	MENOS	Llega poco caudal a uno o ambos radiadores
10	Caudal	NO	No retorna agua a la caldera
10	Caudal	MENOS	Retorna poco caudal a la caldera
11, 12	Nivel	NO	No marca el nivel de presión
13	Actúa Conserva	NO	No evacúa en caso de sobrepresión Actúa sin existir sobrepresión
14	Caudal	NO	No desvía el exceso de caudal hacia los radiadores
15, 16	Caudal	NO	No permite la entrada de agua en el radiador
15, 16	Caudal	MÁS	No permite el cierre de paso de agua al radiador
17, 18	Temperatura	NO	El radiador no calienta
19	Energía	MÁS	Subida de tensión
20	Conductividad eléctrica	NO	La toma de tierra no aísla

Tabla 2.10. Definición de desviaciones

### 5) Identificar posibles causas de cada desviación

Nodo(s)	Desviación	Causas posibles
1, 4, 5, 6	No llega agua a su destino	Obstrucción total de tubería por cal, óxido, etc. Rotura total de tubería
1, 4, 5, 6	Llega poco caudal	Fugas en tubería
2	No se puede parar el paso de caudal	Oxidación, desgaste Bloqueo en abierto de la válvula
3	No calienta	Mal funcionamiento de las resistencias
3	Aumento de la temperatura y, a consecuencia de ello, de la presión interior	Mal funcionamiento del termostato de la caldera
3	La caldera calienta menos de lo que se indica en termostato	Mal funcionamiento del termostato de la caldera
7, 8, 9	No llega agua a uno o ambos radiadores	Obstrucción total de tubería por cal, óxido, etc. Rotura total de tubería
7, 8, 9	Llega poco caudal a uno o ambos radiadores	Fugas en tubería
10	No retorna agua a la caldera	Obstrucción total de tubería por cal, óxido, etc. Rotura total de tubería
10	Retorna poco caudal a la caldera	Fugas en tubería
11, 12	No marca el nivel de presión	Obstrucción por incrustaciones Rotura muelle Defecto de fabricación
13	No evacúa en caso de sobrepresión Actúa sin existir sobrepresión	Incrustaciones de cal, óxido, etc. Defecto de montaje Rotura del muelle.
14	No desvía el exceso de caudal hacia los radiadores	Incrustaciones de cal, óxido, etc. Defecto de montaje
15,16	No permite la entrada de agua en el radiador	Incrustaciones de cal, óxido, etc.
15, 16	No permite el cierre de paso de agua al radiador	Incrustaciones de cal, óxido, etc.
17, 18	El radiador no calienta	Obstrucciones internas
19	Subida de tensión	Mal funcionamiento de la red
20	La toma de tierra no aísla	Mal mantenimiento o rotura por acción de roedores

Tabla 2.11. Determinación de las posibles causas

### 6) Establecer las consecuencias posibles de la desviación y analizar cuál de las alternativas siguientes es aplicable al caso

- Las consecuencias no entrañan riesgo: descartar esta desviación.
- Las consecuencias entrañan riesgos menores o medianos: consideración de esta desviación en el siguiente paso.
- Las consecuencias entrañan riesgos mayores: consideración en el siguiente paso y envío para su análisis mediante un método más detallado y/o cuantitativo.

Nodo(s)	Causas posibles	Consecuencias posibles
1, 4, 5, 6	Obstrucción total de tubería por cal, óxido, etc. Rotura total de tubería	Sobrepresión; reventón; fuga Fuga
1, 4, 5, 6	Fugas en tubería	Pérdidas de agua
2	Oxidación, desgaste Bloqueo en abierto de la válvula	No se puede detener la entrada de agua en caso de malfuncionamiento del sistema
3	Mal funcionamiento de las resistencias	El sistema no calienta
3	Mal funcionamiento del termostato de la caldera	Explosión; reventón y fuga
3	Mal funcionamiento del termostato de la caldera	Los radiadores calientan poco o no calientan
7, 8, 9	Obstrucción total de tubería por cal, óxido, etc. Rotura total de tubería	Sobrepresión; reventón; fuga; uno o ambos radiadores no calientan Fuga; uno o ambos radiadores no calientan
7, 8, 9	Fugas en tubería	Pérdidas de agua; uno o ambos radiadores no calientan
10	Obstrucción total de tubería por cal, óxido, etc. Rotura total de tubería	Sobrepresión en todo el subsistema de radiadores; reventón; fuga Fuga
10	Fugas en tubería	Pérdidas de agua
11, 12	Obstrucción por incrustaciones Rotura muelle Defecto de fabricación	Desconocimiento del estado de las presiones en el sistema; peligro de rotura, fugas o explosión
13	Incrustaciones de cal, óxido, etc. Defecto de montaje Rotura del muelle	Sobrepresión, explosión Fuga
14	Incrustaciones de cal, óxido, etc. Defecto de montaje	Peligro de rotura, fugas o explosión
15,16	Incrustaciones de cal, óxido, etc.	Sobrepresión en las tuberías; peligro de rotura, fugas o explosión
15, 16	Incrustaciones de cal, óxido, etc.	Exceso de calor en el radiador; riesgo de sobrepresión, fugas o explosión
17, 18	Obstrucciones internas	Riesgo de sobrepresión, fugas o explosión
19	Mal funcionamiento de la red	Sobrecarga; quema de la caldera; punto de ignición
20	Mal mantenimiento o rotura por acción de roedores	Sobrecarga; quema de la caldera; punto de ignición

Tabla 2.12. Determinación de consecuencias

7) *Determinar medidas correctoras que eviten o palien las causas de las desviaciones*

Nodo(s)	Consecuencias posibles	Comentarios y medidas correctoras
1, 4, 5, 6	Sobrepresión; reventón; fuga Fuga	Mejorar mantenimiento, descalcificadora Material más resistente
1, 4, 5, 6	Pérdidas de agua	Mejorar mantenimiento
2	No se puede detener la entrada de agua en caso de malfuncionamiento del sistema	Mejorar mantenimiento
3	El sistema no calienta	Descalcificadora
3	Explosión; reventón y fuga	Mejorar mantenimiento

Nodo(s)	Consecuencias posibles	Comentarios y medidas correctoras
3	Los radiadores calientan poco o no calientan	Mejorar mantenimiento
7, 8, 9	Sobrepresión; reventón; fuga; uno o ambos radiadores no calientan	Mejorar mantenimiento, descalcificadora; filtros
	Fuga; uno o ambos radiadores no calientan	Material más resistente
7, 8, 9	Pérdidas de agua; uno o ambos radiadores no calientan	Mejorar mantenimiento
10	Sobrepresión en todo el subsistema de radiadores; reventón; fuga	Mejorar mantenimiento, descalcificadora; filtros
	Fuga	Material más resistente
10	Pérdidas de agua	Mejorar mantenimiento
11, 12	Desconocimiento del estado de las presiones en el sistema. peligro de rotura, fugas o explosión	Descalcificadora; filtros Mejorar mantenimiento Plan de calidad en fábrica
13	Sobrepresión, explosión	Mejorar mantenimiento; descalcificadora
	Fuga	
14	Peligro de rotura, fugas o explosión	Mejorar mantenimiento; descalcificadora Formación
15,16	Sobrepresión en las tuberías; peligro de rotura, fugas o explosión	Mejorar mantenimiento; descalcificadora
15, 16	Exceso de calor en el radiador; riesgo de sobrepresión, fugas o explosión	Mejorar mantenimiento; descalcificadora
17, 18	Riesgo de sobrepresión, fugas o explosión	Mejorar mantenimiento; descalcificadora; filtros
19	Sobrecarga; quema de la caldera; punto de ignición	Mejorar mantenimiento; conmutador térmico
20	Sobrecarga; quema de la caldera; punto de ignición	Mejorar mantenimiento; conmutador térmico

Tabla 2.13. Medidas correctoras

Nota(s)	Variable	Palabra guía	Desviación	Causas posibles	Consecuencias posibles	Comentarios y medidas correctoras
1, 4, 5, 6	Caudal	NO	No llega agua a su destino	Obstrucción total de tubería por cal, óxido, etc. Rotura total de tubería	Sobrepresión; reventón; fuga Fuga	Mejorar mantenimiento, descalcificadora Material más resistente
1, 4, 5, 6	Caudal	MENOS	Llega poco caudal	Fugas en tubería	Pérdidas de agua	Mejorar mantenimiento
2	Caudal	MÁS	No se puede parar el paso de caudal	Oxidación, desgaste Bloqueo en abierto de la válvula	No se puede detener la entrada de agua en caso de mal funcionamiento del sistema	Mejorar mantenimiento
3	Temperatura	NO	No calienta	Mal funcionamiento de las resistencias	El sistema no calienta	Descalcificadora
3	Temperatura Presión	MÁS	Aumento de la temperatura y, a consecuencia de ello, de la presión interior	Mal funcionamiento del termostato de la caldera	Explosión; reventón y fuga	Mejorar mantenimiento
3	Temperatura	MENOS	La caldera calienta menos de lo que se indica en el termostato	Mal funcionamiento del termostato de la caldera	Los radiadores calientan poco o no calientan	Mejorar mantenimiento
7, 8, 9	Caudal	NO	No llega agua a uno o ambos radiadores	Obstrucción total de tubería por cal, óxido, etc. Rotura total de tubería	Sobrepresión; reventón; fuga; uno o ambos radiadores no calientan Fuga; uno o ambos radiadores no calientan	Mejorar mantenimiento, descalcificadora; filtros Material más resistente
7, 8, 9	Caudal	MENOS	Llega poco caudal a uno o ambos radiadores	Fugas en tubería	Pérdidas de agua; uno o ambos radiadores no calientan	Mejorar mantenimiento
10	Caudal	NO	No retorna agua a la caldera	Obstrucción total de tubería por cal, óxido, etc. Rotura total de tubería	Sobrepresión en todo el subsistema de radiadores; reventón; fuga Fuga	Mejorar mantenimiento, descalcificadora; filtros Material más resistente
10	Caudal	MENOS	Retorna poco caudal a la caldera	Fugas en tubería	Pérdidas de agua	Mejorar mantenimiento

Notod(s)	Variable	Palabra guía	Desviación	Causas posibles	Consecuencias posibles	Comentarios y medidas correctoras
11, 12	Nivel	NO	No marca el nivel de presión	Obstrucción por incrustaciones Rotura muelle Defecto de fabricación	Desconocimiento del estado de las presiones en el sistema; peligro de rotura, fugas o explosión	Descalcificadora; filtros Mejorar mantenimiento Plan de calidad en fábrica
			Actúa	NO	No evacúa en caso de sobrepresión	Incrustaciones de cal, óxido, etc. Defecto de montaje
13	Caudal	INVERSA	Actúa sin existir sobrepresión	Rotura del muelle	Fuga	Mejorar mantenimiento; descalcificadora
			NO	No desvía el exceso de caudal hacia los radiadores	Incrustaciones de cal, óxido, etc. Defecto de montaje	Peligro de rotura, fugas o explosión
14	Caudal	NO	No permite la entrada de agua en el radiador	Incrustaciones de cal, óxido, etc.	Sobrepresión en las tuberías; peligro de rotura, fugas o explosión	Mejorar mantenimiento; descalcificadora
			NO	No permite el cierre de paso de agua al radiador	Incrustaciones de cal, óxido, etc.	Exceso de calor en el radiador; riesgo de sobrepresión, fugas o explosión
15, 16	Temperatura	NO	El radiador no calienta	Obstrucciones internas	Riesgo de sobrepresión, fugas o explosión	Mejorar mantenimiento; descalcificadora; filtros
			MÁS	Subida de tensión	Mal funcionamiento de la red	Sobrecarga; quema de la caldera; punto de ignición
17, 18	Energía	MÁS	La toma de tierra no aísla	Mal mantenimiento o rotura por acción de roedores	Sobrecarga; quema de la caldera; punto de ignición	Mejorar mantenimiento; conmutador térmico
			NO	Subida de tensión	Mal funcionamiento de la red	Sobrecarga; quema de la caldera; punto de ignición
19	Conductividad eléctrica	NO	La toma de tierra no aísla	Mal mantenimiento o rotura por acción de roedores	Sobrecarga; quema de la caldera; punto de ignición	Mejorar mantenimiento; conmutador térmico
			MÁS	Subida de tensión	Mal funcionamiento de la red	Sobrecarga; quema de la caldera; punto de ignición
20	Conductividad eléctrica	NO	La toma de tierra no aísla	Mal mantenimiento o rotura por acción de roedores	Sobrecarga; quema de la caldera; punto de ignición	Mejorar mantenimiento; conmutador térmico
			MÁS	Subida de tensión	Mal funcionamiento de la red	Sobrecarga; quema de la caldera; punto de ignición

Tabla 2.14. Informe final

### 8) Esquema de la instalación mejorada

Para mejorar la instalación, además de modificar el plan de mantenimiento de la misma, se ha optado por instalar una descalcificadora en la entrada del sistema para quitar las impurezas de cal, posibles causantes de un importante número de desviaciones. Se ha optado también por instalar un conmutador térmico que proteja a la caldera de posibles sobretensiones en la red. Por último, se ha incluido un filtro en la realimentación de la caldera proveniente de los radiadores, para eliminar otro tipo de impurezas acumuladas por el sistema, como pueden ser los óxidos o similares.

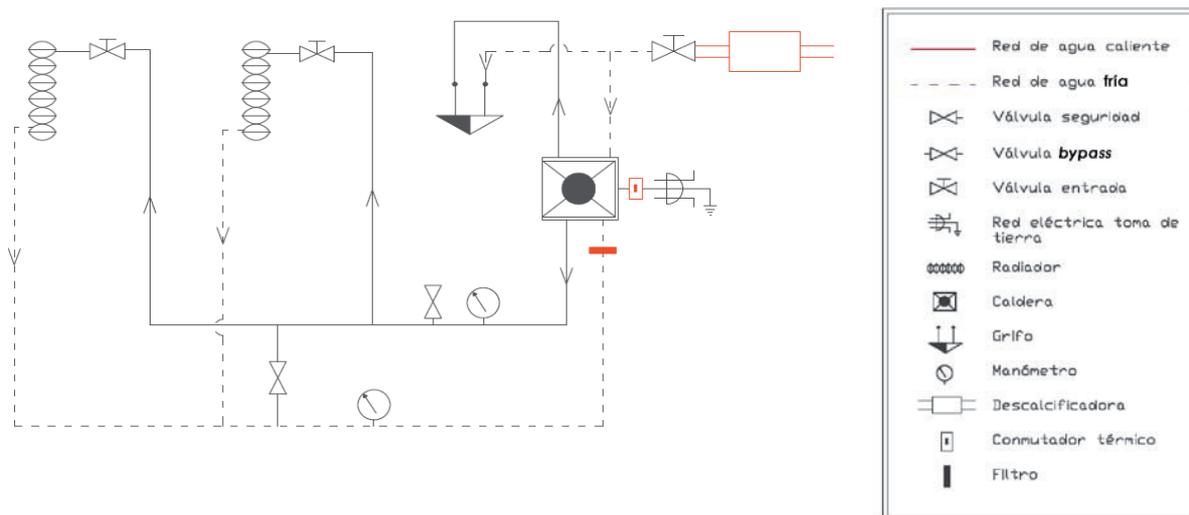


Figura 2.5. Esquema de la instalación de calefacción mejorada

## 3. MÉTODO AMFE

### 3.1. Descripción teórica

El análisis modal de fallos y efectos con criticidad (AMFEC) es una herramienta de análisis sistemático y de detalle de todos los modos de fallo de los componentes de un sistema, que identifica su efecto sobre el mismo. Así, componente a componente, se analiza cada modo de fallo independientemente y se identifican sus efectos sobre otros componentes del sistema y sobre el sistema en su conjunto.

Para realizar un AMFE es conveniente utilizar un formulario o tabla especial, como el mostrado en la tabla 3.7.

Los pasos para realizar un AMFEC son:

1) *Descripción de la instalación*

Consiste en analizar los componentes de la instalación y su funcionamiento.

2) *Definición del objetivo y alcance*

Se trata de definir qué elementos forman parte del análisis y cuál es el objetivo del mismo, y de identificar qué riesgos son prioritarios de cara a un mejor funcionamiento del sistema.

3) *Determinación de funciones*

Consiste en indicar lo más brevemente posible la función de la pieza o conjunto que se está analizando. Cuando el conjunto tiene varias funciones, hay diferentes modos potenciales de fallo y puede ser preferible relacionar las funciones separadamente.

4) *Determinación de modos de fallo de cada función*

El modo de fallo es la manera en que una determinada función no se realiza correctamente.

En este paso hay que relacionar cada modo de fallo potencial, para cada pieza en particular, con la función que realiza la misma. Algunos ejemplos de modos de fallo se muestran en la tabla siguiente:

Bloqueo	No arranca	Funcionamiento inadvertido
Vibración	No conmuta	Funcionamiento intermitente
No se queda en posición	Funcionamiento prematuro	Funcionamiento irregular
No se abre/cierra	Funcionamiento retardado	Indicación errónea
Posición abierta/cerrada	Entrada errónea (aumento/disminución)	Flujo restringido
Falsa actuación	Salida errónea (aumento/disminución)	Cortocircuito (eléctrico)
Pérdida de entrada/salida	Fugas externas	Circuito abierto (eléctrico)
No se para	Excede tolerancia superior/inferior	Otras

Tabla 3.1. Ejemplos de modos de fallo

### 5) *Determinación de causas para cada modo de fallo*

Consiste en relacionar todas las causas potenciales atribuibles a cada modo de fallo, con el fin de estimar su probabilidad de aparición, descubrir efectos secundarios y prever acciones correctoras recomendables. Las causas relacionadas deben ser lo más concisas y completas posibles, de modo que las acciones correctoras puedan ser orientadas hacia las causas pertinentes. Algunos ejemplos de causas típicas de fallos son las mostradas en la tabla 3.2:

Uso de material incorrecto. Soldadura de mala calidad	Dañado en producción
Material incorrectamente especificado. Porosidad	Tratamiento térmico incorrecto. Omitido
Corrosión antes del montaje	Impurezas en el material. Alineación incorrecta
Dimensiones no de acuerdo a plano. Error de montaje	Adelgazamiento. Excentricidad
Interpretación inadecuada del diseño. Par de apriete incorrecto. Sobre tensión	Marcas de utillaje. Desequilibrio
Lubricación insuficiente. Sobrecarga	Formación de grietas
Demasiado caliente	Espesor incorrecto del material
Mantenimiento inadecuado. Demasiado frío	Pintura de recubrimiento de mala calidad. Estructura incorrecta del material, etc.

Tabla 3.2. Ejemplos de causas de fallo

### 6) *Determinación de las formas de detección*

Se identifican qué señales podrían apreciarse en el caso de que ocurriera un modo de fallo, tal y como se indica en los ejemplos de la siguiente tabla:

Función	Modo de fallo	Detección
Ventilar	No ventila	Aumento de temperatura No se oye ruido
Conducir un fluido	Flujo restringido	Sale muy poco fluido o muy lentamente

Tabla 3.3. Ejemplos de formas de detección

### 7) *Determinación de los efectos sobre otros componentes y sobre el sistema*

Identificar, evaluar y registrar las consecuencias de cada modo de fallo sobre:

- Otros componentes.
- El sistema en su conjunto, ya que puede resultar en un fallo múltiple.

### 8) *Estimación de la frecuencia de fallo, la gravedad y la probabilidad de que el fallo sea detectado*

Es la estimación cuantitativa de la importancia de los fallos, según la probabilidad de que ocurra el fallo, el grado de gravedad del mismo y la probabilidad de que sea detectado.

- Frecuencia (F): Este índice está íntimamente relacionado con la causa de fallo, y consiste en calcular la probabilidad de ocurrencia en una escala del 1 al 10 (tabla 3.4.). Cuando se asigna la clasificación por ocurrencia, deben ser consideradas dos probabilidades:

1. La probabilidad de que se produzca la causa potencial del fallo ( $P1$ ). Para esta probabilidad deben evaluarse todos los controles actuales utilizados para prevenir que se produzca la causa de fallo en el elemento designado.
2. La probabilidad de ocurrencia, entendiendo por *ocurrencia* la probabilidad de que una causa específica se produzca y dé lugar al modo de fallo ( $P2/1$ ).

Por tanto, la probabilidad de ocurrencia de un modo de fallo debido a una causa es el producto de las dos probabilidades:  $P(1) \times P(2/1)$ .

	de ocurrencia	
Probabilidad remota de ocurrencia. Sería irrazonable esperar que se produjera el fallo.	[0% – 0,005%]	1
Promedio de fallo bajo. Generalmente asociado con diseños parecidos, para las mismas condiciones de utilización, con un número relativamente bajo de fallos.	]0,005% – 0,01%]	2
Promedio de fallo bajo. Generalmente asociado con diseños parecidos a otros previos usados en entornos diferentes, con un número relativamente bajo de fallos.	]0,01% – 0,05%]	3
Promedio de fallo moderado. Generalmente asociado con diseños parecidos a otros previos que han experimentado fallos esporádicos en condiciones de utilización ligeramente diferentes.	]0,05% – 0,1%]	4
Promedio de fallo moderado. Generalmente asociado con diseños parecidos a otros previos que han experimentado fallos más frecuentes, que necesitan atenciones particulares.	]0,1% – 0,5%]	5
Promedio de fallo moderado. Generalmente asociado a productos sin diseños parecidos previos y sin probabilidades de fallo medidas.	]0,5% – 1%]	6
Problema de fallo alto. Asociado con fallos de productos parecidos que han causado problemas de diseño en el pasado.	]1% – 5%]	7
Problema de fallo alto. Asociado con diseños previos parecidos, con problemas de fabricación.	]5% – 10%]	8
Promedio de fallo muy alto. Generalmente asociado con productos previos parecidos, con problemas de diseño y fabricación.	]10% – 50%]	9
Promedio de fallo sumamente alto. Los fallos ocurrirán casi con certeza.	> 50%	10

Tabla 3.4. Probabilidad de ocurrencia / frecuencia

Los datos para estimar la probabilidad de ocurrencia pueden obtenerse a partir de distintas fuentes, entre otras:

- Registro de fallos según reclamaciones de clientes.
- Datos del fabricante.
- Tablas de tasas de fallo típicas publicadas en libros de análisis de riesgos.
- Bases de datos de fallos, tales como el RiAC Automated Data Book y otras.

Generalmente las mencionadas fuentes ofrecen datos sobre la tasa de fallos del componente, pero no siempre es accesible la información sobre la causa que provoca el fallo y el modo de fallo, por lo que es habitual tener que estimar cómo se reparte la probabilidad de fallo de un componente entre los distintos modos y causas de fallo, en base a la experiencia y el entorno de funcionamiento del sistema analizado.

- Gravedad del fallo ( $G$ ). Este índice está íntimamente relacionado con los efectos del modo de fallo. El índice de gravedad valora el nivel de las consecuencias sentidas por el cliente. Esta clasificación está basada únicamente en los efectos del fallo, por lo que se calcula en base a una escala de 1 a 10, según muestra la tabla 3.5. Como la cla-

sificación de gravedad está basada únicamente en el efecto de fallo, todas las causas potenciales del fallo para un efecto particular de este, recibirán la misma clasificación de gravedad.

Criterio	Gravedad (G)
Imperceptible por el cliente	1
Perceptible pero no molesto	2
Perceptible y ligeramente molesto	3
Predispone negativamente al cliente	4
Degradación del sistema	5
Degradación del sistema y exigencia de cambio/repelación	6
Degradación del sistema y reparación costosa	7
Degradación del sistema, que llega a afectar a otros sistemas de la instalación	8
Afecta a la seguridad, con aviso previo	9
Afecta a la seguridad, sin previo aviso	10

Tabla 3.5. Gravedad

- No detección (D). Este índice marca la probabilidad de que la causa y/o modo de fallo, supuestamente aparecido, llegue al cliente. Este índice está íntimamente relacionado con los controles de detección actuales y la causa de fallo. Para su determinación se utiliza una escala de 1 a 10, según muestra la tabla 3.6.

Criterio	Probabilidad de que el defecto individual llegue al cliente	D
Probabilidad remota de que el defecto llegue al cliente. Sería poco razonable que un defecto no fuese detectado durante la inspección, prueba o montaje (dificultad de montaje)	0-5%	1
Probabilidad baja de que el defecto llegue al cliente	6-15%	2
	16-25%	3
	26-35%	4
Probabilidad moderada de que el defecto llegue al cliente	36-45%	5
	46-55%	6
Probabilidad alta de que el defecto llegue al cliente	56-65%	7
	66-75%	8
Probabilidad muy elevada de que el defecto llegue al cliente	76-85%	9
	86-100%	10

Tabla 3.6. No detección

### 9) Cálculo del índice de prioridad de riesgo (IPR) para cada modo de fallo y causa

El índice de prioridad del riesgo (IPR) es un parámetro de estimación cuantitativa de la importancia de los fallos. Se utiliza con el fin de priorizar las causas potenciales de fallo que requieren acciones preventivas. Se calcula como el producto de los tres indicadores: la frecuencia ( $F$ ), la gravedad ( $G$ ) y la probabilidad de detección ( $D$ ), mediante la siguiente expresión:

$$IPR = F \times G \times D$$

El IPR se calcula para todas las combinaciones de modo de fallo y causa. El IPR es usado con el fin de priorizar la causa potencial del fallo para posibles acciones correctivas. A mayor IPR, mayor importancia tiene el fallo.

#### 10) *Identificación de los modos de fallo más críticos y propuesta de medidas correctoras*

Implantación de acciones correctoras para aquellas causas de fallo con mayor IPR, donde se recomienda, de forma general, aplicar medidas para todos aquellos IPR cuyo valor sea mayor a 100. Para ello, será necesario que la acción correctora que se debe implantar reduzca alguno de los parámetros que componen el IPR:

- Reducción de  $F$ . Con el fin de disminuir la probabilidad de ocurrencia pueden aplicarse las siguientes acciones:
  1. Cambiar el diseño, para reducir la probabilidad de que la causa de fallo pueda producirse (porosidad, uso de material incorrecto, sobrecarga, etc.).
  2. Incrementar o mejorar los sistemas de control que impiden que se produzca la causa de fallo.
- Reducción de  $G$ . Con el fin de disminuir la gravedad, habría que introducir cambios en el diseño del sistema.
- Reducción de  $D$ . Con el fin de disminuir la probabilidad de que el defecto llegue al cliente, se requiere introducir cambios o mejoras en el control de detección del sistema, lo que por regla general, produce un aumento de coste.

#### 11) *Esquema de la instalación mejorada*

Una vez decididas las medidas correctoras que hay que implantar, se describirá cómo es la instalación mejorada.

#### 12) *Cálculo de los nuevos coeficientes $F'$ , $G'$ y $D'$ y el $IPR'$ para cada medida correctora*

Una vez propuestos los cambios, se recalculan los nuevos índices de frecuencia, gravedad y no detención:  $F'$ ,  $G'$  y  $D'$ , respectivamente, y se halla el nuevo  $IPR'$  resultante de la expresión:

$$IPR' = F' \times G' \times D'$$

Este nuevo índice permite evaluar la efectividad de la acción correctora.



## 3.2. Caso 1: AMFE gasolinera

### 1) Descripción de la instalación

En este caso se va a analizar el proceso de descarga de un camión cisterna con combustible líquido a una gasolinera. El esquema del camión cisterna se muestra en la figura 2.1 y está compuesto de cisterna, bomba de carga y descarga, e identificador de nivel, tal y como se describe en el caso 2.2.

Del mismo modo, en la figura 2.2 se muestra el esquema del camión ya conectado al depósito subterráneo de una gasolinera para iniciar el proceso de descarga. En dicho proceso intervienen, además de los elementos listados anteriormente, los siguientes elementos: tubería flexible (manguera), boca de carga de la gasolinera, válvula del depósito, bomba y válvula de seguridad, cuya descripción se indica en el caso 2.2. En cuanto al mantenimiento, cada dos meses se revisan los componentes. El tiempo medio que transcurre desde que se manifiesta el deterioro (desgaste, oxidación, etc.) hasta que este provoca el modo de fallo, es de un mes y medio.

### 2) Definición del objetivo y alcance

En este ejercicio se debe reducir el riesgo de la operación de descarga, considerando cinco elementos de los descritos anteriormente, los cuales influyen considerablemente en el proceso de descarga:

- Tubería flexible (manguera)
- Bomba (compresor)
- Identificador de nivel
- Válvula de seguridad
- Válvula del depósito

Además, se piden medidas correctoras para los IPR más elevados ( $\geq 100$ ). Para poder completar todos los puntos se adjunta la siguiente tabla con diversas tasas de fallos extraídas de la base de datos del RIAC, en donde las tasas de fallos están expresadas en fallos cada  $10^6$  horas. Cuando hay una M detrás del valor de la tasa de fallos significa que es el número de fallos por cada millón de millas:

Componente	Tasa de fallo	Componente	Tasa de fallo
Accesorios de unión mecánicos	0,0200	Panel de control (generador)	0,4501
Accesorios de unión hidráulicos	0,0300	Regulador neumático de presión	34,1516
Accesorios de unión soldados	0,0040	Regulador neumático de rotura de válvula	111,1111
Accesorios de unión universales	0,032	Rejilla apagallamas	1,0253 M
Actuador eléctrico	21,5993	Sensor genérico	6,4849
Alarma audible	1,1982	Sensor nivel de líquidos	2,6000
Alarma visible	0,0434	Sensor de presión	1,7170
Bomba de fuel	27,5770	Sonda	1,5000
By-pass en mangueras	2,2727	Sonda de fuel	0,3550
Cableado, eléctrico	0,0096	Tapa de cierre hermético	0,032
Cableado, AT	38,4615	Tapa de roscado	0,0801
Cableado, conductor	0,0190	Tubería	0,032
Canal de recogida	0,1562	Tubo de descarga	0,032
Carcasa	0,9292	Tubo de aspiración	4067,9500
Compuerta (boca de hombre)	3,4284	Unión válvula-bomba	3,2041
Convertidor de frecuencia	965,5616	Unión tubo a tubería	0,1128
Deposito de fuel	26,6003	Unión entre tubos	0,8170
Filtro de fuel-oil	0,0621	Válvula de fuel	3,3293
Indicador de fuel	104,3551	Válvula de depósito	3,9074
Indicador de presión	12,4513	Válvula de compuerta	51,8364
Monitor ( <i>display</i> )	0,0176	Válvula de regulado de presión	68,4981
Manguera de suministro	3,0303	Válvula de corte	16,2240

Tabla 3.8. Tasas de fallo de los componentes

### 3) Determinación de funciones

Componente	Función
Tubería flexible	Permitir el flujo de combustible procedente de la cisterna con destino a la bomba
Bomba	Facilitar el trasiego del combustible
Identificador de nivel	Indicar el nivel de fuel en el depósito
Válvula de seguridad	Evacuar combustible del depósito en caso de sobrepresión
Válvula del depósito	Permitir el paso de combustible al depósito e impedir el retroceso del mismo

Tabla 3.9. Identificación de las funciones de los componentes analizados

#### 4) Determinación de modos de fallo de cada función

Componente	Función	Modo de fallo
Tubería flexible	a. Permitir el flujo de combustible procedente de la cisterna con destino a la bomba	a1. Pérdidas pequeñas de flujo de combustible a2. El flujo pasa más lentamente de lo que debería a3. Se pierde bastante flujo
Bomba	b. Facilitar el trasiego del combustible	b1. Bloqueo en parado b2. Bloqueo en funcionamiento b3. Funcionamiento parcial b4. No es estanca
Identificador de nivel	c. Indicar el nivel de fuel en el depósito	c1. No varía la indicación, se queda estático
Válvula de seguridad	d. Evacuar combustible del depósito en caso de sobrepresión	d1. Bloqueado en cerrado
Válvula del depósito	e. Permitir el paso de combustible al depósito e impedir el retroceso del mismo	e1. Bloqueo en cerrado e2. Bloqueo en abierto e3. Parcialmente bloqueado

Tabla 3.10. Identificación de los modos de fallo

#### 5) Determinación de causas para cada modo de fallo

Modo de fallo	Causas
a1. Pérdidas pequeñas de flujo de combustible a2. El flujo pasa más lentamente de lo que debería a3. Se pierde bastante flujo	a11. Deterioro por rotura, corte o punzonamiento a12. Deterioro por desgaste o rozamiento (falta de mantenimiento) a21. Aplastada por causas exteriores a22. Taponada por suciedad interior a31. Conexión de manguera de tipo equivocado a32. Accesorios de unión mal acoplados a33. Accesorios de unión deteriorados
b1. Bloqueo en parado b2. Bloqueo en funcionamiento b3. Funcionamiento parcial b4. No es estanca	b11. Oxidación de elementos interiores b12. Obstrucción por cuerpos extraños b13. Fallo del sistema eléctrico b21. Fallo del sistema eléctrico b31. Fallo del sistema eléctrico b32. Obstrucción parcial por cuerpos extraños b33. Oxidación de elementos interiores b41. Rotura de la empaquetadura
c1. No varía la indicación, se queda estático	c11. Fallo en el sensor c12. Fallo en el indicador
d1. Bloqueado en cerrado	d11. Fallo por oxidación d12. Fallo por impurezas

Modo de fallo	Causas
e1. Bloqueo en cerrado	e11. Fallo por oxidación
e2. Bloqueo en abierto	e12. Fallo por impurezas
e3. Parcialmente bloqueado	e21. Fallo por oxidación
	e22. Fallo por impurezas
	e31. Fallo por impurezas
	e32. Fallo por oxidación

Tabla 3.11. Posibles causas para cada modo de fallo

## 6) Determinación de las formas de detección

Modo de fallo	Detección
a1. Pérdidas pequeñas de flujo de combustible	a1. Derrame superficial
a2. El flujo pasa más lentamente de lo que debería	a2. La manguera se observa chafada, no se observa descenso en el nivel de la cisterna
a3. Se pierde bastante flujo	a3. Derrame del combustible
b1. Bloqueo en parado	b1. No se observa descenso en el nivel de la cisterna
b2. Bloqueo en funcionamiento	b2. La bomba no se detiene
b3. Funcionamiento parcial	b3. Excesivo tiempo de descarga
b4. No es estanca	b4. Derrame
c1. No varía la indicación, se queda estático	c1. No indica los incrementos de nivel
d1. Bloqueado en cerrado	d1. No evacúa en caso de sobrepresión
e1. Bloqueo en cerrado	e1. No se observa descenso en el nivel de la cisterna
e2. Bloqueo en abierto	e2. Retroceso del combustible al finalizar la operación
e3. Parcialmente bloqueado	e3. Excesivo tiempo de descarga

Tabla 3.12. Determinación de la detección

## 7) Determinación de los efectos sobre otros componentes y sobre el sistema

Modo de fallo	Efectos	
	Otros componentes	Sistema
a1. Pérdidas pequeñas de flujo de combustible	Inundación del cuarto de bombas. Rotura de la bomba por funcionar en vacío	Derrame. Posible incendio. No se llena el depósito
a2. El flujo pasa más lentamente de lo que debería	Rotura de la bomba por funcionar en vacío	Sobrepresión en el sistema. No se llena el depósito
a3. Se pierde bastante flujo	Puede llegar a rotura de la bomba por funcionar en vacío	Derrame. Posible incendio. No se llena el depósito
b1. Bloqueo en parado	La cisterna permanece llena	No se llena el depósito
b2. Bloqueo en funcionamiento		Sobrepresión en el sistema
b3. Funcionamiento parcial		Ralentización del proceso de descarga
b4. No es estanca	Inundación del cuarto de bombas. Rotura de la bomba por funcionar en vacío	Incendio y explosión

Modo de fallo	Efectos	
	Otros componentes	Sistema
c1. No varía la indicación, se queda estático		Desborde de combustible. Posible incendio
d1. Bloqueado en cerrado	Desborde del depósito. Posible incendio	Posible explosión
e1. Bloqueo en cerrado	Posible rotura de la bomba o de la manguera. Derrame e incendio	Sobrepresión en el sistema
e2. Bloqueo en abierto		Derrame. Posible incendio. Vaciado del depósito
e3. Parcialmente bloqueado		Ralentización del proceso de descarga

Tabla 3.13. Efectos sobre otros componentes y sobre el sistema

8) *Estimación de la frecuencia de fallo  $F$ , la gravedad y la probabilidad de que el fallo sea detectado*

La probabilidad de fallo de cada componente se distribuye entre todas las combinaciones de modos de fallo y causas en las que está implicado el componente. Para ello, se ha estimado cómo repartir la tasa de fallos de cada componente entre todas las combinaciones de modos de fallo y causas para el cálculo del coeficiente  $F$ . Por su parte, el coeficiente de gravedad ( $G$ ) se ha estimado a partir de los efectos identificados para cada modo de fallo. Por último, el coeficiente de detección ( $D$ ) se ha calculado para cada combinación de modo de fallo y causa a partir del intervalo de tiempo entre mantenimientos y el tiempo desde que se manifiestan los primeros síntomas del modo de fallo hasta que este genera la avería.

**Tubería flexible:**

- Componente asimilable: tubería de descarga, con tasa de fallo de  $0,032 \cdot 10^{-6} \rightarrow F = 1$ . Aunque dividamos la probabilidad entre los diferentes modos de fallo, la  $F$  seguirá siendo 1.

	Reparto	Probabilidad	Probabilidad (%)	F
a(ij)		$<0,032 \cdot 10^{-6}$	$<0,0000032$	1

- Si existe posibilidad de incendio por fuga de combustible ( $a1$  y  $a3$ ) se considera que afecta a la seguridad ( $G = 9$ ), mientras que si sólo hay obstrucción ( $a2$ ) se supone perceptible y molesto ( $G = 3$ ).

- Las probabilidades de que obstrucciones, deterioro o malas conexiones puedan suceder por causas inmediatas (punzonamiento, aplastamiento por causas exteriores o mala unión...) o por causas progresivas (desgaste, deterioro...).

	Revisión	Aparición	Probabilidad (%)	D
a11	6	0	100%	10
a12	6	5	17%	3
a21	6	0	100%	10
a22	6	5	17%	3
a31	6	0	100%	10
a32	6	0	100%	10
a33	6	5	17%	3

### Bomba:

- Parte mecánica: regulador neumático de rotura de válvula con tasa de fallo de  $111,11 \cdot 10^{-6}$ . Se le asigna el 50% de la probabilidad de fallo a cada modo de fallo con origen mecánico (*b1* y *b3*). Dentro de cada modo de fallo se considera más probable la obstrucción (70%) que la oxidación (30%).
- Parte eléctrica: se considera la parte del circuito eléctrico con mayor probabilidad de fallo. Se aplica la tasa de fallo del convertidor de frecuencia con un valor de  $965,5 \cdot 10^{-6}$ . La probabilidad se divide equitativamente entre las tres causas de fallo de origen eléctrico (*b13*, *b21* y *b31*).

En cuanto a la carcasa, responsable del modo de fallo *b4*, presenta una tasa de fallo de  $0,9292 \cdot 10^{-6}$ .

	Reparto	Probabilidad	Probabilidad (%)	F
b11	0,5 x 0,3	$16,667 \cdot 10^{-6}$	0,0016667	1
b12	0,5 x 0,7	$38,889 \cdot 10^{-6}$	0,0038889	1
b13	0,33	$321,8539 \cdot 10^{-6}$	0,0321854	3
b21	0,33	$321,8539 \cdot 10^{-6}$	0,0321854	3
b31	0,33	$321,8539 \cdot 10^{-6}$	0,0321854	3
b32	0,5 x 0,7	$38,889 \cdot 10^{-6}$	0,0038889	1
b33	0,5 x 0,3	$16,667 \cdot 10^{-6}$	0,0016667	1
b41	1	$0,9292 \cdot 10^{-6}$	0,0000929	1

- La posibilidad de incendio y/o explosión se considera que afecta la seguridad ( $G = 9$ ), mientras que un fallo de bombeo se supone perceptible y molesto ( $G = 3$ ) y el bloqueo en encendido puede degradar el equipo ( $G = 5$ ).
- Las probabilidades de que el fallo o no funcionamiento de la bomba se produzcan se consideran instantáneas si se trata de un fallo eléctrico de bajo tiempo de aparición si se trata de una obstrucción o de alto o muy alto tiempo de aparición si se trata de oxidación o debido a la rotura de la carcasa.

	Revisión	Aparición	Probabilidad (%)	D
b11	6	5	17%	3
b12	6	1	83%	9
b13	6	0	100%	10
b21	6	0	100%	10
b31	6	0	100%	10
b32	6	1	83%	9
b33	6	5	17%	3
b41	6	6	0%	1

#### Indicador de nivel:

- Se diferencia si lo que falla es el sensor nivel de líquidos, con una tasa de fallos de 2,6, o el indicador de fuel, con una tasa de fallos de  $104,3 \cdot 10^{-6}$ .

	Reparto	Probabilidad	Probabilidad (%)	F
c11	1	$2,6 \cdot 10^{-6}$	0,00026	1
c12	1	$104,3 \cdot 10^{-6}$	0,01043	3

- Al existir posibilidad de incendio se considera que afecta a la seguridad ( $G = 9$ ).
- Tanto si falla el sensor como si falla el indicador, la aparición del fallo se supone que aparece aproximadamente al mes de funcionar sin estos.

	Revisión	Aparición	Probabilidad (%)	D
c11	6	1	83%	9
c12	6	1	83%	9

#### Válvula de seguridad:

- Se considera la válvula de regulación de presión, con una tasa de fallo de  $68,49 \cdot 10^{-6}$ . Dadas las condiciones de uso de del fluido circulante, la probabilidad

de bloqueo por impurezas es considerablemente mayor (80%) que la de bloqueo por oxidación (20%).

	Reparto	Probabilidad	Probabilidad (%)	F
d11	0.2	$13,7 \cdot 10^{-6}$	0,0013700	1
d12	0.8	$54,798 \cdot 10^{-6}$	0,0054798	2

- La explosión sin previo aviso genera una  $G = 10$ .
- La aparición del fallo surge a partir de los dos meses.

	Revisión	Aparición	Probabilidad (%)	D
d11	6	2	67%	8
d12	6	2	67%	8

### Válvula de depósito:

- Con una tasa de fallo de  $3,9 \cdot 10^{-6}$ . Al igual que en el caso la tubería flexible, aunque dividamos la probabilidad entre los diferentes modos de fallo,  $F$  seguirá siendo 1.

	Reparto	Probabilidad	Probabilidad (%)	F
e(ij)	-	$<3,9 \cdot 10^{-6}$	<0,00039	1

- El riesgo de incendio se considera que afecta la seguridad ( $G = 9$ ); la posibilidad de rotura de otros elementos de la instalación es  $G = 8$ ; la ralentización del proceso es un suceso molesto ( $G = 3$ ).
- Del mismo modo que la válvula anterior, la aparición del fallo surge a partir de los dos meses.

	Revisión	Aparición	Probabilidad (%)	D
e11	6	2	67%	8
e12	6	2	67%	8
e21	6	2	67%	8
e22	6	2	67%	8
e31	6	2	67%	8
e32	6	2	67%	8

Finalmente se calcula del índice de prioridad de riesgo (IPR) para cada modo de fallo y causa, tal y como se muestra en la siguiente tabla.

Componente	Función	Modo de fallo	Causa	Detección	Efectos		F	G	D	IPR				
					Otros componentes	Sistema								
Tubería flexible	a. Permitir el flujo de combustible procedente de la cisterna con destino a la bomba	a1. Pérdidas pequeñas de flujo de combustible	a1.1. Deterioro por rotura, corte o punzonamiento	Derrame superficial	Inundación del cuarto de bombas. Rotura de la bomba por funcionar en vacío	Derrame: Posible incendio. No se llena el depósito	1	9	10	90				
			a1.2. Deterioro por desgaste o rozamiento (falta de mantenimiento)				1	9	3	27				
			a2. El flujo pasa más lentamente de lo que debería				a2.1. Aplastada por causas exteriores	La manguera se observa chafada	Rotura de la bomba por funcionar en vacío	Sobrepresión en el sistema. No se llena el depósito	1	3	10	30
							a2.2. Taponada por suciedad interior				1	3	3	9
			a3. Se pierde bastante flujo				a3.1. Conexión de manguera de tipo equivocado	Derrame del combustible	Rotura de la bomba por funcionar en vacío	Derrame: Posible incendio. No se llena el depósito	1	9	10	90
											a3.2. Accesorios de unión mal acoplados	1	9	10
		a3.3. Accesorios de unión deteriorados		1	9	3					27			
		Bomba	b. Facilitar el trasiego del combustible	b1. Bloqueo en parado	b1.1. Oxidación de elementos interiores	No se observa descenso en el nivel de la cisterna	La cisterna permanece llena	No se llena el depósito	1	3	3	9		
					b1.2. Obstrucción por cuerpos extraños				1	3	9	27		
					b1.3. Fallo del sistema eléctrico				3	3	10	90		
					b2. Bloqueo en funcionamiento				La bomba no se detiene	Sobrepresión en el sistema	3	5	10	150
					b3. Funcionamiento parcial						3	3	10	60
b3.1. Fallo del sistema eléctrico	Excesivo tiempo de descarga				Ralentización del proceso de descarga						1	3	9	27
b3.2. Obstrucción parcial por cuerpos extraños				1		3	3	9						
b3.3. Oxidación de elementos interiores					1	3	3	9						

Componente	Función	Modo de fallo	Causa	Detección	Efectos		F	G	D	IPR			
					Otros componentes	Sistema							
Identificador de nivel	c. Indicar el nivel de fuel en el depósito	b4. No es estanca	b41. Rotura de la empaquetadura	Derrame	Inundación del cuarto de bombas. Rotura de la bomba por funcionar en vacío	Incendio y explosión	1	9	1	9			
							1	9	9	81			
Válvula de seguridad	d. Evacuar combustible del depósito en caso de sobrepresión	c1. No varía la indicación, se queda estático	c11. Fallo en el sensor	No indica los incrementos de nivel	Desborde del depósito. Posible incendio	Posible explosión	3	9	9	243			
							c12. Fallo en el indicador	1	10	8	80		
							d11. Fallo por oxidación	2	10	8	160		
							d12. Fallo por impurezas						
Válvula del depósito	e. Permitir el paso de combustible al depósito e impedir el retroceso del mismo	e1. Bloqueo en cerrado	e11. Fallo por oxidación	No se observa descenso en el nivel de la sistema	Posible rotura de la bomba o de la manguera. Derrame e incendio	Sobrepresión en el sistema	1	8	8	64			
							e12. Fallo por impurezas	1	8	8	64		
							e2. Bloqueo en abierto	e21. Fallo por oxidación	Retroceso del combustible al finalizar la operación	1	9	8	72
										e22. Fallo por impurezas	1	9	8
							e3. Parcialmente bloqueado	e31. Fallo por impurezas	Excesivo tiempo de descarga	1	3	8	24
										e32. Fallo por oxidación	1	3	8

Tabla 3.14. Tabla final del AMFEC

9) *Identificación de los modos de fallo más críticos, propuesta de medidas correctoras y cálculo de los nuevos coeficientes F', G' y D' y el IPR' para cada medida correctora*

Los modos de fallo más críticos suceden cuando existe un fallo en el indicador de nivel de fuel en el depósito con un IPR de 243, cuando la válvula de seguridad se queda bloqueada en cerrado debido a las impurezas, con un IPR de 160, y en el caso de que la bomba no se bloquee en funcionamiento por un fallo del sistema eléctrico con un IPR de 150. A continuación se describen algunas opciones para mejorar los índices F, G y D y así reducir el IPR.

**Propuesta de mejoras para mejorar el indicador de nivel de fuel:**

El índice elevado es debido, sobre todo, a la gravedad de las consecuencias, pero también a la elevada tasa de fallos y detección de los mismos.

- Reducción de *F*: un modo de reducir la probabilidad de fallo *F* es colocar dos indicadores de fuel en paralelo. De esta forma, aunque uno de los indicadores de nivel se quede estático (modo de fallo *c1*), será necesario que el segundo indicador tampoco funcione. Por tanto, la probabilidad de ocurrencia del modo de fallo es la probabilidad de que falle uno multiplicada por la probabilidad de que falle el otro, con lo que se consigue pasar de  $F = 5$  a  $F' = 1$ .

	Reparto	Probabilidad	Probabilidad (%)	F
c12	1	$(104,3 \cdot 10^{-6})^2$	0,000001	1

- Reducción de *G*: para reducir la gravedad se debe evitar el posible incendio y sus consecuencias, por lo que las medidas correctoras pasan por añadir una canalización para conducir el vertido a una zona segura (o el desagüe) y un sistema de extinción de incendios automático, con lo que el incidente ya no afecta a otros sistemas, y se ve reducida su gravedad. Aun así, sigue habiendo degradación del producto y exigencia de cambio/reparación ( $G = 9$  a  $G' = 6$ ).
- Reducción de *D*: la mejor medida para reducir el valor de *D*, y dado el IPR del suceso, consiste en revisar el correcto funcionamiento del sistema de indicador de

nivel de fuel en el depósito mensualmente, ya que este periodo sería suficiente para resolver el problema antes de su detección.

	Revisión	Aparición	Probabilidad (%)	D
c12	1	1	0%	1

Con ello se obtiene un IPR' de 24.

Componente	Modo de fallo	Causa	Medida correctora	F'	G'	D'	IPR'
Identificador de nivel	c1. No varía la indicación, se queda estático	c12. Fallo en el indicador	Dos Indicadores de nivel de fuel en paralelo; canalización; sistema de extinción de incendios	1	6	1	6

### Propuesta de mejoras para mejorar la válvula de seguridad:

El índice elevado en el segundo caso se debe tanto a la difícil percepción del fallo en el componente durante el funcionamiento normal de la instalación, como a la gravedad de las consecuencias que podrían ocurrir en caso de accidente.

- Reducción de *D*: como solución, se propone la revisión periódica y limpieza de las válvulas como tarea de mantenimiento que se debe realizar cada mes, periodo suficiente para reparar o sustituir las válvulas antes de que se manifieste el modo de fallo en la operación de llenado del depósito, por tanto:

	Revisión	Aparición	Probabilidad (%)	D
d11	2	2	0%	1
d12	2	2	0%	1

Y el IPR resultante queda:

Componente	Función	Modo de fallo	Medida correctora	F'	G'	D'	IPR'
Válvula de seguridad	d. Evacuar combustible del depósito en caso de sobrepresión	d1. Bloqueado en cerrado	Revisión periódica y limpieza	1	10	1	10
				2	10	1	20

### Propuesta de mejoras para mejorar la bomba:

El tercer IPR elevado, correspondiente al bloqueo de la bomba en pleno funcionamiento, presenta un nivel relativamente bajo en *F*, medianamente elevado en *G* y muy elevado en *D*.

- Reducción de  $G$ : la solución propuesta consiste en colocar una desconexión de emergencia en caso de sobrepresión, con lo que se evita que el fallo de la bomba degrade los componentes del sistema, y pasa de  $G = 5$  a  $G' = 3$ .
- Al tratarse de un fallo instantáneo, la  $D$  no puede mejorarse mediante mantenimiento directo de la bomba.

Componente	Función	Modo de fallo	Medida correctora	F'	G'	D'	IPR'
Bomba	b. Facilitar el trasiego del combustible	b2. Bloqueo en funcionamiento	Paro de emergencia	3	3	10	90

### 10) Esquema de la instalación mejorada

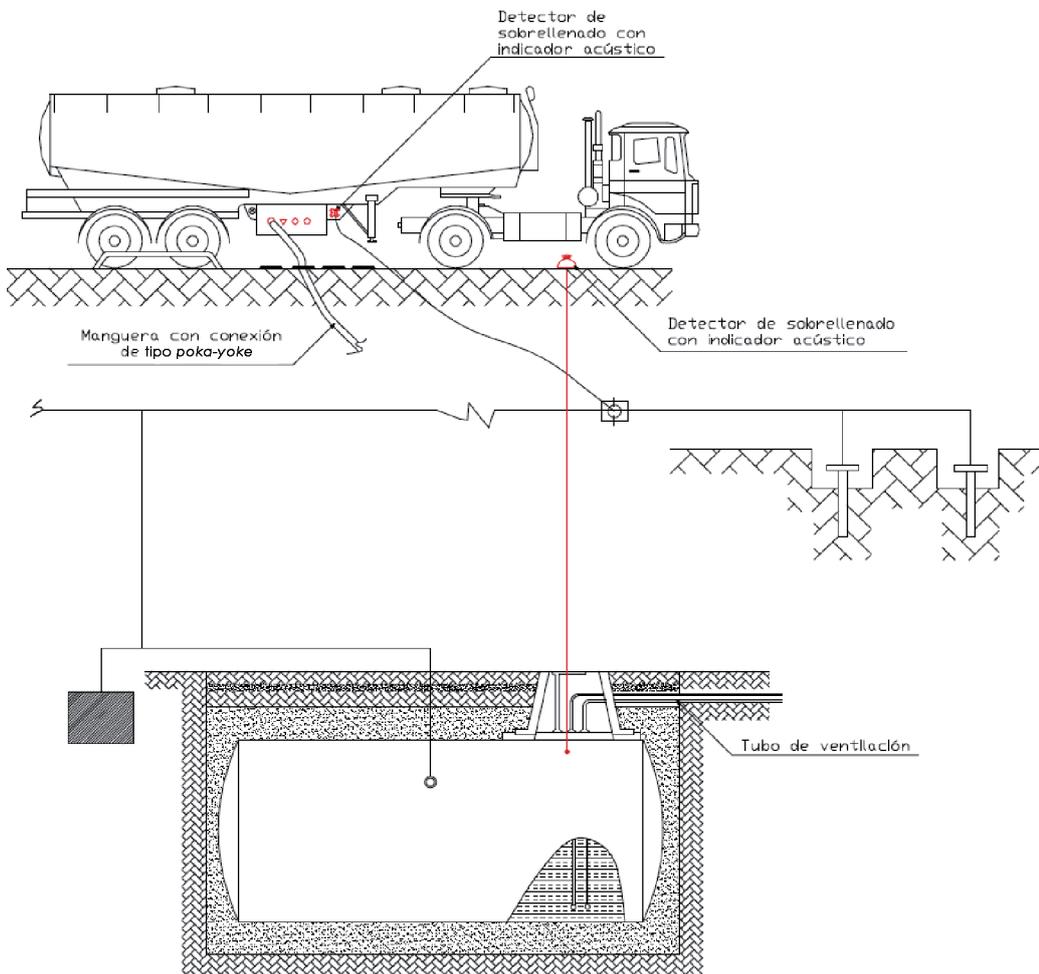


Figura 3.1. Esquema del proceso de llenado del depósito modificado

### 3.3. Caso 2: AMFE embotelladora

#### 1) Descripción de la instalación

Se quiere analizar la fiabilidad de los diversos sistemas en una línea de embotellado de frascos de alcohol. La línea de embotellado funciona del siguiente modo: la botella se desplaza automáticamente hasta la zona de llenado, donde la detecta un sensor, se detiene y es llenada por un sistema que mide el caudal que se vierte en la botella. Cuando finaliza el llenado, la botella se desplaza hacia la siguiente etapa y una nueva botella vacía llega a la posición de llenado.

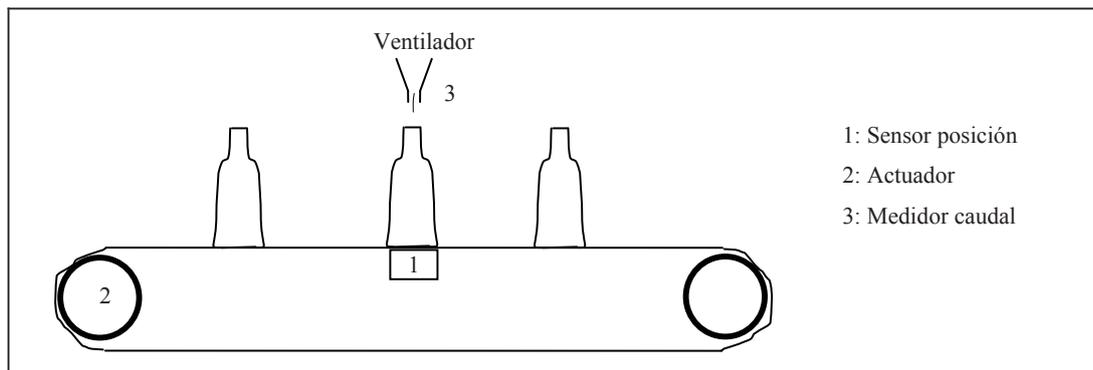


Figura 3.2. Esquema de la línea de embotellado

Dado que el alcohol es un líquido inflamable, la máquina de llenado va provista de un sistema de ventilación que impide que se concentre el vapor de alcohol en caso de que este se derrame por fallo del sistema. Una vez instalado el sistema, se comprueba si funciona correctamente.

El tiempo que tarda el ventilador desde que se presenta la causa hasta que se provoca un modo de fallos por el uso, es de cuatro meses. El caudalímetro y el actuador presentan una periodicidad de deterioro por el uso, de ocho meses desde que aparece la causa. El programa de mantenimiento prevé su revisión todos los años. Los fallos de fabricación o calibrado son un 20% de los casos de fallo.

El sensor de posición tiene una periodicidad media de estropearse con el uso, en ambientes industriales, de doce meses. El programa de mantenimiento establece la comprobación del sensor anualmente.

La siguiente tabla muestra las tasas de fallo:

Tipo de fallo	Tasa de fallo
Fallo mecánico del ventilador de tipo axial	22,8431 en 10 <sup>6</sup> horas
Fallo suministro eléctrico del ventilador	5,7078 en 10 <sup>6</sup> horas
Fallo del medidor de caudal	24,7850 en 10 <sup>6</sup> horas
Fallo del sensor de posición	67,2592 en 10 <sup>6</sup> horas
Fallo del actuador que pone en marcha y detiene la botella	97,402 en 10 <sup>6</sup> horas

Tabla 3.15. Tasas de fallo de los componentes de la línea de embotellado

### 2) Definición del objetivo y alcance

El objeto de este análisis es reducir el índice de prioridad de riesgo de aquellas combinaciones de modo de fallo y causa cuya mejora sea prioritaria. El estudio se centrará en los siguientes componentes:

- Ventilador
- Caudalímetro
- Sensor de posición
- Actuador de marcha y parada de la cinta.

### 3) Determinación de funciones

Componente	Función
Ventilador	a. Dispersar concentración de vapores
Caudalímetro	b. Medir el caudal
Sensor de posición	c. Detectar posición de la botella
Actuador de parada y marcha de la cinta	d. Detener y poner en marcha la cinta transportadora

Tabla 3.16. Identificación de funciones

#### 4) Determinación de modos de fallo de cada función

Componente	Función	Modo fallo
Ventilador	a. Dispersar concentración de vapores	a1. No dispersa a2. No dispersa lo suficiente. Poca ventilación
Caudalímetro	b. Medir el caudal	b1. No mide el paso de caudal b2. Mide más caudal del que pasa b3. Mide menos caudal del que pasa
Sensor de posición	c. Detectar posición de la botella	c1. No detecta la botella c2. Detecta la botella sin que haya llegado a la boquilla de llenado
Actuador	d. Detener y poner en marcha la cinta transportadora	d1. No lo detiene ni lo pone en marcha cuando debe

Tabla 3.17. Determinación de los modos de fallo

#### 5) Determinación de causas para cada modo de fallo

Modo fallo	Causa
a.1. No dispersa	a11. Rotura a12. fallo alimentación a13. atasco total
a2. No dispersa lo suficiente. Poca ventilación	a21. falta de engrasado de las partes giratorias o móviles del ventilador
b1. No mide el paso de caudal b2. Mide más caudal del que pasa b3. Mide menos caudal del que pasa	b11. Fallo fabricación o calibrado b12. Se estropea con el uso b21. Fallo fabricación o calibrado b22. Se estropea con el uso b31. Fallo fabricación o calibrado b32. Se estropea con el uso
c1. No detecta la botella c2. Detecta la botella sin que haya llegado a la boquilla de llenado	c11. Fallo fabricación y montaje del sensor c12. Sensor se estropea con el uso c21. Fallo fabricación y montaje del sensor c22. Sensor se estropea con el uso
d1. No lo detiene ni lo pone en marcha cuando debe	d11. Fallo de fabricación y/o montaje d12. Desgaste o atasco

Tabla 3.18. Determinación de las posibles causas

## 6) *Determinación de las formas de detección*

Modo fallo	Detección
a1. No dispersa	a1. Se detecta olor de la acumulación de vapores. No se percibe el ruido del ventilador o se percibe sobrecalentamiento del motor-ventilador
a2. No dispersa lo suficiente. Poca ventilación	a2. Es posible que se detecte olor de la acumulación de vapores
b1. No mide el paso de caudal	b1. Se derrama alcohol continuamente en el primer llenado
b2. Mide más caudal del que pasa	b2. Las botellas no se llenan del todo
b3. Mide menos caudal del que pasa	b3. Se derrama alcohol en cada llenado
c1. No detecta la botella	c1. Las botellas no paran para llenarse
c2. Detecta la botella sin que haya llegado a la boquilla de llenado	c2. Las botellas no paran en la posición que deben
d1. No lo detiene ni lo pone en marcha cuando debe	d1. Las botellas no paran ni se mueven cuando deben

Tabla 3.19. Identificación de las formas de detección

## 7) *Determinación de los efectos sobre otros componentes y sobre el sistema*

La siguiente tabla resume los modos de fallo, causas, detección y efectos para cada una de las funciones.

Componente	Función	Modo fallo	Causa	Detección	Efectos		
					Otros componentes	Sistema	
Ventilador	a. Dispersar concentración de vapores	a1. No dispersa	a11. Rotura	a1. Se detecta olor de la acumulación de vapores. No se percibe el ruido del ventilador o se percibe sobrecalentamiento del motor-ventilador		a1. Si la concentración de vapores inflamables sube mucho, por ejemplo en caso de derrame, puede haber un incendio en caso de que haya un punto de ignición	
			a12. Fallo alimentación				
			a13. Atasco total				
Caudalimetro	b. Medir el caudal	b1. No mide el paso de caudal	a21. Falta de engrasado de las partes giratorias o móviles del ventilador	a2. Es posible que se detecte olor de la acumulación de vapores	b1. El actuador no pone en marcha la cinta, se queda en la primera botella	a2. El mismo, pero es más difícil. Tendría que ser un derrame importante	
			b11. Fallo fabricación o calibrado				b1. Se derrama alcohol continuamente en el primer llenado
			b12. Se estropea con el uso				b2. Las botellas no se llenan del todo
Sensor de posición	c. Detectar posición de la botella	c1. No detecta la botella	b21. Fallo fabricación o calibrado	b3. Se derrama alcohol en cada llenado	b3. Se derrama alcohol en cada llenado, con el consiguiente peligro de posible incendio. Pérdida económica	b2. Las botellas no se llenan del todo	
			b22. Se estropea con el uso				
			b31. Fallo fabricación o calibrado				
Sensor de posición	c. Detectar posición de la botella	c1. No detecta la botella	b32. Se estropea con el uso	c1. Las botellas no paran para llenarse	c1. El caudalimetro no entra en funcionamiento	b2. Se vierte alcohol sobre la línea de embotellado. Peligro de incendio si aumenta la concentración de vapores y hay punto de ignición. Pérdida económica	
			c11. Fallo fabricación y montaje del sensor				
			c12. Sensor se estropea con el uso				c2. Las botellas no paran en la posición que deben
Sensor de posición	c. Detectar posición de la botella	c2. Detecta la botella sin que haya llegado a la boquilla de llenado	c21. Fallo fabricación y montaje del sensor	c2. Las botellas no paran en la posición que deben	c1. El sistema no cumple su función. Las botellas no se llenan	c2. Se vierte alcohol sobre la línea de embotellado. Peligro de incendio si aumenta la concentración de vapores y hay punto de ignición. Pérdida económica	
			c22. Sensor se estropea con el uso				

Componente	Función	Modo fallo	Causa	Detección	Efectos	
					Otros componentes	Sistema
Actuador	d. Detener y poner en marcha la cinta transportadora	d1. No lo detiene ni lo pone en marcha cuando debe	d11. Fallo de fabricación y/o montaje d12. Desgaste o atasco	d1. Las botellas no paran ni se mueven cuando deben	d1. El sensor de posición no detecta las botellas. El caudalímetro no entra en funcionamiento	d1. El sistema no cumple su función, las botellas no se llenan. Si además hay fallo de otros componentes, puede haber derrames y hasta incendio

Tabla 3.20. Tabla final del AMFEC

8) *Estimación de la frecuencia de fallo F, la gravedad y la probabilidad de que el fallo sea detectado*

**Coefficiente F**

La probabilidad de fallo de cada componente se distribuye entre todas las combinaciones de modo de fallo y causa en las que está implicado el componente. Para ello, se ha estimado cómo repartir la tasa de fallos de cada componente entre todas las combinaciones de modo de fallo y causa para el cálculo del coeficiente *F*:

- Para las causas de fallo del ventilador, cuya tasa de fallos es de  $22,8431 \cdot 10^{-6}$ , se estima que la obturación de parte de las hélices ocurre en un 50% de los casos, mientras que la obturación y la rotura total ocurren por igual en el resto de casos. Cálculo *F* para modos de fallo y causas relacionados con el ventilador. Por ejemplo, para el a11, la probabilidad de ocurrencia es:  $0,25 \times 22,8431 \cdot 10^{-6} = 0,000571078$ .

	Criterio reparto	Probabilidad	Prob. (100%)	F
a11	0,25	$5,71078 \cdot 10^{-6}$	0,000571078	1
a12	1	$5,707810^{-6}$	0,00057078	1
a13	0,25	$5,7107810^{-6}$	0,000571078	1
a21	0,5	$1,1421610^{-5}$	0,001142155	1

- La probabilidad de que el caudalímetro no mida el paso de caudal es del 20%, mientras que la probabilidad de que mida más o menos se reparte por igual en el resto de los casos. Como el 20% de las veces, el fallo se debe a fabricación o calibrado, basta con multiplicar los distintos coeficientes para calcular la probabilidad.

Cálculo *F* para modos de fallo y causas relacionados con el caudalímetro, cuya tasa de fallos es de  $24,7850 \cdot 10^{-6}$ .

	Cálculo del reparto	Criterio reparto	Probabilidad	Prob (100%)	F
b11	$(0,2 \times 0,2) = 0,04$ (*)	0,04	0,0000009914	0,00009914	1
b12	$(0,8 \times 0,2)$	0,16	0,0000039656	0,00039656	1
b21	$(0,2 \times 0,4)$	0,08	0,0000019828	0,00019828	1
b22	$(0,8 \times 0,4)$	0,32	0,0000079312	0,00079312	1
b31	$(0,2 \times 0,4)$	0,08	0,0000019828	0,00019828	1
b32	$(0,8 \times 0,4)$	0,32	0,0000079312	0,00079312	1

(\*)  $(0,2 \times 0,2) = 0,04$ , el 20% del modo de fallo multiplicado por el 20% correspondiente a la causa

- La probabilidad de las distintas combinaciones de modo de fallo y causa del sensor de posición, cuya tasa de fallos es de  $67,2592 \cdot 10^{-6}$ , se obtiene suponiendo que es igual de probable que no detecte la presencia de botella como que la detecte cuando no está. Cálculo de  $F$  para modos de fallo y causas relacionados con el sensor de posición.

	Criterio reparto	Observaciones	Probabilidad	Prob. (100%)	F
c11	0,1	(0,2 x 0,5)	0,00000672592	0,000672592	1
c12	0,4	(0,8 x 0,5)	0,00002690368	0,002690368	1
c21	0,1	(0,2 x 0,5)	0,00000672592	0,000672592	1
c22	0,4	(0,8 x 0,5)	0,00002690368	0,002690368	1

Cálculo de  $F$  para modos de fallo y causas relacionados con el actuador, cuya tasa de fallos es  $97,402 \cdot 10^{-6}$ .

	Criterio reparto	Observaciones	Probabilidad	Prob. (100%)	F
d11	0,2		$1,94804 \cdot 10^{-5}$	0,00194804	1
d12	0,8		$7,79216 \cdot 10^{-5}$	0,00779216	2

### Coefficiente de gravedad ( $G$ )

El coeficiente de gravedad ( $G$ ) se ha estimado a partir de los efectos identificados para cada modo de fallo.

Modo de fallo	Coefficiente $G$
a1	6, con degradación y exigencia de cambio
a2	5, degradación del sistema
b1	8, con degradación, afectando a otros sistemas
b2	6, con degradación y exigencia de cambio
b3	8, con degradación, afectando a otros sistemas
c1	6, con degradación y exigencia de cambio
c2	8, con degradación, afectando a otros sistemas
d1	6, con degradación y exigencia de cambio

### Coefficiente de detección

El coeficiente de detección ( $D$ ) se ha calculado para cada combinación de modo de fallo y causa del siguiente modo:

- Fallos de fabricación: no los detectará el cliente, puesto que se realiza una revisión antes ( $D = 1$ ).

- Los fallos del ventilador, una vez se manifiestan, tardan cuatro meses en provocar el modo de fallo. Como las revisiones de mantenimiento son cada año (doce meses), la probabilidad de que, si ocurre el fallo, se haga manifiesto para el cliente es: probabilidad de detección =  $(12 - 4)/12 = 8/12 = 0,66666$ , correspondiéndole un coeficiente de  $D = 8$ .
- Los fallos del caudalímetro y del actuador, una vez se manifiestan provocan el modo de fallo en ocho meses. Por tanto, la probabilidad de detección del cliente es: probabilidad de detección =  $(12 - 8)/12 = 4/12 = 0,333$ , a la que le corresponde un coeficiente de  $D = 4$ .

9) *Cálculo del índice de prioridad de riesgo (IPR) para cada modo de fallo y causa*

A partir de los coeficiente  $F$ ,  $G$  y  $D$ , se calcula el índice IPR mediante el producto de los tres coeficientes.

Función		F	G	D	IPR
a) Dispersar concentración de vapores	a11	1	6	8	48
	a12	1	6	10	60
	a13	1	6	8	48
	a21	1	5	8	40
b) Medir el caudal	b11	1	8	1	8
	b12	1	8	4	32
	b21	1	6	1	6
	b22	1	6	4	24
	b31	1	8	1	8
	b32	1	8	4	32
c) Detectar posición de la botella	c11	1	6	1	6
	c12	1	6	1	6
	c21	1	8	1	8
	c22	1	8	1	8
d) Detener y poner en marcha la cinta transportadora	d11	1	6	1	6
	d12	2	6	4	48

Tabla 3.21. Cálculo de los IPR

10) *Identificación de los modos de fallo más críticos y propuesta de medidas correctoras*

No hay ningún  $IPR > 100$ , pero revisando los resultados obtenidos, los más elevados son el  $a_{12}$ ,  $a_{11}$ ,  $a_{13}$  y  $d_{12}$ , los tres primeros de los cuales se corresponden con los modos de fallo y causas de la función de «dispersar vapores», mientras que el último le corresponde al actuador.

Las posibles medidas correctoras que hay que implantar son:

- Sistema de ventilación basado en aspiración, que no dependa de un movimiento mecánico tan expuesto.

Disminuirá el coeficiente  $F$ , ya que la rotura, atascos y obturaciones ocurrirían con menor probabilidad. En el caso de que este deterioro por el uso necesitara de más tiempo para producirse, podría disminuirse también el coeficiente  $D$ .

- Doble sistema de ventilación: el actual más otro ventilador.

Disminuirá el coeficiente  $F$ , ya que la rotura, atascos y obturaciones ocurrirían con menor probabilidad. En el caso de que este deterioro por el uso necesitara de más tiempo para producirse, podría disminuirse también el coeficiente  $D$ .

- Sustituir el ventilador por uno de mejor calidad.

Disminuirá el coeficiente  $F$ , ya que la rotura, atascos y obturaciones ocurrirían con menor probabilidad. En el caso de que este deterioro por el uso necesitara de más tiempo para producirse, podría disminuirse también el coeficiente  $D$ .

- Revisar el estado del ventilador con mayor frecuencia, por ejemplo, cada seis meses, lo que disminuiría la probabilidad de detección. Dado que, aunque hubiera posibilidad de reducir la probabilidad de ocurrencia, los coeficientes de la  $F$  ya son muy pequeños en el diseño actual (1 y 2), se decide finalmente modificar el periodo de revisión del ventilador de manera que esta se realice cada seis meses.

11) *Cálculo de los nuevos coeficientes F, G y D y el IPR para cada medida correctora*

Con esta medida correctora, disminuye la probabilidad de detección de las combinaciones de modo de fallo y causa  $a_{11}$ ,  $a_{13}$  y  $a_{21}$ . Dado que desde que el ventilador

manifiesta deterioro hasta que se produce el modo de fallo pasan cuatro meses, la probabilidad de detección es: probabilidad de detección =  $(6 - 4) / 6 = 33,3\%$ ,  $D = 4$ .

Función		Medida correctora		F'	G'	D'	IPR'
Dispersar concentración de vapores	a11	Revisar ventilador cada seis meses	a11	1	6	4	24
	a12		a12	1	6	10	60
	a13		a13	1	6	4	24
	a21		a21	1	5	4	20

### 3.4. Caso 3: AMFE panel de calefacción

#### 1) Descripción de la instalación

Se trata de un panel demostrativo de una instalación de calefacción, formado por dos partes. En un lado está la instalación de gas y en el otro, la instalación de calefacción y agua caliente. Ambos lados están conectados.

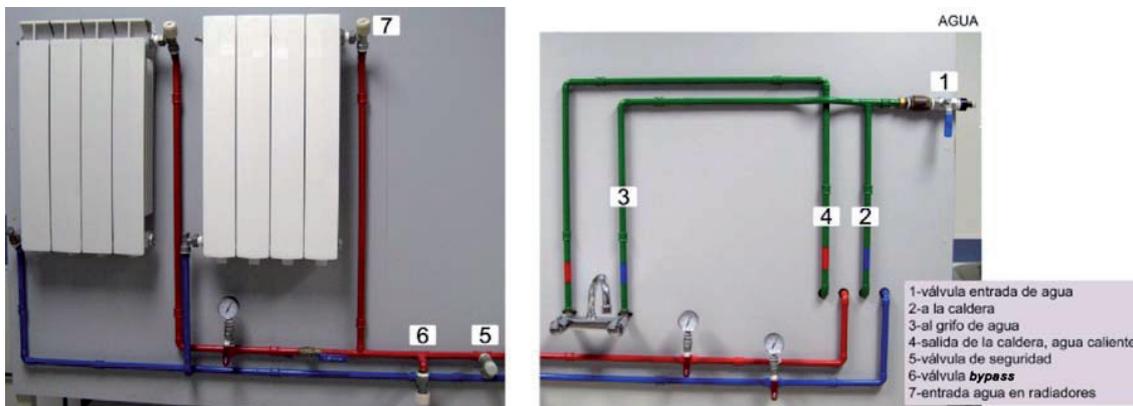


Figura 3.3. Imagen de la instalación de calefacción por radiadores

La instalación se representa de forma esquemática en la siguiente figura:

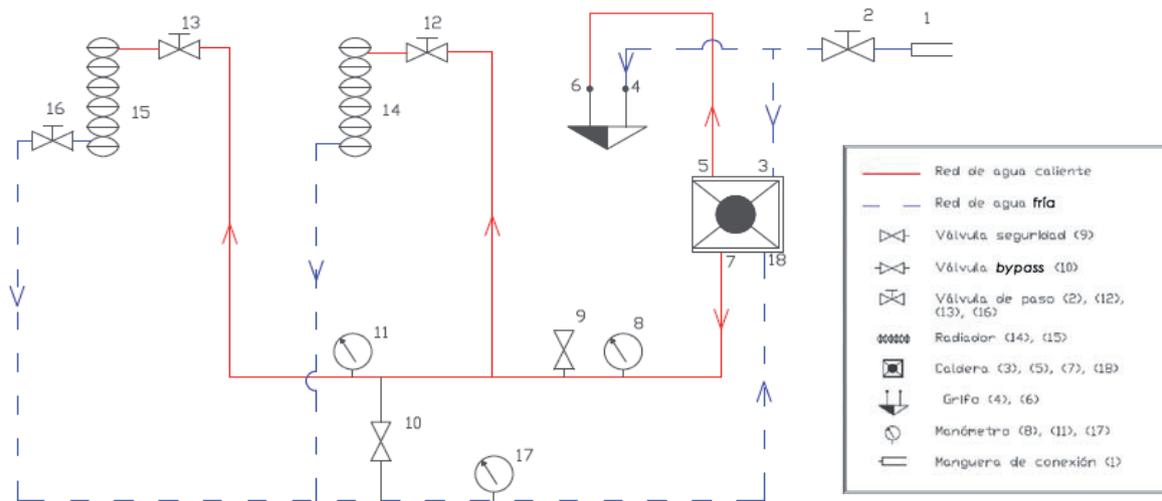


Figura 3.5. Esquema de la instalación de calefacción por radiadores

La instalación funciona de la siguiente manera:

El agua de la red llega a una toma de agua fría a través de una manguera (1) y atraviesa una válvula de paso (2). Parte de esta agua se dirige al grifo de agua fría (4) y el resto, a la caldera (3). Dentro de la caldera el agua se calienta por medio de un sistema de gas y el agua caliente sale de dicha caldera hacia dos lugares: uno es el grifo de agua caliente (circuito abierto) (6), y el otro es un circuito cerrado (7) que alimenta a dos radiadores (14, 15) dispuestos en paralelo. De la salida de los radiadores el agua es conducida de nuevo a la caldera (18), formando así un circuito cerrado. El resto de componentes de este circuito cerrado son:

- Dos válvulas de paso (12, 13) situadas cada una a la entrada de un radiador, con las que se regula el paso de agua hacia estos.
- Tres manómetros en ubicaciones diferentes, uno en la línea que va hacia los radiadores (8), otro en la línea que hay entre radiadores (11), y por último, uno en la línea de retorno hacia la caldera (17). Estos manómetros sirven para medir la presión en estos puntos y así cuantificar las pérdidas de carga en cada tramo.
- Una válvula de seguridad (9) situada en la línea que va hacia los radiadores. Consiste en una válvula de alivio que se abrirá y evacuará agua cuando la presión

suba por encima de un valor prefijado por efecto de altas temperaturas, evitando que entre más agua caliente en los radiadores.

- Una válvula *bypass* (10) que, cuando sea necesario, evacuará agua caliente desde la línea de ida hacia los radiadores hacia la línea de retorno a la caldera, evitando de esta manera que siga entrando agua caliente en los radiadores. Está situada en la línea que va hacia los radiadores y a continuación de la válvula de seguridad.
- Una válvula de paso (16) a la salida de uno de los radiadores, que sirve para inutilizarlo de forma que la instalación funcione con un solo radiador.

Una vez montada toda la instalación se verifica el funcionamiento de esta. A partir de ahí se realizan revisiones con una periodicidad anual. Para los fallos debidos a oxidación se estima que transcurren cinco meses desde que aparece la oxidación hasta que esta provoca el modo de fallo. Las tasas de fallo de los componentes principales son:

Componente	Probabilidad de fallo
a. Válvula de seguridad (9)	$5,44 \cdot 10^{-4}$
b. Válvula de entrada a radiadores (12,13)	$3,57 \cdot 10^{-4}$
c. Manómetro situado en la línea entre radiadores (11)	$2,04 \cdot 10^{-4}$
d. Manguera de conexión en la entrada del agua (1)	$7,05 \cdot 10^{-4}$
e. Radiadores (13,15)	$1,04 \cdot 10^{-3}$

Tabla 3.22. Probabilidades de fallo de los componentes

## 2) Definición del objetivo y alcance

El objetivo de esta práctica es mejorar la fiabilidad de una instalación aplicando el método AMFEC. Los componentes que se van a considerar en el análisis son:

- La válvula de seguridad (9)
- Las válvulas de entrada a los radiadores (12, 13)
- El manómetro situado entre los radiadores (11)
- La manguera (1)
- Los radiadores (13, 15)

### 3) Determinación de funciones

Componente	Función
a. Válvula de seguridad (9)	Evitar sobrepresiones evacuando el agua
b. Válvula de entrada a radiadores (12,13)	Regular el paso de agua a los radiadores
c. Manómetro situado en la línea entre radiadores (11)	Medir la presión
d. Manguera de conexión en la entrada del agua (1)	Conducir agua fría a la instalación
e. Radiadores (13,15)	Disipar el calor del agua al ambiente

Tabla 3.23. Identificación de funciones

### 4) Determinación de modos de fallo de cada función

Componente	Función	Modo fallo
a. Válvula de seguridad (9)	a. Evitar sobrepresiones evacuando el agua	a1. Bloqueada en cerrado a2. Bloqueada en abierto
b. Válvula de entrada a radiadores (12,13)	b. Regular el paso de agua a los radiadores	b1. Bloqueada en abierto b2. Bloqueada en cerrado b3. Parcialmente bloqueada
c. Manómetro situado en la línea entre radiadores (11)	c. Medir la presión	c1. Mide más presión de la que hay c2. Mide menos presión de la que hay c3. No mide presión
d. Manguera de conexión en la entrada del agua (1)	d. Conducir agua fría a la instalación	d1. No conduce el agua hasta la instalación d2. Conduce menos agua de la especificada
e. Radiadores (13,15)	e. Disipar el calor del agua al ambiente	e1. No se disipa calor e2. No se disipa suficiente calor

Tabla 3.24. Determinación de los modos de fallo

### 5) Determinación de causas para cada modo de fallo

Modo de fallo	Causa	Modo de fallo	Causa
a1. Bloqueada en cerrado	a11. Incrustaciones de cal	c1. Mide más presión de la que hay	c11. Defecto de fabricación c12. Avería por el uso
a2. Bloqueada en abierto	a12. Defecto de montaje a21. Rotura del muelle	c2. Mide menos presión de la que hay	c21. Defecto de fabricación c22. Avería por el uso
b1. Bloqueada en abierto	b11. Defecto de fabricación	c3. No mide presión	c31. Defecto de fabricación c32. avería por el uso
b2. Bloqueada en cerrado	b12. Oxidación b21. Defecto de fabricación b22. Oxidación	d1. No conduce el agua hasta la instalación d2. Conduce menos agua de la especificada	d11. Suelta d12. Rota d21. Fugas d22. Obstruida

Modo de fallo	Causa	Modo de fallo	Causa
b3. Parcialmente bloqueada	b31. Obstrucción por impurezas	e1. No se disipa calor	e11. Circuito interno obstruido por impurezas o aire
		e2. No se disipa suficiente calor	e21. Circuito interno parcialmente obstruido e22. Fugas en circuito interno

Tabla 3.25. Determinación de las posibles causas

### 6) Determinación de las formas de detección

Modo de fallo	Detección
a1. Bloqueada en cerrado	a1. Fugas de agua en puntos críticos de la instalación por rotura, los manómetros indicarán altas presiones
a2. Bloqueada en abierto	a2. Consumos elevados de agua y gas. Los manómetros indicarán valores de presión bajos
b1. Bloqueada en abierto	b1. Temperatura superior a las especificaciones, funcionamiento desigual de los radiadores si falla una sola válvula
b2. Bloqueada en cerrado	b2. Temperatura menor a las especificaciones, funcionamiento desigual de los radiadores si falla una sola válvula. Si fallan las dos válvulas y no circula caudal, todos los manómetros medirán lo mismo
b3. Parcialmente bloqueada	b3. Tarda más tiempo del normal en alcanzarse la temperatura. Funcionamiento desigual de los radiadores
c1. Mide más presión de la que hay	c1. Al comparar la medida de los diferentes manómetros, se detectarían incoherencias
c2. Mide menos presión de la que hay	c2. Al comparar la medida de los diferentes manómetros, se detectarían incoherencias. La válvula de seguridad se podría poner en funcionamiento de forma inesperada
c3. No mide presión	c3. El manómetro no indicaría presión alguna
d1. No conduce el agua hasta la instalación	d1. No sale agua del grifo. Charcos de agua
d2. Conduce menos agua de la especificada	d2. Sale menos agua del grifo. Gotas derramadas (si se debe a fugas)
e1. No se disipa calor	e1. Los radiadores permanecen fríos. La presión indicada por los manómetros es la misma.
e2. No se disipa suficiente calor	e2. Temperatura menor a las especificaciones

Tabla 3.26. Determinación de las formas de detección

### 7) Determinación de los efectos sobre otros componentes y sobre el sistema

La siguiente tabla resume los modos de fallo, causas, detección y efectos para cada una de las funciones.

Función	Modo fallo	Causa	Detección	Efectos	
				Otros componentes	Sistema
a. Evitar sobrepresiones evacuando el agua	a1. Bloqueada en cerrado	a1.1. Incrustaciones de cal a1.2. Defecto de montaje	a1. Fugas de agua en puntos críticos de la instalación por rotura. Los manómetros indicarán altas presiones	a1. Sobrepresión en caldera. altas presiones	a1. Sobrepresión en toda la instalación. Peligro de rotura de parte o todo el sistema
	a2. Bloqueada en abierto	a2.1. Rotura del muelle	a2. Consumos elevados de agua y gas. Los manómetros indicarán valores de presión bajos	a2. Mediciones presión por debajo de lo normal en manómetro entre radiadores. Menor caudal circulando por los radiadores. Reposición continua de agua a la caldera	a2. Funcionamiento defectuosos, no se alcanza la temperatura especificada o se hace lentamente
b. Regular el paso de agua a los radiadores	b1. Bloqueada en abierto	b1.1. Defecto de fabricación b1.2. Oxidación	b1. Temperatura superior a las especificaciones. Funcionamiento desigual de los radiadores si falla una sola válvula	b1. Funcionamiento continuo de la válvula de seguridad. Funcionamiento desigual de los radiadores si falla una sola válvula	b1. Temperaturas superiores a las especificadas
	b2. Bloqueada en cerrado	b2.1. Defecto de fabricación b2.2. Oxidación	b2. Temperatura menor a las especificaciones. Funcionamiento desigual de los radiadores si falla una sola válvula. Si fallan las dos válvulas y no circula caudal, todos los manómetros medirán lo mismo	b2. Si falla una válvula, funcionamiento desigual de los radiadores. Si fallan las dos, no trabaja ninguno de los radiadores y los manómetros miden la misma presión	b2. No se alcanza la temperatura especificada
c. Medir la presión	b3. Parcialmente bloqueada	b3.1. Obstrucción por impurezas	b3. Tarda más tiempo del normal en alcanzarse la temperatura. Funcionamiento desigual de los radiadores	b3. Mal funcionamiento de los radiadores	b3. Se tarda más en alcanzar la temperatura especificada
	c1. Mide más presión de la que hay	c1.1. Defecto de fabricación c1.2. Avería por el uso	c1. Al comparar la medida de los diferentes manómetros, se detectarían incoherencias	c1. No se evacuaría agua aun habiendo necesidad de ello	c1. La instalación podría funcionar a más presión de la normal

Función	Modo fallo	Causa	Detección	Efectos	
				Otros componentes	Sistema
	e2. Mide menos presión de la que hay	e21. Defecto de fabricación	e2. Al comparar la medida de los diferentes manómetros, se detectarían incoherencias. La válvula de seguridad se podría poner en funcionamiento de forma inesperada	e2. Funcionamiento inesperado de la válvula de seguridad y sobrepresión en la caldera	e2. La instalación funciona de modo distinto al especificado. Peligro de rotura, fuga y explosión
		e22. Avería por el uso			
	e3. No mide presión	e31. Defecto de fabricación	e3. El manómetro no indicaría presión alguna	e3. Posibilidad de sobrepresión en la caldera	e3. No se conoce cómo está funcionando el sistema. Peligro potencial de rotura, fuga y explosión.
		e32. Avería por el uso			
d. Conducir agua fría a la instalación	d1. No conduce el agua hasta la instalación	d11. Suelta	d1. No sale agua del grifo. Charcos de agua	d1. No se repone el agua de la caldera. No sale agua del grifo	d1. El sistema no realiza su función
		d12. Rota			
	d2. Conduce menos agua de la especificada	d21. Fugas	d2. Sale menos agua del grifo. Gotas derramadas (si se debe a fugas)	d2. Tarda mucho en reponerse el agua. Poco agua al abrir el grifo	
		d22. Obstruida			
e. Disipar el calor del agua al ambiente	e1. No se disipa calor	e11. Circuito interno obstruido por impurezas o aire	e1. Los radiadores permanecen fríos. La presión indicada por los manómetros es la misma	e2. Temperatura menor a las especificaciones	e1. La instalación no realiza su función
		e2. No se disipa suficiente calor			
	e21. No se disipa suficiente calor	e21. Circuito interno parcialmente obstruido	e2. Temperatura menor a las especificaciones	e2. El manómetro de la línea de retorno de la caldera mide muy poca presión	e2. Temperatura obtenida menor a la especificada, o alcanzada más lentamente
		e22. Fugas en circuito interno			

Tabla 3.27. Tabla final del AMFEC

8) *Estimación de la frecuencia de fallo (F), la gravedad (G) y la probabilidad de que el fallo sea detectado (D)*

**Estimación del coeficiente F**

Como sólo se conoce la probabilidad de fallo de cada uno de los componentes, es necesario estimar un criterio de reparto de la probabilidad de fallo del componente entre la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los modos de fallo y causas. Esta estimación se realiza consultando en registros de averías, o en, en su defecto, en base a estimación directa basada en el tipo de fallo.

Para los modos de fallo y causas de la válvula de seguridad, cuya tasa es de  $5,44 \cdot 10^{-6}$ , se ha estimado que cada uno de los modos de fallo tiene la misma probabilidad de ocurrencia, y que en el primer modo de fallo es mucho más habitual que haya incrustaciones de cal que defectos de montaje (75% frente a un 25%). Así, para la combinación a11, la probabilidad de ocurrencia es:  $P_{a11} = 0,5 \times 0,75 \times 5,44 \cdot 10^{-4} = 0,000204113$ .

	Modo fallo	Causa	Probabilidad	Prob. (100%)	F
a11	0,5	0,75	0,000204113	0,02041125	3
a12	0,5	0,25	$6,80 \cdot 10^{-5}$	0,00680375	2
a21	0,5	1	$2,72 \cdot 10^{-4}$	0,027215	3

Para la válvula de control del radiador, cuya tasa es de  $3,57 \cdot 10^{-4}$ , se ha estimado que la mitad de las ocasiones el fallo será parcialmente bloqueado, mientras que los otros dos modos de fallo se reparten la probabilidad por igual. En cuanto a las causas, se considera mucho más probable el fallo ocasionado por oxidación que el debido a defecto de fabricación.

	Modo fallo	Causa	Probabilidad	Prob. (100%)	F
b11	0,25	0,2	$1,79 \cdot 10^{-5}$	0,0017865	1
b12	0,25	0,8	$7,15 \cdot 10^{-5}$	0,007146	2
b21	0,25	0,2	$1,79 \cdot 10^{-5}$	0,0017865	1
b22	0,25	0,8	$7,15 \cdot 10^{-5}$	0,007146	2
b31	0,5	1	$1,79 \cdot 10^{-4}$	0,017865	1

En el caso del manómetro, cuya tasa de fallos es de  $2,04 \cdot 10^{-4}$ , se ha considerado que en el 40% de los casos el fallo consiste en que no se mide presión, mientras que los otros dos fallos tienen la misma probabilidad. En cuanto a las causas, la mayoría de las veces

se trata de alguna avería debida al desgaste por el uso, y sólo en muy pocos casos se trata de defectos de fabricación.

	Modo fallo	Causa	Probabilidad	Prob. (100%)	F
c11	0,3	0,1	$6,11 \cdot 10^{-6}$	0,0006111	1
c12	0,3	0,9	$5,50 \cdot 10^{-5}$	0,0054999	2
c21	0,3	0,1	$6,11 \cdot 10^{-6}$	0,0006111	1
c22	0,3	0,9	$5,50 \cdot 10^{-5}$	0,0054999	2
c31	0,4	0,05	$4,07 \cdot 10^{-6}$	0,0004074	1
c32	0,4	0,95	$7,74 \cdot 10^{-5}$	0,0077406	2

Se considera que la mayoría de las veces que se produce un fallo de la manguera, cuya tasa de fallos es de  $7,05 \cdot 10^{-4}$ , consiste en que conduce menos agua de la que debería (pérdidas).

	Modo fallo	Causa	Probabilidad	Prob. (100%)	F
d11	0,15	0,9	$9,51 \cdot 10^{-5}$	0,00951075	2
d12	0,15	0,1	$1,06 \cdot 10^{-5}$	0,00105675	1
d21	0,85	0,5	$2,99 \cdot 10^{-4}$	0,02994125	3
d22	0,85	0,5	$2,99 \cdot 10^{-4}$	0,02994125	3

El fallo más frecuente de los radiadores, cuya tasa de fallos es de  $1,04 \cdot 10^{-3}$ , es que calientan menos de lo que deberían. Además, para este fallo se considera que es más probable que la causa sean las fugas que las obstrucciones de aire.

	Modo fallo	Causa	Probabilidad	Prob. (100%)	F
e11	0,2	1	$2,08 \cdot 10^{-4}$	0,02078	3
e21	0,8	0,3	$2,49 \cdot 10^{-4}$	0,024936	3
e22	0,8	0,7	$5,82 \cdot 10^{-4}$	0,058184	4

## Estimación del coeficiente $G$

El coeficiente  $G$  de gravedad se ha asignado en función de los efectos.

Modo de fallo	$G$
a1	10, afecta a la seguridad, sin previo aviso
a2	6, con degradación y exigencia de cambio
b1, b2 y b3	6, con degradación y exigencia de cambio
c11, c2 y c3	1, imperceptible
d11	6, con degradación y exigencia de cambio
d21	5, degradación del sistema
e11	6, con degradación y exigencia de cambio
e21	4, predispone negativamente al cliente

## Estimación del coeficiente $D$

Para las combinaciones de modo de fallo y causa debidas a defectos de fabricación, la probabilidad de detección del cliente es nula, puesto que se comprueba el correcto funcionamiento del sistema una vez instalado, por lo que el coeficiente es  $D = 1$ .

Para los fallos debidos a oxidación ( $b11$  y  $b22$ ), la probabilidad de detección del cliente es:  $P_{\text{detección}} = (12 - 5)/12 = 0,58$ , es decir, un 58%. Por tanto, el valor del coeficiente es  $D = 7$ .

La probabilidad de detección del resto de fallos es del 100%, por lo que el valor del coeficiente es  $D = 10$ .

### 9) Cálculo del índice de prioridad de riesgo (IPR) para cada modo de fallo y causa

La siguiente tabla resume el valor de los coeficientes y del IPR. Como puede observarse, hay varias combinaciones de modo de fallo y causa cuyo IPR es mayor de 100. Por tanto, las mejoras de la instalación tendrían que estar encaminadas a la reducción de dichos IPR.

	F	G	D	IPR
a11	3	10	10	300
a12	2	10	1	20
a21	3	6	10	180
b11	1	6	1	6

	F	G	D	IPR
c22	2	1	10	20
c31	1	1	1	1
c32	2	1	10	20
d11	2	6	10	120

	F	G	D	IPR
b12	2	6	7	84
b21	1	6	1	6
b22	2	6	7	84
b31	1	6	10	60
c11	1	1	1	1
c12	2	1	10	20
c21	1	1	1	1

	F	G	D	IPR
d12	1	6	10	60
d21	3	5	10	150
d22	3	5	10	150
e11	3	6	10	180
e21	3	4	10	120
e22	4	4	10	160

Tabla 3.28. Cálculo de los índices IPR

10) *Identificación de los modos de fallo más críticos y propuesta de medidas correctoras*

Para aquellos modos de fallo cuyo IPR es mayor a 100, se proponen medidas correctoras y se calculan los nuevos coeficientes  $F'$ ,  $G'$  y  $D'$ .

**Medidas para los modos de fallo a1 y a2:**

Se propone añadir una segunda válvula de seguridad, idéntica a la existente y colocada en serie con esta, de forma que para que se produzca un fallo, sea necesario que fallen las dos simultáneamente.

Valor de  $F'$ . Con esta medida, la probabilidad de ocurrencia sería  $5,44 \cdot 10^{-4} \times 5,44 \cdot 10^{-4} = 2,96 \cdot 10^{-7}$ , por lo que los nuevos valores de la  $F'$  para las combinaciones de modo de fallo y causa de la función realizada por la válvula de seguridad, son los que se indican en la siguiente tabla. A modo de ejemplo, la probabilidad de a11 sería  $0,5 \times 0,75 \times 2,96 \cdot 10^{-7} = 1,11 \cdot 10^{-7}$ .

	Modo fallo	Causa	Probabilidad	Prob. (100%)	F'
a11	0,5	0,75	$1,11 \cdot 10^{-7}$	$1,11098 \cdot 10^{-5}$	1
a12	0,5	0,25	$3,70 \cdot 10^{-8}$	$3,70328 \cdot 10^{-6}$	1
a21	0,5	1	$1,48 \cdot 10^{-7}$	$1,48131 \cdot 10^{-5}$	1

Valor de  $G'$  y  $D'$ . Los coeficientes  $G$  y  $D$  no se modifican al implantar esta medida.

### Medidas para los modos de fallo $d1$ y $d2$ :

- Para reducir el IPR en el caso de la manguera, se propone modificar el diseño del sistema de sujeción de esta a la toma de agua de la instalación, o bien colocar una brida de seguridad.  
Valor de  $F'$ . Con cualquiera de ambas medidas se prevé reducir la probabilidad de ocurrencia de la combinación  $d11$ , probabilidad =  $4 \cdot 10^{-6}$ .  $Fd11 = 3 \rightarrow F' d11 = 1$ .
- Sustituir el material de la manguera por otro de mayor calidad, en el que la probabilidad de fugas se reduzca. El impacto de esta mejora dependerá de las características concretas del material seleccionado, por lo que en este análisis se estima cualitativamente que la probabilidad de ocurrencia disminuirá, al menos, hasta reducir en un punto el valor de  $F$ .  $Fd21 = 3 \rightarrow F' d21 = 2$ .
- Implantar un programa de mantenimiento de la manguera de manera que se limpien las impurezas periódicamente. Con esta medida se estima que la probabilidad de detección se reduzca considerablemente, probablemente en más de la mitad de las ocasiones que en la situación actual, por lo que el coeficiente  $D$  se reduciría.  $Dd22 = 10 \rightarrow D' d22 = 5$ .

### Medidas para los modos de fallo $e1$ y $e2$ :

- Programa de mantenimiento periódico del radiador, de manera que se controlen las impurezas y la formación de fugas. Este mantenimiento se realizaría cada tres meses, por lo que, considerando que desde que su funcionamiento empieza a alterarse hasta que se produce el modo de fallo pasan aproximadamente dos meses, con lo cual la probabilidad de detección  $D'$  sería:  $\frac{3-2}{3} = 0,33$ .  $De11, e21, e22 = 10 \rightarrow D' = 5$ .

11) *Esquema de la instalación mejorada*

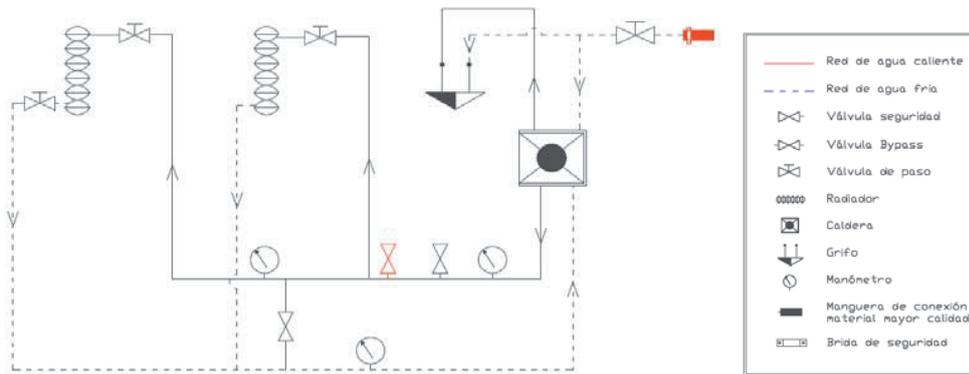


Figura 3.5. Esquema de la instalación mejorada

12) *Cálculo de los nuevos coeficientes F', G' y D' y el IPR' para cada medida correctora*

La siguiente tabla resume cómo quedarían los nuevos IPR' con las medidas correctoras implantadas. Como puede observarse, con las mejoras indicadas todos los IPR' se quedarían por debajo de 100.

	F	G	D	IPR	Medidas correctoras	F'	G'	D'	IPR'
a11	3	10	10	300	Segunda válvula en serie	1	10	10	100
a12	2	10	1	20		1	10	1	10
a21	3	6	10	180		1	6	10	60
b11	1	6	1	6		1	6	1	6
b12	2	6	7	84		2	6	7	84
b21	1	6	1	6		1	6	1	6
b22	2	6	7	84		2	6	7	84
b31	1	6	10	60		1	6	10	60
c11	1	1	1	1		1	1	1	1
c12	2	1	10	20		2	1	10	20
c21	1	1	1	1		1	1	1	1
c22	2	1	10	20		2	1	10	20
c31	1	1	1	1		1	1	1	1
c32	2	1	10	20		2	1	10	20
d11	2	6	10	120	Sistema sujeción	1	6	10	60
d12	1	6	10	60		1	6	10	60
d21	3	5	10	150	Material manguera	2	5	10	100
d22	3	5	10	150	Revisiones	3	5	5	75
e11	3	6	10	180	Revisiones	3	6	5	90
e21	3	4	10	120	Revisiones	3	4	5	60
e22	4	4	10	160	Revisiones	4	4	5	80

Tabla 3.29. IPR de la instalación mejorada

### 3.5. Caso 4: AMFE calefacción con placas solares

#### 1) Descripción de la instalación

La instalación consta de unos captadores solares planos situados en una zona exterior totalmente adecuada para su uso, libre de sombras y orientada hacia el sur. La instalación cuenta, además, con una red de distribución hidráulica que reparte la energía captada por los colectores hacia el acumulador de calefacción y el acumulador de calor para agua caliente sanitaria.

Los acumuladores son depósitos de acero vitrificado adecuadamente aislados para evitar pérdidas de calor. Para el funcionamiento automático de la instalación, esta dispone de un regulador térmico diferencial que controla y compara la temperatura en el interior de los captadores solares con la de los acumuladores. La bomba de circulación B1 del circuito hace circular el fluido caloportador por el circuito, de manera que el calor es transportado desde el sistema captador hacia el acumulador solar. La bomba va equipada con una válvula antirretorno que impide que en caso de parada de la bomba el fluido invierta la dirección de su circulación. Finalmente, en caso de demanda de calefacción en el interior de la vivienda, el agua que ha sido calentada en el acumulador mediante un intercambio de calor circula hacia el radiador, que será el encargado de transmitir dicho calor al interior de la vivienda.

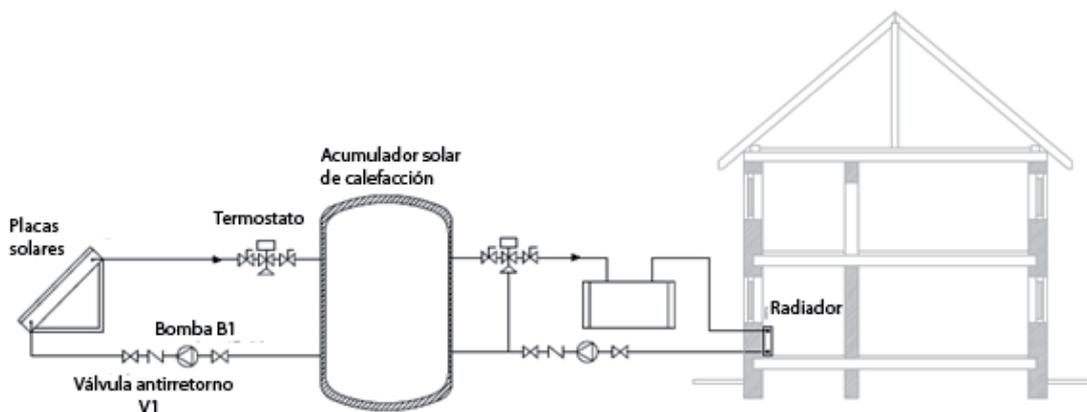


Figura 3.6. Esquema de la instalación

## 2) *Definición del objetivo y alcance*

Elaborar un análisis modal de fallos y efectos que permita establecer cuáles son las principales limitaciones de la instalación atendiendo a una serie de elementos predeterminados de la instalación, y cuáles serían las mejores medidas correctoras que deberían adoptar.

Los elementos que hay que analizar son los siguientes:

- Placas solares
- Termostato
- Acumulador de calor
- Radiador
- Válvula antirretorno V1
- Bomba B1

## 3) *Determinación de funciones de cada uno de los componentes*

Componente	Función
Placas solares	a. Captar energía solar y transmitirla al fluido caloportador
Termostato	b. Controlar la diferencia de temperatura y enviar señal de accionamiento o parada de la bomba
Acumulador	c. Transmitir calor del fluido al agua y almacenar calor
Radiador	d. Transmitir calor al ambiente
Válvula antirretorno	e. Impedir el retorno de fluido cuando la bomba para
Bomba B1	f. Impulsar el fluido caloportador en el circuito primario, desde las placas al acumulador y viceversa

Tabla 3.30. Determinación de las funciones

## 4) *Determinación de modos de fallo de cada función*

Componente	Función	Modo de fallo
Placas solares:	a. Captar energía solar y transmitirla al fluido caloportador	a1. Captación de energía solar deficiente a2. No capta energía solar
Termostato	b. Controlar la diferencia de temperatura y enviar señal de accionamiento o parada de la bomba	b1. No da señal de activación a la bomba cuando $T_{\text{fluido}} < T_{\text{deseada}}$ b2. No da señal de parada a la bomba cuando $T_{\text{fluido}} > T_{\text{deseada}}$
Acumulador	c. Transmitir calor del fluido al agua y almacenar calor	c1. No almacena suficiente agua c2. No calienta el agua
Radiador	d. Transmitir calor al ambiente	d1. El radiador no transfiere calor al ambiente d2. El radiador transfiere menos calor del que debe al ambiente

Componente	Función	Modo de fallo
Válvula antirretorno	e. Impedir el retorno de fluido cuando la bomba para	e1. No impide el retorno de fluido e2. No deja pasar fluido
Bomba B1	f. Impulsar el fluido caloportador en el circuito primario, desde las placas al acumulador y viceversa	f1. Bomba no impulsa fluido cuando recibe señal del termostato f2. Bomba continua impulsando fluido cuando recibe señal de parada del termostato de parada

Tabla 3.31. Determinación de los modos de fallo

### 5) Determinación de causas para cada modo de fallo

Modo de fallo	Causas
a1. Captación de energía solar deficiente a2. No capta energía solar	a11. Desgaste de material debido a envejecimiento de la placa a21. Rotura de células de la placa por exposición a la intemperie (inclemencias del tiempo, vandalismo)
b1. No da señal de activación a la bomba cuando $T_{\text{fluido}} < T_{\text{deseada}}$ b2. No da señal de parada a la bomba cuando $T_{\text{fluido}} > T_{\text{deseada}}$	b11. Detector del termostato estropeado b12. Envío de señal errónea b21. Detector del termostato estropeado b22. Envío de señal errónea
c1. No almacena suficiente agua c2. No calienta el agua	c11. Fugas en calderón c21. Obstrucción del serpentín interno por el que circula el fluido caloportador c22. Fugas en serpentín
d1. El radiador no transfiere calor al ambiente d2. El radiador transfiere menos calor del que debe al ambiente	d12. Obstrucción debido a formación de bolsas de aire en el radiador o por incrustaciones de cal d21. Fugas en radiador
e1. No impide el retorno de fluido e2. No deja pasar fluido	e11. Válvula bloqueada en abierto e12. Defecto de fabricación e21. Válvula bloqueada en cerrado e22. Defecto de fabricación
f1. Bomba no impulsa fluido cuando recibe señal del termostato	f11. Obstrucción en la aspiración de la bomba f12. Avería motor bomba f13. Fallo en conexiones de la bomba con el termostato f14. Fallo en las conexiones de la bomba con el motor
f2. Bomba continua impulsando fluido cuando recibe señal de parada del termostato de parada	f21. Fallo en la conexión con el termostato

Tabla 3.32. Posibles causas de cada modo de fallo

## 6) Determinación de las formas de detección

Modo de fallo	Detección
a1. Captación de energía solar deficiente	a1. No llega calor al acumulador y, por tanto, al radiador
a2. No capta energía solar	a2. No llega calor al acumulador y, por tanto, al radiador
b1. No da señal de activación a la bomba cuando $T_{\text{fluido}} < T_{\text{deseada}}$	b1. No llegará calor al acumulador y, por tanto, al radiador
b2. No da señal de parada a la bomba cuando $T_{\text{fluido}} > T_{\text{deseada}}$	b2. Bomba siempre en funcionamiento. Aumento del consumo eléctrico
c1. No almacena suficiente agua	c1. Charco de agua en inmediaciones del calderín
c2. No calienta el agua	c2. No llega calor al radiador cuando se necesita
d1. El radiador no transfiere calor al ambiente	d1. El ambiente no se calienta cuando es necesario
d2. El radiador transfiere menos calor del que debe al ambiente	d2. Charco de agua junto al radiador
e1. No impide el retorno de fluido	e1. Ruido por impacto de fluido con la bomba
e2. No deja pasar fluido	e2. Excesivo calentamiento de la bomba
f1. Bomba no impulsa fluido cuando recibe señal del termostato	f1. No se oye ruido de funcionamiento de la bomba
f2. Bomba continua impulsando fluido cuando recibe señal de parada del termostato de parada	f2. Sobrecalentamiento de la bomba y aumento del consumo eléctrico

Tabla 3.33. Determinación de las formas de detección

## 7) Determinación de los efectos sobre otros componentes y sobre el sistema

Modo de fallo	Efectos	
	Otros componentes	Sistema
a1. Captación de energía solar deficiente		a1. El sistema no realiza correctamente su función
a2. No capta la energía solar		a2. El sistema no realiza correctamente su función
b1. No da señal de activación a la bomba cuando $T_{\text{fluido}} < T_{\text{deseada}}$		b1. El ambiente no se caldea cuando es necesario
b2. No da señal de parada a la bomba cuando $T_{\text{fluido}} > T_{\text{deseada}}$	b2. Desgaste prematuro de la bomba por funcionamiento prolongado. Calentamiento bomba	
c1. No almacena suficiente agua		c1. El sistema no realiza correctamente su función
c2. No calienta el agua		c2. El sistema no realiza correctamente su función
d1. El radiador no transfiere calor al ambiente		d1. El sistema no realiza correctamente su función
d2. El radiador transfiere menos calor del que debe al ambiente		d2. El sistema no realiza correctamente su función
e1. No impide el retorno de fluido	e1. Rotura de la bomba por impacto de fluido	e1. El sistema no realiza correctamente su función

Modo de fallo	Efectos	
	Otros componentes	Sistema
e2. No deja pasar fluido	e2. El fluido caloportador no circula por el circuito. Calentamiento bomba	
f1. Bomba no impulsa fluido cuando recibe señal del termostato		f1. No se calienta el ambiente
f2. Bomba continua impulsando fluido cuando recibe señal de parada del termostato de parada		

Tabla 3.34. Determinación de los efectos

8) *Estimación de la frecuencia de fallo F, la gravedad G y la probabilidad de que el fallo sea detectado D*

**Estimación de F:**

Para la determinación del coeficiente de frecuencia de fallo, coeficiente  $F$ , se necesita conocer la probabilidad de fallo de cada uno de los componentes. Para ello, se han tenido en cuenta las probabilidades aportadas por la base de datos RIAC. Las probabilidades encontradas para cada uno de los componentes objeto de estudio son:

Suceso	Probabilidad
Fallo de placa solar	$1,07 \cdot 10^{-8}$
Fallo del termostato	$1,32795 \cdot 10^{-5}$
Fallo del acumulador de calor	$5,93620 \cdot 10^{-5}$
Fallo del radiador	$1,03926 \cdot 10^{-5}$
Fallo de la válvula antirretorno v1	$6,6439 \cdot 10^{-6}$
Fallo de la bomba	$2,76458 \cdot 10^{-5}$

Conocida la tasa de fallos, habrá que repartir el peso de cada uno sobre las diferentes causas de fallo de un determinado elemento:

Placas solares: se supondrá que el 40% de las veces el fallo es debido a rotura por explosión a la intemperie y el 60%, debido a desgaste del material.

Termostato: los modos de fallo tienen la misma probabilidad (50%). Además, el 70% de las veces el fallo se debe a que no se detecta la señal y el 30% de las veces, a que el envío de señal es erróneo.

Acumulador: el 80% de las veces el fallo se deberá a fugas en el calderín, el 10%, a obstrucción del serpentín y el otro 10%, a fugas en el serpentín.

Radiador: el 90% de las veces el fallo será debido a obstrucción debido a formación de bolsas de aire en el radiador y el 10%, debido a fugas en el radiador.

Válvula antirretorno: el 45% de las veces el fallo es debido a que la válvula se queda bloqueada en abierto, otro 45% de las veces, a que la válvula se queda bloqueada en cerrado, un 5% de las veces el fallo es debido a un defecto de fabricación que no impide el retorno de fluido y el otro 5%, a un defecto de fabricación que no deja pasar fluido.

Bomba: el 10% de las veces el fallo se debe a una obstrucción en la aspiración de la bomba, el 50% de las veces, a una avería del motor, el 20% de las veces, a una mala conexión con el termostato y el 20% restante, a una mala conexión con el motor. Cuando no se conecta bien con el termostato, la mitad de las veces provoca que la bomba no impulse fluido y la mitad de las veces continúa impulsando fluido.

- Cálculo del coeficiente de frecuencia de fallo para la placa solar

$$\text{Porcentaje de fallo de la placa solar} = 1,07 \cdot 10^{-6}\%$$

$$a_{11}: 1,07 \cdot 10^{-6} \cdot 0,6 = 0,000000642, F = 1$$

$$a_{21}: 1,07 \cdot 10^{-6} \cdot 0,4 = 0,000000428, F = 1$$

- Cálculo del coeficiente de frecuencia de fallo para el termostato

$$\text{Porcentaje de fallo del termostato} = 1,32795 \cdot 10^{-3}\%$$

$$b_{11}: 1,32795 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7 \cdot 0,5 = 0,000465; F = 1$$

$$b_{12}: 1,32795 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3 \cdot 0,5 = 0,000199; F = 1$$

$$b_{21}: 1,32795 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7 \cdot 0,5 = 0,000465; F = 1$$

$$b_{22}: 1,32795 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3 \cdot 0,5 = 0,000199; F = 1$$

- Cálculo del coeficiente de frecuencia de fallo para el acumulador

$$\text{Porcentaje de fallo del acumulador de calor} = 5,93620 \cdot 10^{-3}\%$$

$$c_{11}: 5,93620 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 = 0,00475; F = 1$$

$$c_{21}: 5,93620 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 = 0,00059; F = 1$$

$$c_{22}: 5,93620 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 = 0,00059; F = 1$$

$$\text{Porcentaje de fallo del radiador} = 1,03926 \cdot 10^{-3}\%$$

$$d12: 1,03926 \cdot 10^{-3} \cdot 0,9 = 0,000935; F = 1$$

$$d21: 1,03926 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 = 0,0001; F = 1$$

- Cálculo del coeficiente de frecuencia de fallo para la válvula antirretorno

$$\text{Porcentaje de fallo de la válvula antirretorno } v1 = 6,6439 \cdot 10^{-3}\%$$

$$e11: 6,6439 \cdot 10^{-3} \cdot 0,45 = 0,0066; F = 2$$

$$e12: 6,6439 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 \cdot 0,5 = 0,00033; F = 1$$

$$e21: 6,6439 \cdot 10^{-3} \cdot 0,45 = 0,0066; F = 2$$

$$e22: 6,6439 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 \cdot 0,5 = 0,00033; F = 1$$

- Cálculo del coeficiente de frecuencia de fallo para la bomba

$$\text{Porcentaje de fallo de la bomba: } 2,76458 \cdot 10^{-3}\%$$

$$f11: 2,76458 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 = 0,000276; F = 1$$

$$f12: 2,76458 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 = 0,00138; F = 1$$

$$f13: 2,76458 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2 \cdot 0,5 = 0,000276; F = 1$$

$$f14: 2,76458 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2 = 0,00055; F = 1$$

$$f21: 2,76458 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2 \cdot 0,5 = 0,000276; F = 1$$

### Estimación de G:

- Cálculo del coeficiente de gravedad para la placa solar

*a1*: Captación de energía solar deficiente. Se considera que si el producto está degradado, el cliente exigirá un cambio o reparación, luego,  $G = 6$ .

*a2*: No capta energía solar. El producto se degrada y exige una reparación costosa,  $G = 7$ .

- Cálculo del coeficiente de gravedad para el termostato

*b1*: El termostato no da señal de activación a la bomba cuando  $T_{\text{fluido}} < T_{\text{deseada}}$ . Esta situación puede predisponer negativamente al cliente, luego  $G = 4$ .

*b2*: El termostato no da señal de parada a la bomba cuando  $T_{\text{fluido}} > T_{\text{deseada}}$ . Puede haber degradación del producto, y afectan a otros productos, como la bomba, que estará continuamente en funcionamiento,  $G = 8$ .

- Cálculo del coeficiente de gravedad para el acumulador
  - c1*: El acumulador no almacena suficiente agua. Predispone negativamente al cliente, ya que es posible que no disponga del agua caliente demandada,  $G = 4$ .
  - c2*: El acumulador no calienta el agua, con degradación del producto y exigencia de cambio/reparación por el cliente,  $G = 6$ .
- Cálculo del coeficiente de gravedad para el radiador
  - d1*: El radiador no transfiere calor al ambiente. Degradación del producto y reparación costosa,  $G = 7$ .
  - d2*: El radiador transfiere menos calor del que debe al ambiente. Degradación del producto y queja del cliente,  $G = 5$ .
- Cálculo del coeficiente de gravedad para la válvula antirretorno
  - e1*: La válvula no impide el retorno de fluido, con degradación del producto, afectando a otros productos por ejemplo la bomba,  $G = 8$ .
  - e2*: La válvula no deja pasar fluido. Afecta a la seguridad, con aviso previo,  $G = 9$ .
- Cálculo del coeficiente de gravedad para la bomba
  - f1*: La bomba no impulsa fluido cuando recibe señal del termostato. Degradación del producto y exigencia de cambio/reparación por el cliente,  $G = 6$ .
  - f2*: La bomba continua impulsando fluido cuando recibe seña de parada del termostato de parada. Degradación del producto y reparación costosa,  $G = 7$ .

### **Estimación de *D*:**

- Cálculo del coeficiente de detección para la placa solar
  - a11*: Captación de energía deficiente por desgaste de material debido a envejecimiento de la placa,  $D = 10$ . Probabilidad muy elevada de que el defecto llegue al cliente.
  - a21*: Exposición a la intemperie (inclemencias del tiempo, vandalismo),  $D = 10$ . Probabilidad muy elevada de que el defecto llegue al cliente.
- Cálculo del coeficiente de detección para el termostato

*b11*: Detector del termostato estropeado,  $D = 10$ . Probabilidad muy elevada de que el defecto llegue al cliente.

*b12*: Envío de señal errónea,  $D = 10$ . Probabilidad muy elevada de que el defecto llegue al cliente.

*b21*: Detector del termostato estropeado,  $D = 10$ . Probabilidad muy elevada de que el defecto llegue al cliente.

*b22*: Envío de señal errónea,  $D = 10$ . Probabilidad muy elevada de que el defecto llegue al cliente.

– Cálculo del coeficiente de detección para el acumulador

*c11*: Fugas en calderín,  $D = 10$ . Probabilidad muy elevada de que el defecto llegue al cliente.

*c21*: Obstrucción del serpentín interno por el que circula el fluido caloportador. Probabilidad muy elevada de que el defecto llegue al cliente,  $D = 10$ .

*c22*: Fugas en serpentín. Probabilidad muy elevada de que el defecto llegue al cliente,  $D = 10$ .

– Cálculo del coeficiente de detección para el radiador

*d12*: Obstrucción debido a formación de bolsas de aire en el radiador o por incrustaciones de cal,  $D = 10$ . Probabilidad muy elevada de que el defecto llegue al cliente.

*d22*: Fugas en radiador,  $D = 10$ . Probabilidad muy elevada de que el defecto llegue al cliente.

– Cálculo del coeficiente de detección para la válvula antirretorno

*e11*: Válvula bloqueada en abierto,  $D = 10$ . Probabilidad muy elevada de que el defecto llegue al cliente.

*e12*: Defecto de fabricación,  $D = 1$ . Probabilidad remota de que el defecto llegue al cliente. Sería poco razonable que un defecto no fuese detectado durante la inspección, prueba o montaje (dificultad de montaje).

*e21*: Válvula bloqueada en cerrado,  $D = 10$ . Probabilidad muy elevada de que el defecto llegue al cliente.

e22: Defecto de fabricación,  $D = 1$ . Probabilidad remota de que el defecto llegue al cliente. Sería poco razonable que un defecto no fuese detectado durante la inspección, prueba o montaje (dificultad de montaje).

– Cálculo del coeficiente de detección para la bomba

f11: Obstrucción en la aspiración de la bomba,  $D = 10$ . Probabilidad muy elevada de que el defecto llegue al cliente.

f12: Avería motor bomba,  $D = 10$ . Probabilidad muy elevada de que el defecto llegue al cliente.

f13: Fallo en conexiones de la bomba con el termostato,  $D = 10$ . Probabilidad muy elevada de que el defecto llegue al cliente.

f14: Fallo en las conexiones de la bomba con el motor,  $D = 10$ . Probabilidad muy elevada de que el defecto llegue al cliente.

f21: Fallo en la conexión con el termostato,  $D = 10$ . Probabilidad muy elevada de que el defecto llegue al cliente.

#### 9) Cálculo del índice de prioridad de riesgo (IPR) para cada modo de fallo y causa

	F	G	D	IPR
a11	1	6	10	60
a21	1	7	10	70
b11	1	4	10	40
b12	1	4	10	40
b21	1	8	10	80
b22	1	8	10	80
c11	1	4	10	40
c21	1	6	10	60
c22	1	6	10	60
d12	1	7	10	70
d21	1	5	10	50

	F	G	D	IPR
e11	2	8	10	160
e12	1	8	1	8
e21	2	9	10	180
e22	1	9	1	9
f11	1	6	10	60
f12	1	6	10	60
f13	1	6	10	60
f14	1	6	10	60
f21	1	7	10	70

Tabla 3.35. Cálculo de los IPR

10) *Identificación de los modos de fallo más críticos y propuesta de medidas correctoras*

Los modos de fallo más críticos son los que han superado un valor de 100, en este caso corresponden a fallos en la válvula antirretorno, concretamente a las combinaciones de modo de fallo y causa siguientes:

$$e11: IPR = 2 \cdot 8 \cdot 10 = 160$$

$$e21: IPR = 2 \cdot 9 \cdot 10 = 180$$

Para reducir el IPR de  $e21$ , una solución podría ser instalar un detector de temperatura en la bomba, que en caso de excesivo calentamiento detenga el funcionamiento hasta que se restablezca el estado de la válvula o se sustituya por otra. Con esta medida el coeficiente de gravedad se reduciría a  $G=4$ . El IPR final sería  $IPR'e21 = 2 \times 4 \times 10 = 80$ .

Para reducir el IPR de  $e11$  habría que introducir una válvula adicional en serie, de manera que en el caso de que la válvula  $v1$  no realizara su función, esto es, que el fluido pudiera retornar, habría una válvula más ( $v2$ ) que impediría que un flujo inverso llegara a la bomba y la deteriorara. En este caso, la probabilidad de que se produjera el modo de fallo  $e11$  sería la probabilidad de que las válvulas  $v1$  y  $v2$  se quedaran bloqueadas en abierto simultáneamente, permitiendo un flujo inverso que podría alcanzar la bomba.

Probabilidad  $e11 = 0,0066 \times 0,0066 = 0,00004356$ , por lo que  $F'e11 = 1$ .

El IPR final sería  $IPR'e11 = 1 \times 8 \times 10 = 80$ .

Producto: instalación de calefacción con placas solares

FECHA:

Función	Modo fallo	Causa	Detección	Efectos		F	G	D	IPR	Medida correctora	F'	G'	D'	IPR'
				Otros componentes	Sistema									
a. Placas solares: captar energía solar y transmitir-la al fluido calor- portador	a1. Captación de energía solar deficiente	a11. Desgaste de material debido a envejecimiento de la placa	a1. No llega calor al acumulador y, por tanto, al radiador		a1. El sistema no realiza correctamente su función	1	6	10	60					
	a2. No capta energía solar	a21. Rotura placa por exposición a la intemperie (inclemencias del tiempo, vandalismo)	a2. No llega calor al acumulador y, por tanto, al radiador		a2. El sistema no realiza correctamente su función	1	7	10	70					
b. Termostato: controlar la diferencia de temperatura y enviar señal de accionamiento o parada de la bomba	b1. No da señal de activación a la bomba	b11. Detector del termostato estropeado b12. Envío de señal errónea	b1. No llegará calor al acumulador y, por tanto, al radiador		b1. El ambiente no se caldea cuando es necesario	1	4	10	40					
	b2. no da señal de parada a la bomba cuando Tfluido > Tdesecada	b21. Detector del termostato estropeado b22. Envío de señal errónea	b2. Bomba siempre en funcionamiento. Aumento del consumo eléctrico	b2. Desgaste prematuro de la bomba por funcionamiento prolongado. Calentamiento bomba		1	8	10	80					
c. Acumulador: transmitir calor del fluido al agua y almacenar calor	c1. No almacena suficiente agua	c11. Fugas en calderín	c1. Charco de agua en inmediaciones del calderín		c1. El sistema no realiza correctamente su función	1	4	10	40					
	c2. No calienta el agua	c21. Obstrucción del serpentín interno por el que circula el fluido c22. Fugas en serpentín	c2. No llega calor al radiador cuando se necesita		c2. El sistema no realiza correctamente su función	1	6	10	60					

Producto: instalación de calefacción con placas solares

FECHA:

Función	Modo fallo	Causa	Detección	Efectos		F	G	D	IPR	Medida correctora	F'	G'	D'	IPR'										
				Otros componentes	Sistema																			
d. Radiador: transmitir calor al ambiente	d1. El radiador no transmite calor al ambiente	d12. Obstrucción debido a formación de bolsas de aire en el radiador o por incrustaciones de cal	d1. El ambiente no se calienta cuando es necesario		d1. El sistema no realiza correctamente su función	1	7	10	70															
		d21. Fugas en radiador													d2. Charco de agua junto al radiador	d2. El sistema no realiza correctamente su función	1	5	10	50				
e. Válvula antirretorno: impedir el retorno de fluido cuando la bomba para	e1. No impide el retorno de fluido	e11. Válvula bloqueada en abierto	e1. Ruido por impacto de fluido con la bomba	e1. Rotura de la bomba por impacto de fluido	e1. El sistema no realiza correctamente su función	2	8	10	160	1	8	10	80											
		e12. Defecto de fabricación													e2. Excesivo calentamiento de la bomba	e2. El fluido caloportador no circula por el circuito. Calentamiento bomba	1	8	1	8				
		e21. Válvula bloqueada en cerrado													e2. Excesivo calentamiento de la bomba		2	9	10	180	2	4	10	80
		e22. Defecto de fabricación																						
f. Bomba: impulsar el fluido calor portador en el circuito primario, desde las placas al acumulador y viceversa	f1. Bomba no impulsa fluido cuando recibe señal del termostato	f11. Obstrucción en la aspiración de la bomba	f1. No se oye ruido de funcionamiento de la bomba		f1. No se calienta el ambiente	1	6	10	60															
		f12. avería motor bomba													1	6	10	60						
		f13. Fallo en conexiones de la bomba con el termostato																						
		f14. Fallo en las conexiones de la bomba con el motor																						

AMFE														
EQUIPO:														
Producto: instalación de calefacción con placas solares														
Función	Modo fallo	Causa	Detección	Efectos		F	G	D	IPR	Medida correctora	F'	G'	D'	IPR'
				Otros componentes	Sistema									
	f2. Bomba continúa impulsando fluido cuando recibe señal	f21. Fallo en la conexión con el termostato	f2. Sobre- calentamiento de la bomba. Aumento consumo eléctrico			1	7	10	70					

Tabla 3.36. Tabla final del AMFEC

11) *Esquema de la instalación mejorada*

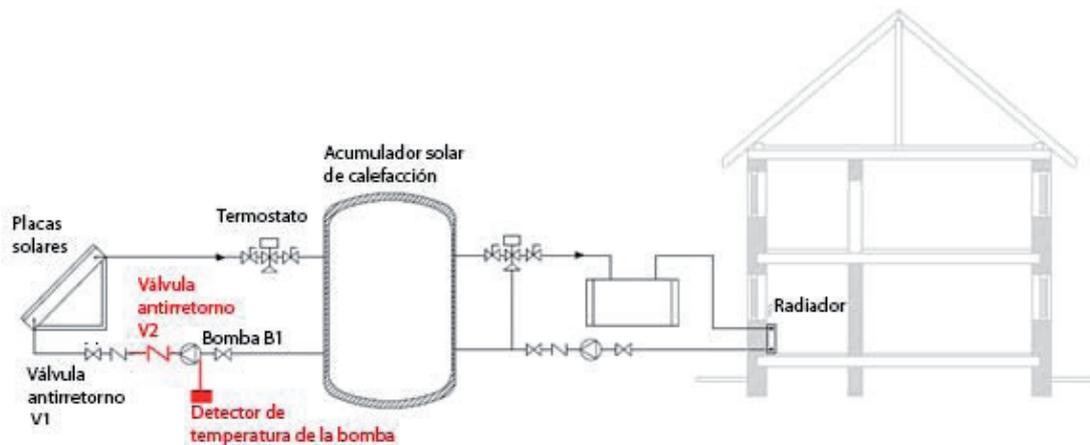


Figura 3.6. Esquema de la instalación mejorada

*Cálculo de los nuevos coeficientes F', G' y D' y del IPR' para cada medida correctora*

En caso de detectar el boqueo de la válvula v1 (bien sea bloqueo en abierto o bloqueo en cerrado) mediante inspecciones periódicas de la instalación, se puede inhabilitar la rama 1, el fluido circulará en este caso por la rama 2 en la que se encuentra ubicada la nueva válvula. En este caso, la gravedad del fallo de la válvula 1 sería menor,  $G' = 2$ .

$$e1 - e11: IPR' = 2 \cdot 2 \cdot 10 = 40$$

$$e2 - e21: IPR' = 2 \cdot 2 \cdot 10 = 40$$

## 4. MÉTODO DEL ÁRBOL DE FALLOS

### 4.1. Descripción teórica

La técnica del árbol de fallos fue creada en la década de los sesenta por técnicos de Bell Telephone Laboratories para mejorar la fiabilidad del sistema de control del lanzamiento de cohetes. Posteriormente su utilización se extendió a otros campos de la industria y, en especial a la industria nuclear.

La utilización de árboles de fallo es una técnica deductiva que se aplica a un sistema para la identificación de los sucesos o cadena de sucesos que pueden conducir a un incidente no deseado, en general a un accidente o fallo del sistema. Esta técnica permite, asimismo, cuantificar la probabilidad o frecuencia con que se puede producir un suceso; es decir, permite el cálculo de la no fiabilidad o no disponibilidad del sistema.

Esta técnica consiste en un proceso deductivo basado en las leyes del álgebra de Boole y permite determinar la expresión de sucesos complejos estudiados en función de los fallos básicos de los elementos que intervienen en él. De esta manera se puede apreciar, de forma cualitativa, qué sucesos son menos probables porque requieren la ocurrencia simultánea de numerosas causas.

Consiste en descomponer sistemáticamente un suceso complejo denominado *suceso top* en sucesos intermedios hasta llegar a sucesos básicos, donde:

- Suceso *top*. El que ocupa la parte superior de la estructura lógica que representa el árbol de fallos. Es el suceso complejo que se representa mediante un rectángulo.
- Sucesos intermedios. Son los sucesos que se encuentran en el proceso de descomposición y que, a su vez, pueden ser de nuevo descompuestos. Se representan en el árbol de fallos en rectángulos.

- Sucesos básicos. Son los sucesos terminales de la descomposición. Pueden representar cualquier tipo de suceso: sucesos de «fallos», error humano o sucesos de «éxito»: ocurrencia de un evento determinado. Se representan en círculos en la estructura del árbol.
- Sucesos no desarrollados. Existen sucesos en el proceso de descomposición del árbol de fallos cuyo proceso de descomposición no se prosigue, bien por falta de información, bien porque no se considera necesario. Se representan mediante un rombo y se tratan como sucesos básicos.

Para la aplicación del método se aplican los siguientes pasos:

### 1) *Descripción de la instalación*

Consiste en describir los elementos que componen la instalación y su funcionamiento.

### 2) *Definición del objetivo y alcance*

La primera etapa del árbol de fallos consiste en establecer claramente cuál va a ser el suceso cumbre o *top* y las condiciones límite del análisis. El suceso *top* puede ser cualquier suceso que pueda provocar daño a equipos, sistemas, a la planta o al entorno, daño a la salud del personal de planta o al público en general, o pérdida de producción.

Del mismo modo, es necesario definir cuáles son las condiciones límite del análisis, haciendo referencia a los siguientes aspectos del suceso:

- Límites físicos: partes de la planta o sistema a analizar.
- Condiciones iniciales: modo de operación de la planta y los sistemas.
- Condicionantes externos: sucesos externos que contribuyen al suceso cumbre.

Nivel de resolución: grado de detalle requerido para la representación del suceso *top* y las causas que lo originan.

### 3) *Definición del árbol de fallos para el suceso no deseado*

Para la construcción del árbol de fallos es necesario conocer inicialmente la simbología. En el proceso de descomposición del árbol se recurre a una serie de puertas lógicas que representan los operadores del álgebra de sucesos. Los dos tipos más elementales corresponden a las puertas *And* y *Or*:

- La puerta *Or* se utiliza para indicar un «o» lógico y significa que la salida lógica ocurrirá siempre y cuando ocurran por lo menos una de sus entradas lógicas.
- La puerta *And* se utiliza para indicar un «y» lógico, y para que ocurra la salida lógica es necesario que ocurran conjuntamente sus entradas lógicas.

El procedimiento de construcción de un árbol de fallos se basa en un método sistemático que parte del suceso *top* y lo desarrolla en sucesos más elementales. Así, los fallos del siguiente nivel inferior determinan las causas inmediatas, necesarias y suficientes por las que se puede dar el suceso *top*. Por lo general, estas causas no son básicas sino que son sucesos intermedios que requieren un desarrollo adicional. El suceso *top* y las causas se conectan mediante puertas lógicas adecuadas al tipo de relación establecida entre las entradas, o causas, y la salida, o suceso *top*. A continuación, cada causa no básica es considerada un nuevo suceso intermedio que se desarrolla en el siguiente nivel inferior en función de las causas que lo pueden originar, y se establece así una nueva relación. De este modo se procede de nivel en nivel hasta alcanzar el grado de resolución establecido como límite, donde se situarán las causas básicas o sucesos básicos contribuyentes al suceso *top*, los cuales no requieren un mayor desarrollo.

	SUCESO BÁSICO. No requiere de posterior desarrollo al considerarse un suceso de fallo básico.
	SUCESO NO DESARROLLADO. No puede ser considerado como básico, pero sus causas no se desarrollan, sea por falta de información o por su poco interés.
	SUCESO INTERMEDIO. Resultante de la combinación de sucesos más elementales por medio de puertas lógicas. Asimismo, se representa en un rectángulo el “suceso no deseado” del que parte todo el árbol.
	 <p>PUERTA “Y” El suceso de salida (S) ocurrirá si, y sólo si, ocurren todos los sucesos de entrada (E1 B1)</p>
	 <p>PUERTA “O” El suceso de salida (S) ocurrirá si ocurren uno o más de los sucesos de entrada (E1 B1)</p>
	SÍMBOLO DE TRANSFERENCIA. Indica que el árbol sigue en otro lugar.
	PUERTA “Y” PRIORITARIA. El suceso de salida ocurrirá, si y sólo si, todas las entradas ocurren en una secuencia determinada, que normalmente se especifica en una eclipse dibujada a la derecha de la puerta.
	PUERTA “O” EXCLUSIVA. El suceso de salida ocurrirá si lo hace una de las entradas, pero no dos o más de ellas.
	PUERTA DE INHIBICIÓN. La salida ocurrirá si, y sólo si, lo hace su entrada y, además, se satisface una condición dada (X).

Figura 4.1. Simbología de sucesos / puertas del árbol de fallos

4) *La ecuación booleana, la ecuación reducida y los conjuntos mínimos de fallo*

Desde el punto de vista del análisis cualitativo, se utilizan métodos de reducción basados en los conjuntos mínimos de corte (CMC o MCS *Minimal Cut Sets*). Los CMC permiten identificar las combinaciones simples, dobles, triples, etc., que conducen al suceso cumbre o *top*, y se puede identificar el tipo de suceso, el número de veces que se repite en los CMC y su probabilidad de ocurrencia. Por tanto, en una primera visión preliminar se pueden detectar los máximos responsables de la ocurrencia del suceso *top*. Para la reducción de la ecuación booleana pueden aplicarse las leyes y reglas básicas del álgebra de Boole mostradas en la tabla 4.1.

Propiedad conmutativa	$x \cdot y = y \cdot x$
Propiedad asociativa	$x + y = y + x$
Propiedad distributiva	$x \cdot (y \cdot z) = (x \cdot y) \cdot z$ $x + (y + z) = (x + y) + z$
Propiedad de idempotencia	$x \cdot x = x$
Ley de absorción	$x + x \cdot y = x$

Tabla 4.1. Reglas básicas del álgebra de Boole

5) *Análisis cualitativo de la importancia*

Para realizar el estudio cualitativo de importancias se colocarán en una tabla los sucesos básicos pertenecientes a los CMC y se estudiará el número de veces que se presentan en CMC de órdenes 1, 2, 3, etc. Posteriormente, la importancia de cada suceso básico se calculará dividiendo el número de veces que aparece un suceso básico por el orden del CMC en el que aparece, de forma ponderada. El formato a utilizar es el mostrado en la tabla 4.2.

Suceso básico	Veces que aparece un CMC de orden (N)				Importancia total $N \times (1/\text{orden})$
	I	II	III	IV	
1					
2					
3					

Tabla 4.2. Formato para el análisis cualitativo del árbol de fallos

El suceso básico de más importancia será objeto de mayor atención, y se propondrán las medidas correctoras que reduzcan su nivel de importancia.

## 6) *Análisis cuantitativo, cálculo de la probabilidad del suceso top*

El análisis cuantitativo del árbol de fallos se basa en el cálculo probabilístico del suceso *top* a partir de la probabilidad de ocurrencia de los sucesos básicos. El conocimiento de los valores de probabilidad de los sucesos primarios (básicos o no desarrollados) permite:

- Determinar la probabilidad global de aparición del suceso *top*.
- Determinar las vías de fallo más críticas, es decir, las más probables entre las combinaciones de sucesos susceptibles de ocasionar el suceso *top*.

Para la valoración de la probabilidad global de aparición del suceso *top* se realizan los siguientes pasos:

- Se asignan valores probabilísticos a los sucesos primarios.
- Se determinan las combinaciones mínimas de sucesos primarios cuya ocurrencia simultánea garantiza la aparición del suceso *top*, a partir de la siguiente ecuación:

$$P(\text{top}) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(\text{CMC})_i), \text{ donde: } i = \text{cada uno de los conjuntos mínimos de fallo y } P(\text{CMC}) = \text{probabilidad de cada uno de los CMC.}$$

En ocasiones, en lugar de aplicar la ecuación anterior, se calcula la probabilidad del suceso *top* de forma simplificada como la suma de las probabilidades de ocurrencia de los CMC, ya que esta simplificación apenas modifica el resultado numérico y, además, está del lado de la seguridad, ya que la probabilidad del *top* resulta mayor que la obtenida con la ecuación anterior.

## 7) *Análisis cuantitativo de la importancia. Cálculo de los índices RAW y RRW*

Además del estudio cualitativo de la importancia, resulta de interés analizar la importancia de los sucesos básicos desde un punto de vista cuantitativo, para lo que existen diversos índices, como los índices RAW y el RRW.

- El índice RAW (*Risk Achievement Worth*) muestra cómo aumenta la probabilidad de ocurrencia del accidente estudiado si se considera que un componente falla en todo momento. Representa la degradación del sistema en caso de que ocurriera el fallo del componente. Se calcula para cada uno de los componentes, dividiendo

do la probabilidad del suceso *top* en el caso de que dicho componente tenga una probabilidad de fallo de 1, por la probabilidad total del suceso *top*.

$$RAW_i = \frac{P(top, P_i = 1)}{P(top)}, \text{ donde: } i = \text{cada uno de los componentes, } P(top, P_i = 1),$$

probabilidad del suceso *top* cuando la probabilidad del suceso *i* es 1.

Cuanto mayor es el índice RAW, mayor peso en la degradación del sistema representa el componente, por lo que las medidas correctoras deberán dirigirse hacia la disminución de la importancia de dicho componente en el fallo del sistema.

- El índice RRW (*Risk Reduction Worth*) muestra cómo disminuiría la probabilidad de ocurrencia del accidente analizado si se considera que un componente es totalmente fiable y nunca falla, es decir, que su probabilidad de fallo es 0. Indica qué componentes se tienen que modificar para reducir al máximo la probabilidad del suceso *top*. Se calcula para cada uno de los componentes dividiendo la probabilidad total del suceso *top* por la probabilidad que tendría el suceso *top* en el caso de que el componente tenga una probabilidad de fallo nula:

$$RRW_i = \frac{P(top)}{P(top, P_i = 0)}, \text{ donde: } i = \text{cada uno de los componentes, } P(top, P_i = 0),$$

probabilidad del suceso *top* cuando la probabilidad del suceso *i* es 0.

Cuanto mayor es el índice RRW, mayor es la mejora que se obtendría en el sistema, y mejora la fiabilidad del componente, por lo que las medidas correctoras deberán dirigirse hacia la disminución de la importancia de dicho componente en el fallo del sistema.

#### 8) *Propuesta de medidas correctoras*

Consiste en buscar posibles cambios que mejoren el sistema de cara a una reducción de la probabilidad de ocurrencia del suceso no deseado.

### 9) *Esquema de la instalación mejorada*

En este paso se describe la instalación con las medidas correctoras aplicadas.

### 10) *Definición del nuevo árbol de la instalación y cálculo de la disminución de la probabilidad del suceso no deseado*

Finalmente se construye el árbol de fallos de la nueva instalación y se calcula la nueva probabilidad de ocurrencia del suceso no deseado y la disminución conseguida. La mejora del sistema se obtiene de la división entre la probabilidad del suceso *top* en el sistema inicial por la probabilidad del sistema *top* en el nuevo sistema.

$$\text{Ratio de mejora} = \frac{P(\text{top}_{\text{inicial}})}{P(\text{top}_{\text{final}})}$$

Cuanto mayor sea el ratio de mejora, más efectivas resultarán las medidas correctoras aplicadas.

## 4.2. Caso 1: AF embotelladora

### 1) *Descripción de la instalación*

Este caso de estudio se corresponde con la línea de embotellado descrita en el apartado 3.3 y cuyo esquema se muestra en la figura 3.2. Como información adicional, se considerará que la instalación eléctrica de todo el sistema es antideflagrante, para evitar que se produzcan chispas. El diseño de la máquina no está provisto de sistemas de eliminación de electricidad estática.

Para que se produzca un incendio es necesario que la concentración de vapores inflamables del alcohol sea superior al límite inferior de inflamabilidad (LII) y que, además, haya, un punto de ignición. Algunas de las tasas de fallo de los componentes han sido obtenidas de la base de datos RIAC Automated DataBook, mientras que el resto se ha estimado a partir de los datos publicados en Storch de Gracia (1998).

La siguiente tabla recoge los datos de las tasas de fallo de los sucesos básicos que cabe considerar:

Suceso básico	Tasa de fallo
Fallo mecánico del ventilador de tipo axial	22,8431 en $10^6$ horas
Fallo suministro eléctrico del ventilador	5,7078 en $10^6$ horas
Fallo del medidor de caudal	24,7850 en $10^6$ horas
Fallo del sensor de posición	67,2592 en $10^6$ horas
Fallo del actuador que pone en marcha y detiene la botella	97,402 en $10^6$ horas
Chispa producida por electricidad estática	$2 \times 10^{-5}$
Fallo instalación eléctrica antideflagrante	$4 \times 10^{-5}$
Rotura accidental del frasco	$5 \times 10^{-5}$

Tabla 4.3. Tasas de fallo para los componentes considerados

## 2) Definición del objetivo y alcance

En una línea de embotellado de frascos de alcohol farmacéutico se quiere analizar el riesgo de que se produzca un incendio y se quiere mejorar la instalación hasta lograr una reducción significativa de la probabilidad de ocurrencia del incendio. El nivel de detalle del análisis será tal que llegue hasta los componentes identificados en la descripción de la instalación.

## 3) Definición del árbol de fallos para el suceso no deseado

En primer lugar se desarrolla el árbol de fallos para el suceso *top* «incendio en sistema de embotellado de alcohol», que se muestra en la siguiente figura.

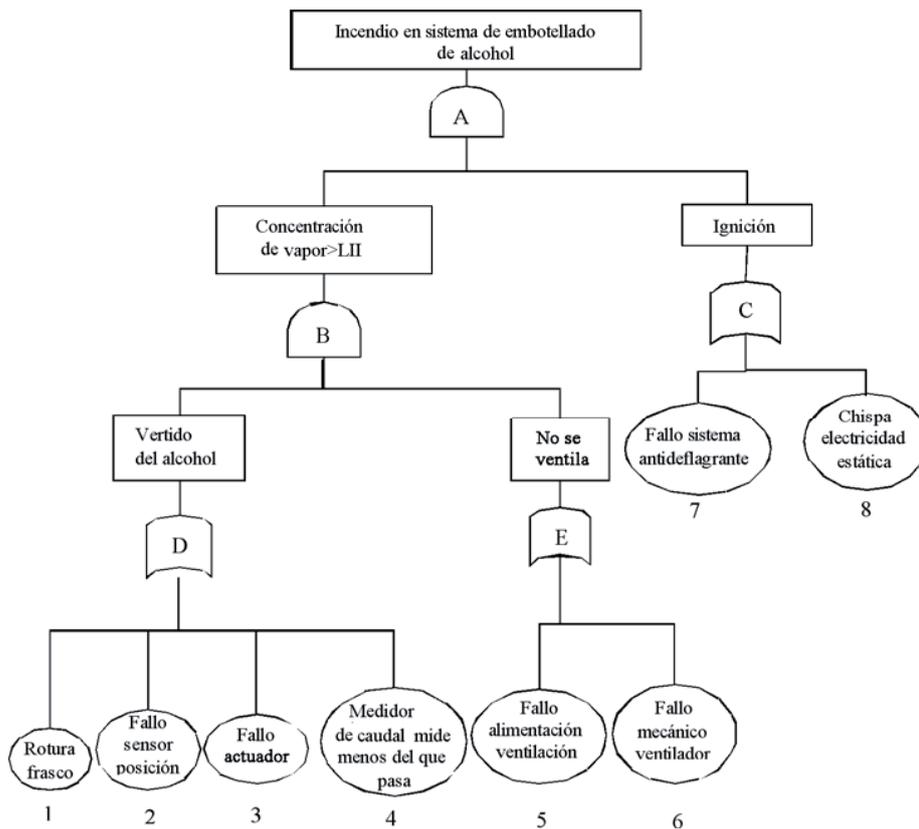


Figura 4.2. Árbol de fallos de la línea de embotellado

Para que se produzca un incendio es necesario que la concentración de vapor supere el límite inferior de inflamabilidad (LII) y que haya un punto de ignición. El punto de ignición puede producirse por fallo del sistema antideflagrante o por una chispa provocada por la electricidad estática. Para que la concentración de vapor supere el LII es necesario que se produzca un vertido de alcohol y que, al mismo tiempo, no haya ventilación. La falta de ventilación puede producirse por fallo de alimentación eléctrica al ventilador o por fallo mecánico del ventilador. El vertido de alcohol puede deberse a la rotura accidental del frasco, fallo del sensor de posición, fallo del actuador o porque el medidor de caudal mide menos del que realmente pasa, por lo que llega un momento en que el alcohol rebosa del recipiente.

4) *Ecuación booleana, la ecuación reducida y los conjuntos mínimos de fallo*

$Top = A = B \wedge C = (D \wedge E) \wedge C = [(1 \vee 2 \vee 3 \vee 4) \wedge (5 \vee 6)] \wedge (7 \vee 8)$ , donde:

$\wedge$  indica «y», y  $\vee$  indica «o».

La ecuación reducida aplicando las leyes del álgebra de Boole sería:

$$Top = (1 \wedge 5 \wedge 7) \vee (1 \wedge 5 \wedge 8) \vee (1 \wedge 6 \wedge 7) \vee (1 \wedge 6 \wedge 8) \vee (2 \wedge 5 \wedge 7) \vee (2 \wedge 5 \wedge 8) \vee (2 \wedge 6 \wedge 7) \vee (2 \wedge 6 \wedge 8) \vee (3 \wedge 5 \wedge 7) \vee (3 \wedge 5 \wedge 8) \vee (3 \wedge 6 \wedge 7) \vee (3 \wedge 6 \wedge 8) \vee (4 \wedge 5 \wedge 7) \vee (4 \wedge 5 \wedge 8) \vee (4 \wedge 6 \wedge 7) \vee (4 \wedge 6 \wedge 8)$$

Los conjuntos mínimos de fallo para el suceso *top* analizado son:

{1, 5, 7}	{1, 5, 8}	{1, 6, 7}	{1, 6, 8}	{2, 5, 7}	{2, 5, 8}	{2, 6, 7}	{2, 6, 8}
{3, 5, 7}	{3, 5, 8}	{3, 6, 7}	{3, 6, 8}	{4, 5, 7}	{4, 5, 8}	{4, 6, 7}	{4, 6, 8}

### 5) *Análisis del árbol. Análisis cualitativo de la importancia*

Suceso básico	Aparece en un CMC de orden (veces)			Importancia
	I	II	III	
Nº				$\sum \frac{n^{\circ} \text{ veces}_i}{\text{orden}_i}$
1	0	0	4	1.33
2	0	0	4	1.33
3	0	0	4	1.33
4	0	0	4	1.33
5	0	0	4	1.33
6	0	0	4	1.33
7	0	0	4	1.33
8	0	0	4	1.33

Tabla 4.4. Análisis cualitativo de la importancia de los sucesos básicos

No se puede sacar ninguna conclusión de este análisis, porque todos tienen la misma importancia desde un punto de vista cualitativo.

### 6) *Análisis cuantitativo, cálculo de la probabilidad del suceso top*

Para calcular la probabilidad del suceso *top*, en primer lugar se calcula la probabilidad de los sucesos básicos del árbol, utilizando los datos de partida:

P 1	$5 \cdot 10^{-5}$	P 5	$6,8834 \cdot 10^{-6}$
P 2	$67,2592 \cdot 10^{-6}$	P 6	$22,8431 \cdot 10^{-6}$
P 3	$97,402 \cdot 10^{-6}$	P 7	$4 \cdot 10^{-5}$
P 4	$12,3925 \cdot 10^{-6} *$	P 8	$2 \cdot 10^{-5}$

Tabla 4.5. Probabilidad de los sucesos básicos

\*(La mitad de los fallos del medidor de caudal es por medir menos del que pasa  $24,7850 \cdot 10^{-6}/2$ )

Una vez calculada la probabilidad de los sucesos básicos, se obtiene la probabilidad de los CMC y seguidamente la del suceso *top*.

La probabilidad de los conjuntos mínimos de fallos se calcula como el producto de la probabilidad de cada uno de los sucesos básicos que componen el CMC, calculadas anteriormente.

CMC	Probabilidad	CMC	Probabilidad
{1, 5, 7}	P1XP5XP7 $1,14 \cdot 10^{-14}$	{3, 5, 7}	P3XP5XP7 $2,22 \cdot 10^{-14}$
{1, 5, 8}	P1XP5XP8 $5,71 \cdot 10^{-15}$	{3, 5, 8}	P3XP5XP8 $1,11 \cdot 10^{-14}$
{1, 6, 7}	P1XP6XP7 $4,57 \cdot 10^{-14}$	{3, 6, 7}	P3XP6XP7 $8,90 \cdot 10^{-14}$
{1, 6, 8}	P1XP6XP8 $2,28 \cdot 10^{-14}$	{3, 6, 8}	P3XP6XP8 $4,45 \cdot 10^{-14}$
{2, 5, 7}	P2XP5XP7 $1,54 \cdot 10^{-14}$	{4, 5, 7}	P4XP5XP7 $2,83 \cdot 10^{-15}$
{2, 5, 8}	P2XP5XP8 $7,68 \cdot 10^{-15}$	{4, 5, 8}	P4XP5XP8 $1,41 \cdot 10^{-15}$
{2, 6, 7}	P2XP6XP7 $6,15 \cdot 10^{-14}$	{4, 6, 7}	P4XP6XP7 $1,13 \cdot 10^{-14}$
{2, 6, 8}	P2XP6XP8 $3,07 \cdot 10^{-14}$	{4, 6, 8}	P4XP6XP8 $5,66 \cdot 10^{-15}$

Tabla 4.6. Probabilidad de los conjuntos mínimos de corte

La probabilidad del suceso *top* se calcula a partir de la probabilidad de los CMC aplicando la siguiente ecuación:

$$P(\text{top}) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(\text{CMC})_i),$$

donde *i*: conjunto mínimo de corte o de fallo

$$P(\text{top}) = 3,89022 \cdot 10^{-13}$$

El conjunto mínimo de fallos con mayor probabilidad es el formado por los sucesos 3, 6 y 7, por lo que sería aquel hacia el cual deberían orientarse las medidas correctoras; si bien todos los CMC cuya probabilidad está en el mismo orden son susceptibles de mejorarse, lo que involucra a todos los sucesos. Para obtener más indicios de cómo mejorar el sistema, se realiza un análisis cuantitativo de importancia, que se desarrolla en el siguiente apartado.

7) *Análisis del árbol. Análisis cuantitativo de la importancia*

CMC				Probabilidad
{1, 5, 7}	1	$5,7078 \cdot 10^{-6}$	0,00004	$2,28312 \cdot 10^{-10}$
{1, 5, 8}	1	$5,7078 \cdot 10^{-6}$	0,00002	$1,14156 \cdot 10^{-10}$
{1, 6, 7}	1	$2,28431 \cdot 10^{-5}$	0,00004	$9,13724 \cdot 10^{-10}$
{1, 6, 8}	1	$2,28431 \cdot 10^{-5}$	0,00002	$4,56862 \cdot 10^{-10}$
{2, 5, 7}	$6,72592 \cdot 10^{-5}$	$5,7078 \cdot 10^{-6}$	0,00004	$1,53561 \cdot 10^{-14}$
{2, 5, 8}	$6,72592 \cdot 10^{-5}$	$5,7078 \cdot 10^{-6}$	0,00002	$7,67804 \cdot 10^{-15}$
{2, 6, 7}	$6,72592 \cdot 10^{-5}$	$2,28431 \cdot 10^{-5}$	0,00004	$6,14563 \cdot 10^{-14}$
{2, 6, 8}	$6,72592 \cdot 10^{-5}$	$2,28431 \cdot 10^{-5}$	0,00002	$3,07282 \cdot 10^{-14}$
{3, 5, 7}	0,000097402	$5,7078 \cdot 10^{-6}$	0,00004	$2,2238 \cdot 10^{-14}$
{3, 5, 8}	0,000097402	$5,7078 \cdot 10^{-6}$	0,00002	$1,1119 \cdot 10^{-14}$
{3, 6, 7}	0,000097402	$2,28431 \cdot 10^{-5}$	0,00004	$8,89985 \cdot 10^{-14}$
{3, 6, 8}	0,000097402	$2,28431 \cdot 10^{-5}$	0,00002	$4,44993 \cdot 10^{-14}$
{4, 5, 7}	$1,23925 \cdot 10^{-5}$	$5,7078 \cdot 10^{-6}$	0,00004	$2,82936 \cdot 10^{-15}$
{4, 5, 8}	$1,23925 \cdot 10^{-5}$	$5,7078 \cdot 10^{-6}$	0,00002	$1,41468 \cdot 10^{-15}$
{4, 6, 7}	$1,23925 \cdot 10^{-5}$	$2,28431 \cdot 10^{-5}$	0,00004	$1,13233 \cdot 10^{-14}$
{4, 6, 8}	$1,23925 \cdot 10^{-5}$	$2,28431 \cdot 10^{-5}$	0,00002	$5,66166 \cdot 10^{-15}$

$P(top) =$	$1,713 \cdot 10^{-09}$
RAW 1	$4,404 \cdot 10^3$

Tabla 4.7. Ejemplo de cálculo de RAW 1

Los índices RAW se resumen en la siguiente tabla:

Suceso con $P = 1$	$P (top, Psuceso = 1)$	RAW
1	$1,713 \cdot 10^{-9}$	$4,404 \cdot 10^3$
2	$1,713 \cdot 10^{-9}$	$4,404 \cdot 10^3$
3	$1,713 \cdot 10^{-9}$	$4,404 \cdot 10^3$
4	$1,713 \cdot 10^{-9}$	$4,404 \cdot 10^3$
5	$1,362 \cdot 10^{-8}$	$3,502 \cdot 10^4$
6	$1,362 \cdot 10^{-8}$	$3,502 \cdot 10^4$
7	$6,483 \cdot 10^{-9}$	$1,666 \cdot 10^4$
8	$6,483 \cdot 10^{-9}$	$1,666 \cdot 10^4$

Tabla 4.8. Ejemplo de cálculo de RAW 1

Como conclusión, la degradación del sistema es más alta si se producen los sucesos básicos 5 y 6, seguidos del 7 y 8.

CMC	Probabilidad			
{1, 5, 7}	0	$5,7078 \cdot 10^{-6}$	0,00004	0
{1, 5, 8}	0	$5,7078 \cdot 10^{-6}$	0,00002	0
{1, 6, 7}	0	$2,28431 \cdot 10^{-5}$	0,00004	0
{1, 6, 8}	0	$2,28431 \cdot 10^{-5}$	0,00002	0
{2, 5, 7}	$6,72592 \cdot 10^{-5}$	$5,7078 \cdot 10^{-6}$	0,00004	$1,53561 \cdot 10^{-14}$
{2, 5, 8}	$6,72592 \cdot 10^{-5}$	$5,7078 \cdot 10^{-6}$	0,00002	$7,67804 \cdot 10^{-15}$
{2, 6, 7}	$6,72592 \cdot 10^{-5}$	$2,28431 \cdot 10^{-5}$	0,00004	$6,14563 \cdot 10^{-14}$
{2, 6, 8}	$6,72592 \cdot 10^{-5}$	$2,28431 \cdot 10^{-5}$	0,00002	$3,07282 \cdot 10^{-14}$
{3, 5, 7}	0,000097402	$5,7078 \cdot 10^{-6}$	0,00004	$2,2238 \cdot 10^{-14}$
{3, 5, 8}	0,000097402	$5,7078 \cdot 10^{-6}$	0,00002	$1,1119 \cdot 10^{-14}$
{3, 6, 7}	0,000097402	$2,28431 \cdot 10^{-5}$	0,00004	$8,89985 \cdot 10^{-14}$
{3, 6, 8}	0,000097402	$2,28431 \cdot 10^{-5}$	0,00002	$4,44993 \cdot 10^{-14}$
{4, 5, 7}	$1,23925 \cdot 10^{-5}$	$5,7078 \cdot 10^{-6}$	0,00004	$2,82936 \cdot 10^{-15}$
{4, 5, 8}	$1,23925 \cdot 10^{-5}$	$5,7078 \cdot 10^{-6}$	0,00002	$1,41468 \cdot 10^{-15}$
{4, 6, 7}	$1,23925 \cdot 10^{-5}$	$2,28431 \cdot 10^{-5}$	0,00004	$1,13233 \cdot 10^{-14}$
{4, 6, 8}	$1,23925 \cdot 10^{-5}$	$2,28431 \cdot 10^{-5}$	0,00002	$5,66166 \cdot 10^{-15}$

$P(top)$	$3,033 \cdot 10^{-13}$
RRW 1	1,283

Tabla 4.9. Ejemplo de cálculo de RRW 1

Los índices RRW se resumen en la siguiente tabla:

Suceso con $P = 0$	$P(top, Psuceso = 0)$	RRW	Suceso con $P = 0$	$P(top, Psuceso = 0)$	RRW
1	$3,033 \cdot 10^{-13}$	1,283	5	$3,114 \cdot 10^{-13}$	1,249
2	$2,738 \cdot 10^{-13}$	1,421	6	$7,760 \cdot 10^{-14}$	5,013
3	$2,222 \cdot 10^{-13}$	1,751	7	$1,297 \cdot 10^{-13}$	3,000
4	$3,678 \cdot 10^{-13}$	1,058	8	$2,593 \cdot 10^{-13}$	1,500

Tabla 4.10. Valor de los RRW

El mayor descenso del riesgo se produce con la reducción del fallo del suceso 6, y aun así es pequeño el descenso que se produciría.

### 8) Propuesta de medidas correctoras

Según los análisis anteriores, uno de los sucesos más relevantes en que se produzca un incendio es el fallo del ventilador. Entre otras, algunas de las posibles medidas correctoras que se deben implantar son:

- a) Doble sistema de ventilación, por lo que para que fallara el sistema de ventilación tendría que producirse el fallo de los dos ventiladores.
- b) Colocar un grupo electrógeno, por lo que para que ocurra el fallo de alimentación del ventilador, debería producirse fallo del suministro y del grupo electrógeno.
- c) Sensor de nivel de llenado de la botella, por lo que para que se derrame el alcohol, será necesario que se produzca tanto el fallo del caudalímetro como el del sensor de nivel.

Se decide implantar simultáneamente las medidas *a* y *c*, la primera porque mejora directamente la ventilación del sistema, mientras que la medida *c* reduce la probabilidad de perder el control del sistema de llenado. Ambas medidas aumentan la complejidad y el coste del sistema, por lo que la implantación final se justificará en función de cuánto se reduzca la probabilidad de que haya un incendio.

### 9) Esquema de la instalación mejorada

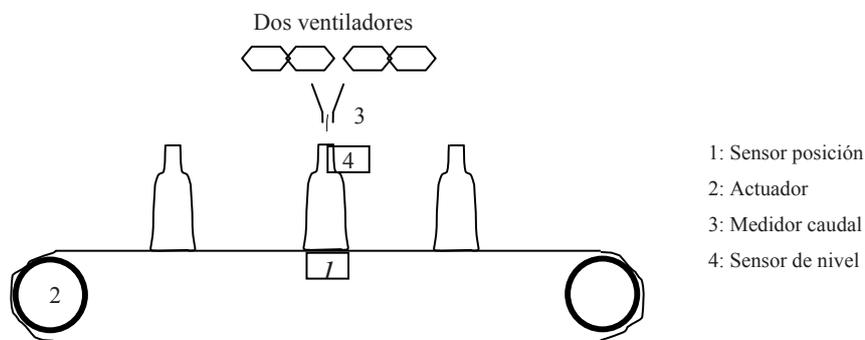


Figura 4.3. Esquema de la instalación mejorada

10) *Definición del nuevo árbol de la instalación y cálculo de la disminución de la probabilidad del suceso no deseado*

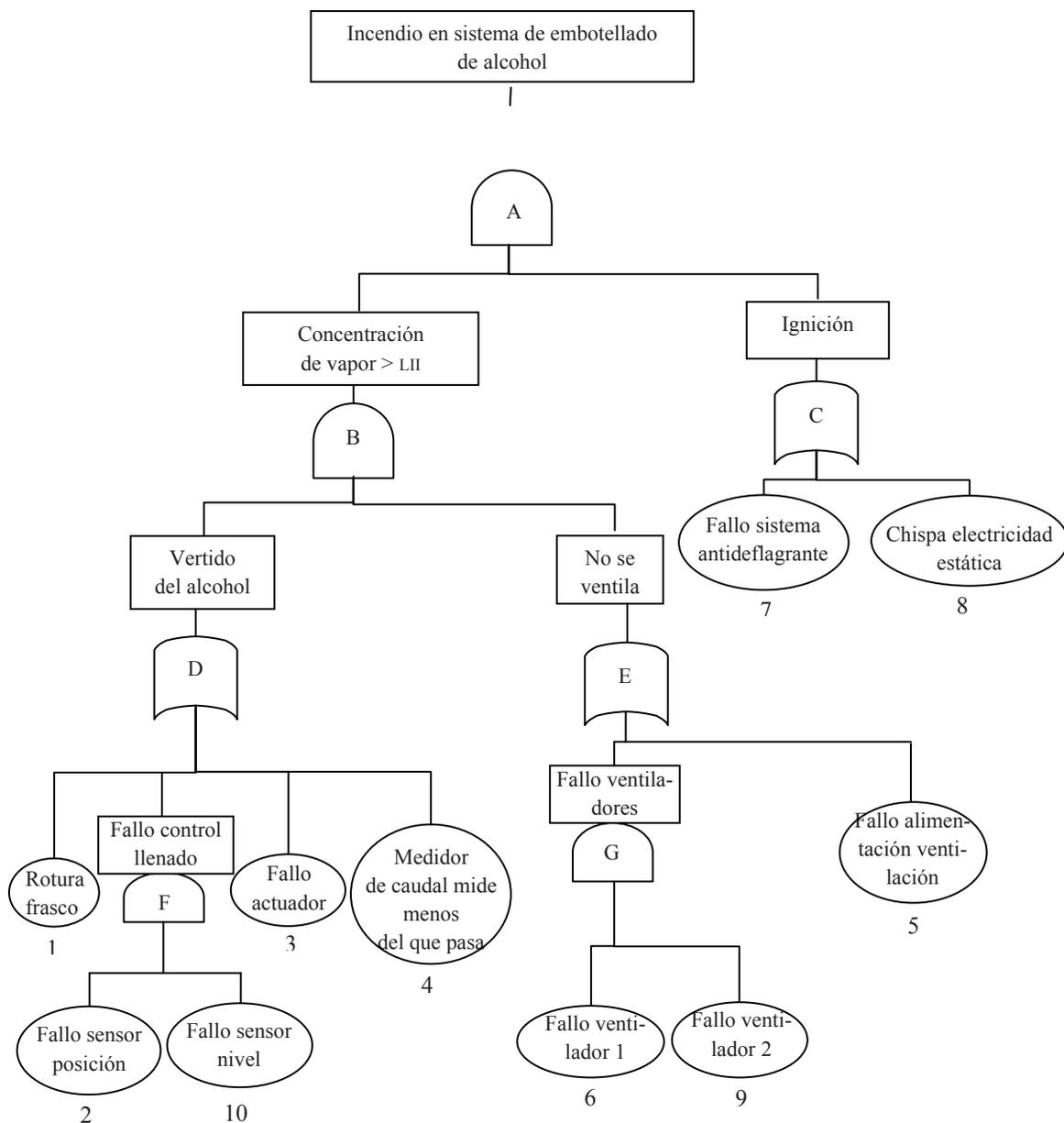


Figura 4.4. Árbol de fallos de la línea de embotellado mejorada

Para el análisis de la probabilidad del suceso *top* en el nuevo sistema se necesita conocer la tasa de fallos del sensor de nivel, que resulta ser de 2,6 en  $10^6$  horas.

La ecuación booleana del nuevo sistema es:

$$Top = B \wedge C = (D \wedge E) \wedge C = [(1 \vee F \vee 3 \vee 4) \wedge (G \vee 5)] \wedge [7 \vee 8] = [(1 \vee (2 \wedge \wedge 10) \vee 3 \vee 4) \wedge ((6 \wedge 9) \vee 5)] \wedge [7 \vee 8]$$

La ecuación reducida es:

$$Top = (1 \wedge 6 \wedge 9 \wedge 7) \vee (1 \wedge 6 \wedge 9 \wedge 8) \vee (1 \wedge 5 \wedge 7) \vee (1 \wedge 5 \wedge 8) \vee (2 \wedge 10 \wedge 6 \wedge 9 \wedge 7) \vee (2 \wedge 10 \wedge 6 \wedge 9 \wedge 8) \vee (2 \wedge 10 \wedge 5 \wedge 7) \vee (2 \wedge 10 \wedge 5 \wedge 8) \vee (3 \wedge 6 \wedge 9 \wedge 7) \vee (3 \wedge 6 \wedge 9 \wedge 8) \vee (3 \wedge 5 \wedge 7) \vee (3 \wedge 5 \wedge 8) \vee (4 \wedge 6 \wedge 9 \wedge 7) \vee (4 \wedge 6 \wedge 9 \wedge 8) \vee (4 \wedge 5 \wedge 7) \vee (4 \wedge 5 \wedge 8)$$

Como puede observarse, frente al sistema inicial, muchos de los conjuntos mínimos de fallos son de orden 4 y 5, aunque todavía quedan algunos de orden 3.

La probabilidad de los CMC es:

CMC	probabilidad	CMC	probabilidad
1, 6, 9, 7	$1,04361 \cdot 10^{-18}$	3, 6, 9, 7	$2,033 \cdot 10^{-18}$
1, 6, 9, 8	$5,21807 \cdot 10^{-19}$	3, 6, 9, 8	$1,0165 \cdot 10^{-18}$
1, 5, 7	$1,14156 \cdot 10^{-14}$	3, 5, 7	$2,2238 \cdot 10^{-14}$
1, 5, 8	$5,7078 \cdot 10^{-15}$	3, 5, 8	$1,1119 \cdot 10^{-14}$
2, 10, 6, 9, 7	$3,65002 \cdot 10^{-24}$	4, 6, 9, 7	$2,5866 \cdot 10^{-19}$
2, 10, 6, 9, 8	$1,82501 \cdot 10^{-24}$	4, 6, 9, 8	$1,2933 \cdot 10^{-19}$
2, 10, 5, 7	$3,99258 \cdot 10^{-20}$	4, 5, 7	$2,82936 \cdot 10^{-15}$
2, 10, 5, 8	$1,99629 \cdot 10^{-20}$	4, 5, 8	$1,41468 \cdot 10^{-15}$

Tabla 4.11. Probabilidad de los CMC de la línea de embotellado mejorada

La probabilidad del suceso *top* es:  $P(top) = 5,4623 \cdot 10^{-14}$

Por tanto, la mejora de la probabilidad de riesgo de incendio es:

$$\frac{P(top)_{inicial}}{P(top)_{mejorado}} = \frac{3,8902 \cdot 10^{-13}}{5,4623 \cdot 10^{-14}}$$

Se ha disminuido por 7 la probabilidad de que haya un incendio en el sistema, lo que se considera suficiente mejora para llevar adelante las medidas correctoras seleccionadas.

### 4.3. Caso 2: AF depósito disolvente

#### 1) Descripción de la instalación

En una planta que almacena un disolvente muy inflamable, se quiere analizar la probabilidad de que haya un vertido al suelo durante el proceso de llenado del depósito (D1) situado en la nave. El depósito D1 se llena desde el depósito enterrado (D2), a través de una bomba P1. Cuando el nivel del disolvente en D1 alcanza un cierto límite, el control de nivel (LC) lo detecta y da señal a la bomba P1 de que pare automáticamente. En el caso de que no se pare automáticamente, un operario puede advertir un nivel alto en D1, mediante observación del nivel visual L1, y parar manualmente la bomba. En el caso de que la bomba no se pare, el nivel puede subir hasta llegar al rebosadero, a través del cual el disolvente llega hasta el depósito enterrado en el exterior (D3), conteniéndose de forma segura.

En el caso de que el rebosadero no actúe, por estar obstruido o porque alguien cierre accidentalmente la válvula A, el nivel en el D1 seguiría subiendo hasta alcanzar el ven-teo, y se produciría el rebose y vertido indeseado al suelo de la nave.

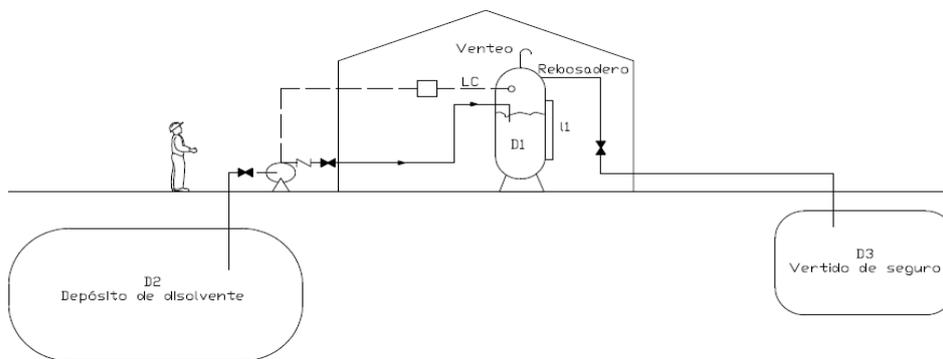


Figura 4.5. Esquema de la planta de almacenamiento de disolvente

## 2) *Definición del objetivo y alcance*

El objetivo del análisis es disminuir la probabilidad de que se produzca el derrame accidental del disolvente, considerando las combinaciones de simultaneidad de sucesos que pueden provocar este accidente, motivo por el cual se realizará un análisis del árbol de fallos. El nivel de detalle del estudio será el correspondiente a los siguientes sucesos básicos:

1. Falla el LC.
2. Falla el control que al detectar LC para la bomba P1.
3. Falla el indicador de nivel L1.
4. El operario se distrae y no vigila el nivel o no para P1 con nivel alto.
5. La válvula A se ha cerrado accidentalmente.
6. Hay suciedad que obstruye el rebosadero.

Las probabilidades para los sucesos básicos son:

Suceso	Probabilidad
1. Fallo del LC	0,003
2. Fallo del paro de bomba P1	0,005
3. Fallo indicador nivel L1	0,002
4. Fallo del operario	0,05
5. Fallo de la válvula (cierre accidental)	0,005
6. Fallo del rebosadero (se obstruye)	0,03

*Tabla 4.12.* Probabilidad de fallo de los sucesos básicos

3) *Definición del árbol de fallos para el suceso no deseado*

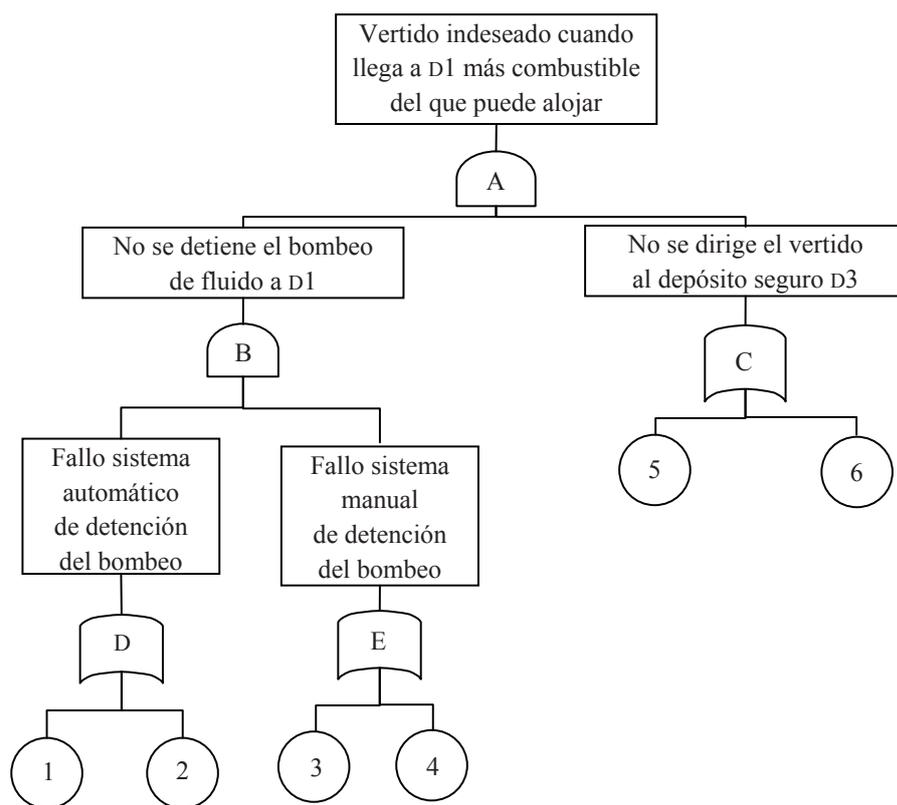


Figura 4.6. Árbol de fallos del sistema

4) *Ecuación booleana, la ecuación reducida y los conjuntos mínimos de fallo*

$$Top = A = B \wedge C = (D \wedge E) \wedge (5 \vee 6) = [(1 \vee 2) \wedge (3 \vee 4)] \wedge (5 \vee 6)$$

La ecuación reducida aplicando las leyes del álgebra de Boole sería:

$$Top = (1 \wedge 3 \wedge 5) \vee (1 \wedge 3 \wedge 6) \vee (1 \wedge 4 \wedge 5) \vee (1 \wedge 4 \wedge 6) \vee (2 \wedge 3 \wedge 5) \vee (2 \wedge 3 \wedge 6) \vee (2 \wedge 4 \wedge 5) \vee (2 \wedge 4 \wedge 6)$$

Los conjuntos mínimos de fallo para el suceso *top* analizado son:

{1, 3, 5}    {1, 3, 6}    {1, 4, 5}    {1, 4, 6}    {2, 3, 5}    {2, 3, 6}    {2, 4, 5}    {2, 4, 6}

5) *Análisis del árbol. Análisis cualitativo de la importancia*

Suceso	Orden			Importancia
	1	2	3	
1	0	0	4	1,33
2	0	0	4	1,33
3	0	0	4	1,33
4	0	0	4	1,33
5	0	0	4	1,33
6	0	0	4	1,33

Tabla 4.13. Cálculo de la importancia cualitativa de los sucesos básicos

Desde el punto de vista cualitativo todos los sucesos tienen la misma importancia. Es necesario realizar un análisis cuantitativo para analizar qué sucesos requieren de mejora en el árbol de fallos definido.

6) *Análisis cuantitativo, cálculo de la probabilidad del suceso top*

Para calcular la probabilidad del suceso *top*, en primer lugar se calcula la probabilidad de los sucesos básicos del árbol, utilizando los datos de partida:

P 1	0,003	P 4	0,03
P 2	0,005	P 5	0,005
P 3	0,002	P 6	0,03

Tabla 4.14. Probabilidad de los sucesos básicos

La probabilidad de cada uno de los CMC es:

CMC	Probabilidad	CMC	Probabilidad
{1, 3, 5}	P1XP3XP5 $3 \cdot 10^{-8}$	{2, 3, 5}	P2XP3XP5 $5 \cdot 10^{-8}$
{1, 3, 6}	P1XP3XP6 $1,8 \cdot 10^{-7}$	{2, 3, 6}	P2XP3XP6 $3 \cdot 10^{-7}$
{1, 4, 5}	P1XP4XP5 $7,5 \cdot 10^{-7}$	{2, 4, 5}	P2XP4XP5 $1,25 \cdot 10^{-6}$
{1, 4, 6}	P1XP4XP6 $4,5 \cdot 10^{-6}$	{2, 4, 6}	P2XP4XP6 $7,5 \cdot 10^{-6}$

Tabla 4.15. Probabilidad de los CMC

Como puede observarse del cálculo de la probabilidad de los conjuntos mínimos de fallo, el suceso 4 aparece en todos los CMC de mayor probabilidad, si bien se realizará un análisis cuantitativo de importancia para detectar los sucesos más significativos.

La probabilidad del suceso *top* es:

$$P(\text{top}) = 1,456 \cdot 10^{-5}$$

7) *Análisis cuantitativo de la importancia. Cálculo de los índices RAW y RRW*

CMC				Probabilidad
{1, 3, 5}	1	0,002	0,005	0,00001
{1, 3, 6}	1	0,002	0,03	0,00006
{1, 4, 5}	1	0,05	0,005	0,00025
{1, 4, 6}	1	0,05	0,03	0,0015
{2, 3, 5}	0,005	0,002	0,005	0,00000005
{2, 3, 6}	0,005	0,002	0,03	0,0000003
{2, 4, 5}	0,005	0,05	0,005	0,00000125
{2, 4, 6}	0,005	0,05	0,03	0,0000075

P( <i>top</i> )	$1,829 \cdot 10^{-3}$
RAW 1	$1,256 \cdot 10^2$

Tabla 4.16. Ejemplo de cálculo RAW 1

La siguiente tabla muestra el resumen de los índices RAW:

Suceso con P = 1	P ( <i>top</i> , Psuceso = 1)	RAW
1	$1,825 \cdot 10^{-3}$	$1,253 \cdot 10^2$
2	$1,825 \cdot 10^{-3}$	$1,253 \cdot 10^2$
3	$2,940 \cdot 10^{-4}$	$2,019 \cdot 10^1$
4	$4,284 \cdot 10^{-4}$	$2,943 \cdot 10^1$
5	$4,284 \cdot 10^{-4}$	$2,943 \cdot 10^1$
6	$4,180 \cdot 10^{-4}$	$2,871 \cdot 10^1$

Tabla 4.17. Valor de los RAW

La degradación del sistema es más alta si se producen los fallos 1 y 2, que son los sucesos con mayor RAW.

## Cálculo del índice RRW

CMC				Probabilidad
{1, 3, 5}	0	0,002	0,005	0
{1, 3, 6}	0	0,002	0,03	0
{1, 4, 5}	0	0,05	0,005	0
{1, 4, 6}	0	0,05	0,03	0
{2, 3, 5}	0,005	0,002	0,005	0,00000005
{2, 3, 6}	0,005	0,002	0,03	0,0000003
{2, 4, 5}	0,005	0,05	0,005	0,00000125
{2, 4, 6}	0,005	0,05	0,03	0,0000075

$P(top)$	$9,100 \cdot 10^{-6}$
RRW 1	1,6

Tabla 4.18. Ejemplo de cálculo RRW1

La siguiente tabla muestra el resumen de los índices RRW:

Suceso con $P = 0$	$P(top, P_{suceso} = 0)$	RRW
1	$9,100 \cdot 10^{-6}$	1,6
2	$5,460 \cdot 10^{-6}$	2,667
3	$1,400 \cdot 10^{-5}$	1,040
4	$5,600 \cdot 10^{-7}$	26
5	$1,248 \cdot 10^{-5}$	1,167
6	$2,080 \cdot 10^{-6}$	7

Tabla 4.19. Resumen de los RRW

Del análisis del índice RRW se deduce que el mayor descenso del riesgo se produce con la reducción del fallo 4. Le sigue el 6. Con el 3 y el 5 casi no se produce mejora.

### 8) Propuesta de medidas correctoras

Para reducir la probabilidad de derrame incontrolado, se proponen las siguientes medidas correctoras:

- a) Añadir un segundo control de nivel, por si el primero falla, que le indique a la bomba que pare.
- b) Destinar dos operarios para vigilar el nivel L1.

- c) Añadir una segunda conducción, con su válvula, del depósito D1 al depósito de vertido seguro (D3).
- d) Incluir un segundo rebosadero en el depósito D1.
- e) Enviar a un operario a comprobar, y corregir si es necesario, que, tras realizar cualquier operación de mantenimiento que conlleve accionar la válvula de conexión al depósito D3, esta se deje en posición abierta de nuevo.

De estas medidas se deciden implantar la *a* y la *b*, ya que son las que están involucradas con los sucesos 1, 2 y 4, que son los que tienen una mayor relevancia en el suceso *top* tal y como se ha deducido de los análisis realizados (RAW y RRW). La medida *a* reduce la probabilidad de fallo del control automático de la bomba, mientras que la medida *b* reduce la probabilidad de fallo del control humano. Para verificar que estas medidas son adecuadas, será necesario que la probabilidad del suceso *top* se reduzca significativamente. Se añadirán, por tanto, los siguientes sucesos:

Suceso 7: fallo del 2º operario, cuya probabilidad es de 0,05

Suceso 8: fallo del 2º LC, cuya probabilidad es de 0,003.

### 9) Esquema de la instalación mejorada

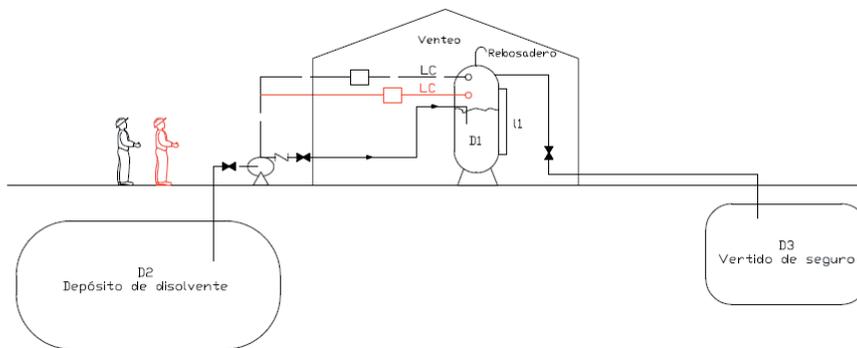


Figura 4.7. Esquema de la planta de almacenamiento de disolvente mejorada

10) *Definición del nuevo árbol de la instalación y cálculo de la disminución de la probabilidad del suceso no deseado*

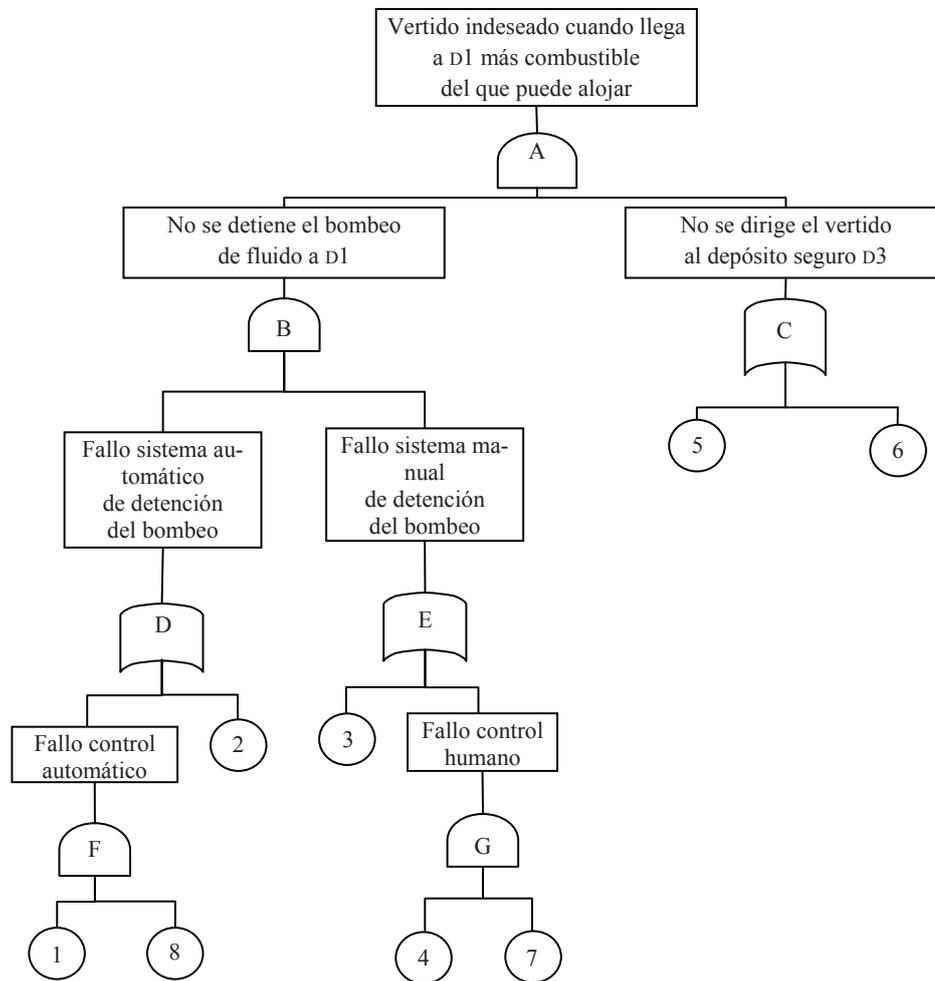


Figura 4.8. Árbol de fallos del sistema mejorado

La ecuación booleana del nuevo sistema es:

$$Top = A = B \wedge C = (D \wedge E) \wedge (5 \vee 6) = [(F \vee 2) \wedge (3 \vee G)] \wedge (5 \vee 6) = [(1 \wedge 8) \vee 2] \wedge (3 \vee (4 \wedge 7))] \wedge (5 \vee 6)$$

La ecuación reducida aplicando las leyes del álgebra de Boole sería:

$$Top = [(1 \wedge 8 \wedge 3) \vee (1 \wedge 8 \wedge 4 \wedge 7) \vee (2 \wedge 3) \vee (2 \wedge 4 \wedge 7)] \wedge (5 \vee 6) = (1 \wedge 8 \wedge 3 \wedge 5) \vee (1 \wedge 8 \wedge 4 \wedge 7 \wedge 5) \vee (2 \wedge 3 \wedge 5) \vee (2 \wedge 4 \wedge 7 \wedge 5) \vee (1 \wedge 8 \wedge 3 \wedge 6) \vee (1 \wedge 8 \wedge 4 \wedge 7 \wedge 6) \vee (2 \wedge 3 \wedge 6) \vee (2 \wedge 4 \wedge 7 \wedge 6)$$

Como puede observarse, frente al sistema inicial casi todos los conjuntos mínimos de fallos han subido a orden 4 y 5. La probabilidad de los CMC es:

CMC	Prob.	CMCD	Prob.
1, 8, 3, 5	$9 \cdot 10^{-11}$	2, 3, 5	$5 \cdot 10^{-8}$
1, 8, 3, 6	$5,4 \cdot 10^{-10}$	2, 3, 6	$3 \cdot 10^{-7}$
1, 8, 4, 7, 5	$1,13 \cdot 10^{-10}$	2, 4, 7, 5	$6,25 \cdot 10^{-8}$
1, 8, 4, 7, 6	$6,75 \cdot 10^{-10}$	2, 4, 7, 6	$3,75 \cdot 10^{-7}$

Tabla 4.20. Probabilidad de los CMC del sistema mejorado

La probabilidad del suceso *top* es:

$$P(top) = 7,889 \cdot 10^{-7}$$

Por tanto, la mejora de la probabilidad de riesgo de incendio es:

$$\frac{P(top)_{inicial}}{P(top)_{mejorado}} = \frac{1,456 \cdot 10^{-5}}{7,889 \cdot 10^{-7}} = 18,5$$

Se ha disminuido por 18 la probabilidad de que haya un derrame de disolvente, que se considera suficiente para llevar adelante las medidas correctoras propuestas.

#### 4.4. Caso 3: AF cafetera

##### 1) Descripción de la instalación

Una máquina expendedora de cafés consta básicamente de tres depósitos, en el primero hay café; en el segundo, leche; y en el tercero, chocolate. De cada depósito sale un pequeño tubo (L1, L2 y L3, respectivamente) que conduce el fluido hacia el vaso de plástico. A la salida de cada depósito hay una pequeña válvula (v1, v2 y v3, respectivamente) que en principio está cerrada y que abre cuando se selecciona la bebida para dar paso a la bebida hacia el vaso. A veces los tubos se pueden bloquear debido a deposiciones sólidas de las bebidas. Por su parte, las válvulas pueden quedar bloqueadas en cerrado y, por tanto, no abrir cuando se selecciona la bebida.

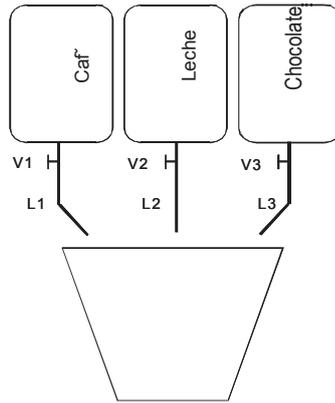


Figura 4.9. Esquema de la cafetera

### 2) Definición del objetivo y alcance

El objetivo del análisis es disminuir la probabilidad de que la máquina no ofrezca ninguna bebida, sabiendo que la probabilidad de que una válvula se quede bloqueada en cerrado es del 0,03, y la probabilidad de que un tubo esté obstruido es de 0,015. Suceso *top*: la máquina no expende las bebidas que puede ofrecer.

### 3) Definición del árbol de fallos para el suceso no deseado

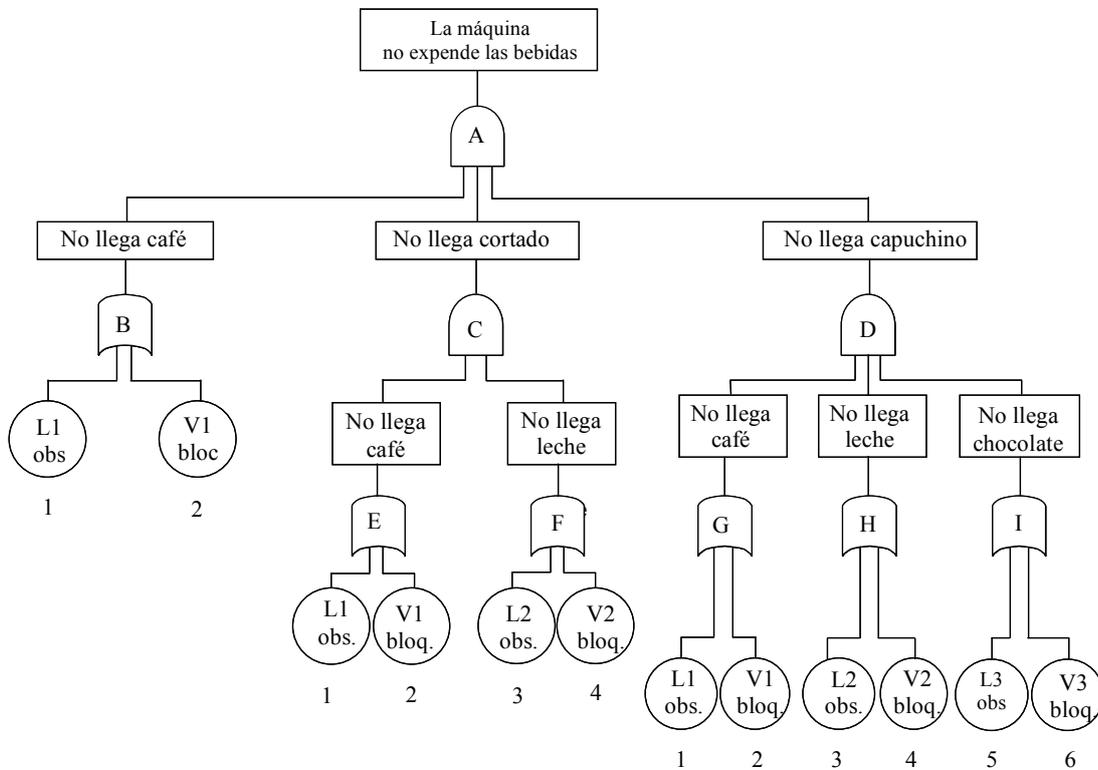


Figura 4.10. Árbol de fallos de la máquina de café

4) Ecuación booleana, la ecuación reducida y los conjuntos mínimos de fallo

$$A = B \wedge C \wedge D = (1 \vee 2) \wedge (E \wedge F) \wedge (G \wedge H \wedge I)$$

$$A = (1 \vee 2) \wedge [(1 \vee 2) \wedge (3 \vee 4)] \wedge [(1 \vee 2) \wedge (3 \vee 4) \wedge (5 \vee 6)]$$

$$A = (1 \wedge 3 \wedge 5) \vee (1 \wedge 4 \wedge 5) \vee (2 \wedge 3 \wedge 5) \vee (2 \wedge 4 \wedge 5) \vee (1 \wedge 3 \wedge 6) \vee (1 \wedge 4 \wedge 6) \vee (2 \wedge 3 \wedge 6) \vee (2 \wedge 4 \wedge 6)$$

Los conjuntos mínimos de corte son:

{1, 3, 5}    {1, 4, 5}    {2, 3, 5}    {2, 4, 5}    {1, 3, 6}    {1, 4, 6}    {2, 3, 6}    {2, 4, 6}

5) Análisis cualitativo de la importancia

Suceso básico	Orden del conjunto			Importancia $\sum \frac{n}{orden}$
	I	II	III	
1			4	4/3
2			4	4/3
3			4	4/3
4			4	4/3
5			4	4/3
6			4	4/3

Tabla 4.21. Importancia cualitativa de los sucesos básicos

Del análisis cualitativo se desprende que todos los sucesos básicos tienen la misma importancia.

6) Análisis cuantitativo, cálculo de la probabilidad del suceso top

	CMC	Probabilidad CMC
P (L1 obs.)	0,015	{1, 3, 5}    0,00000675
P (v1 bloq.)	0,03	{1, 4, 5}    0,0000135
P (L2 obs.)	0,015	{2, 3, 5}    0,00000675
P (v2 bloq.)	0,03	{2, 4, 5}    0,0000135
P (L3 obs.)	0,015	{1, 3, 6}    0,00000675
P (v3 bloq.)	0,03	{1, 4, 6}    0,0000135
		{2, 3, 6}    0,0000135
		{2, 4, 6}    0,000027

Tabla 4.22. Probabilidad de los CMC

La probabilidad del suceso top es:  $P(top) = 0,000101246$ .

7) *Análisis cuantitativo de la importancia. Cálculo de los índices RAW y RRW*

Cálculo de coeficientes RAW

CMC				Probabilidad
{1, 3, 5}	1	0,015	0,015	0,000225
{1, 4, 5}	1	0,03	0,015	0,00045
{2, 3, 5}	0,03	0,015	0,015	0,00000675
{2, 4, 5}	0,03	0,03	0,015	0,0000135
{1, 3, 6}	1	0,015	0,03	0,00045
{1, 4, 6}	1	0,03	0,03	0,0009
{2, 3, 6}	0,03	0,015	0,03	0,0000135
{2, 4, 6}	0,03	0,03	0,03	0,000027

$P(top, F1 = 1)$	0,002084209
RAW 1	20,58565734

Tabla 4.23. Ejemplo de cálculo RAW 1

Por tanto, los índices RAW calculados son:

Suceso con P = 1	$P(top, Psuceso = 1)$	RAW
1	0,002084209	20,58565734
2	0,002053896	20,28626105
3	0,002084209	20,58565734
4	0,002053896	20,28626105
5	0,002084209	20,58565734
6	0,002053896	20,28626105

Tabla 4.24. Valor de los RAW

Todos los sucesos producen la misma degradación del sistema en caso de producirse.

## Cálculo de coeficientes RRW

CMC	Probabilidad			
{1, 3, 5}	0	0,015	0,015	0
{1, 4, 5}	0	0,03	0,015	0
{2, 3, 5}	0,03	0,015	0,015	0,00000675
{2, 4, 5}	0,03	0,03	0,015	0,0000135
{1, 3, 6}	0	0,015	0,03	0
{1, 4, 6}	0	0,03	0,03	0
{2, 3, 6}	0,03	0,015	0,03	0,0000135
{2, 4, 6}	0,03	0,03	0,03	0,000027

$P(top, F1 = 1) =$	$6,07487 \cdot 10^{-5}$
RRW 1	1,666630417

Tabla 4.25. Ejemplo de cálculo RRW 1

Los índices RRW calculados son:

Suceso con $P = 0$	$P(top, Psuceso = 0)$	RRW
1	$6,07487 \cdot 10^{-5}$	1,666630417
2	$4,04994 \cdot 10^{-5}$	2,499929689
3	$6,74984 \cdot 10^{-5}$	1,499972325
4	$3,37496 \cdot 10^{-5}$	2,999908202
5	$6,07487 \cdot 10^{-5}$	1,666630417
6	$3,03747 \cdot 10^{-5}$	3,333225835

Aquellos sucesos cuya eliminación produciría un mayor descenso de la probabilidad del suceso *top* son el 6, seguido del 4 y del 2, es decir, los bloqueos de las válvulas.

## 4.5. Caso 4: AF planta de residuos sólidos urbanos

### 1) Descripción de la instalación

Uno de los puntos críticos en el funcionamiento de una planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU) es el trómel. El trómel es un cilindro giratorio encargado de abrir las bolsas de RSU y separar los residuos orgánicos. El trómel se encuentra al principio del proceso, justo después de los pozos de recepción de residuos y las líneas de separación manual y mecánica de voluminosos. Uno de los problemas que puede sufrir el trómel, entre otros, es la obstrucción debido a la llegada de objetos voluminosos que no han sido separados previamente. Si el trómel se obstruye por la llegada de estos objetos, podría dejar de girar y, por tanto, se podría quemar su motor. Esto provocaría, además, la parada del proceso con la consiguiente acumulación de residuos que no recibirían tratamiento y colapsarían la planta en esta primera sección.

La separación previa de residuos voluminosos se realiza, en primer lugar, en los pozos de recepción de residuos con la ayuda de dos pulpos mecánicos; en segundo lugar, en las líneas manuales de separación; y en tercer lugar, en la línea de separación mecánica (trómel). La planta cuenta con dos pozos de recepción (pozo 1 y pozo 2) que trabajan en paralelo. Cada pozo cuenta con un pulpo mecánico (pulpo 1 y pulpo 2). Los pulpos se accionan mecánicamente gracias a dos operarios (operario 1 y operario 2) que controlan el proceso desde una cabina. Los pulpos apartan los objetos más voluminosos y dejan el resto de residuos sobre unas cintas mecánicas (línea 1 y línea 2) que transportan los residuos hasta el área de separación manual. En caso de que los pulpos dejen pasar algún objeto voluminoso importante, en esta zona dos operarios (operario 3 y operario 4), situados en la línea 3, uno detrás del otro de manera que complementan su trabajo, apartan estos objetos manualmente. En la misma línea 3, un poco más adelante, un filtro mecánico complementa este proceso de separación de voluminosos de manera que separa los objetos grandes que podrían obstruir el trómel.

Se ha observado que, a veces, los pulpos no agarran correctamente la carga. Uno de los motivos es que el sistema de cierre de las pinzas no funcione correctamente, es decir,

que las pinzas estén bloqueadas. Otro motivo importante observado es que desde la cabina donde los operarios controlan los movimientos del pulpo no llegue la señal a los mecanismos de los pulpos, es decir, que haya una transmisión incorrecta de la señal. También se puede dar el caso que los operarios que manejan los pulpos se encuentren distraídos y no hayan separado algún objeto de gran tamaño que no debería haber caído en las cintas. Por otro lado, es posible que los operarios 3 y 4 se distraigan y dejen pasar algún objeto voluminoso hacia el filtro mecánico, el cual impedirá que estos objetos voluminosos se introduzcan en el trómel, salvo en el caso de que este filtro no funcione adecuadamente.

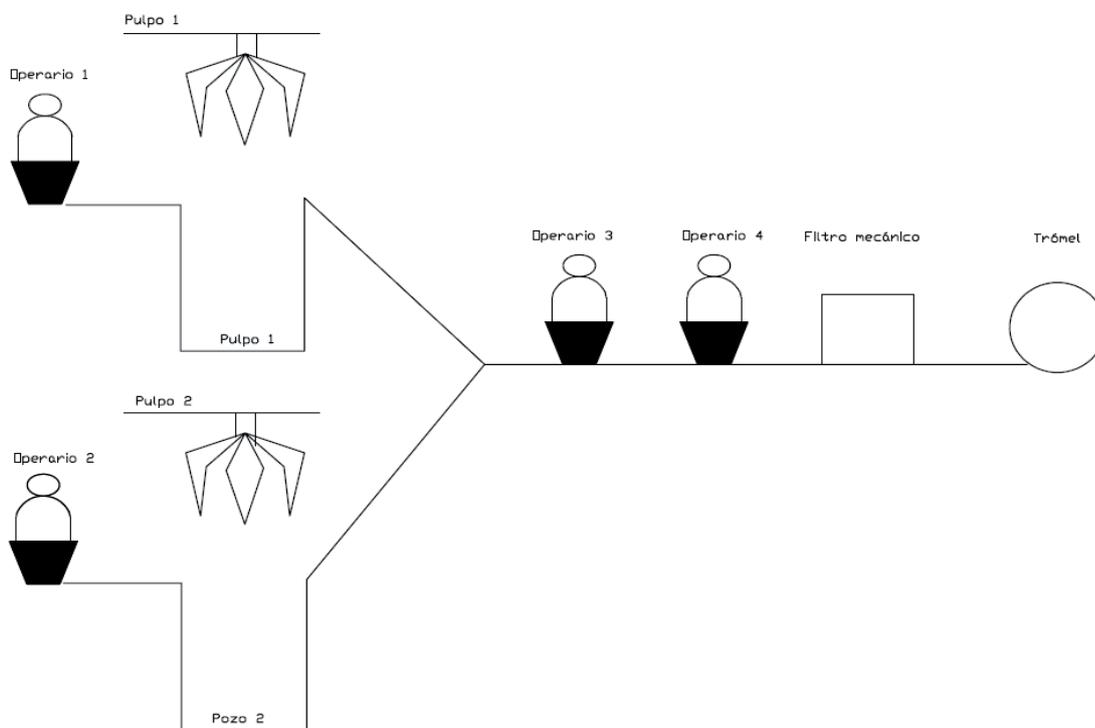


Figura 4.11. Esquema de la instalación de separación de residuos

## 2) Definición del objetivo y alcance

En este problema se trata de analizar la probabilidad de que se produzca el suceso indeseado o suceso *top*: llegan residuos voluminosos al trómel, mediante un árbol de fallos.

Como datos para abordar el problema, se pueden considerar los siguientes sucesos básicos con sus correspondientes datos de tasas de fallo:

- Probabilidad de distracción de un operario:  $2 \cdot 10^{-3}$
- Probabilidad de fallo del filtro mecánico:  $4 \cdot 10^{-5}$
- Probabilidad de bloqueo de las pinzas del pulpo:  $3 \cdot 10^{-4}$
- Probabilidad de fallo de transmisión de señal al pulpo:  $10^{-5}$

3) *Definición del árbol de fallos para el suceso no deseado*

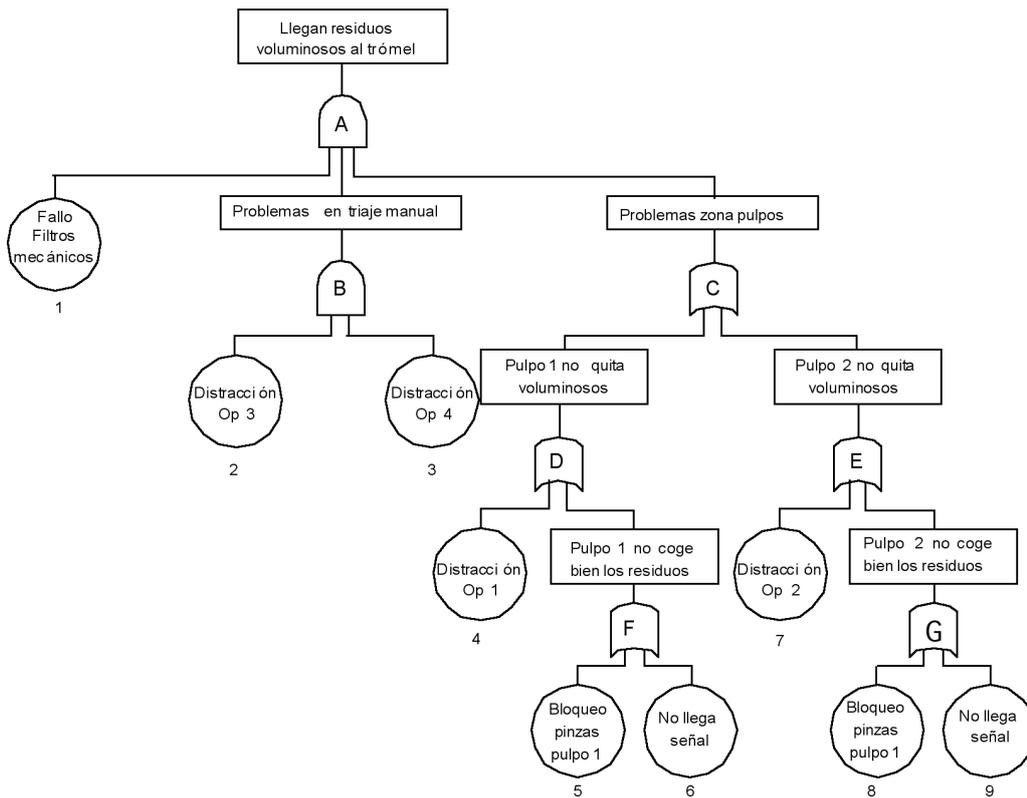


Figura 4.12. Árbol de fallos

4) *Ecuación booleana, la ecuación reducida y los conjuntos mínimos de corte*

A partir del árbol anterior se plantea la siguiente ecuación:

Ecuación booleana inicial

$$A = 1 \wedge B \wedge C$$

$$A = 1 \wedge (2 \wedge 3) \wedge (D \vee E)$$

$$A = 1 \wedge 2 \wedge 3 \wedge ((4 \vee F) \vee (7 \vee G))$$

$$A = 1 \wedge (2 \wedge 3) \wedge (4 \vee (5 \vee 6) \vee 7 \vee (8 \vee 9))$$

Ecuación reducida

$$A = (1 \wedge 2 \wedge 3 \wedge 4) \vee (1 \wedge 2 \wedge 3 \wedge 5) \vee (1 \wedge 2 \wedge 3 \wedge 6) \vee (1 \wedge 2 \wedge 3 \wedge 7) \vee (1 \wedge 2 \wedge 3 \wedge 8) \vee (1 \wedge 2 \wedge 3 \wedge 9)$$

Se obtienen los seis conjuntos mínimos de corte siguientes:

{1, 2, 3, 4} {1, 2, 3, 5} {1, 2, 3, 6} {1, 2, 3, 7} {1, 2, 3, 8} {1, 2, 3, 9}

5) *Análisis cualitativo de la importancia*

Los conjuntos mínimos de corte han resultado ser todos de orden 4.

Suceso básico	Orden del conjunto				Importancia $\sum \frac{n}{orden}$
	I	II	III	IV	
1				6	6/4 = 1,5
2				6	6/4 = 1,5
3				6	6/4 = 1,5
4				1	1/4 = 0,25
5				1	1/4 = 0,25
6				1	1/4 = 0,25
7				1	1/4 = 0,25
8				1	1/4 = 0,25
9				1	1/4 = 0,25

Tabla 4.26. Análisis cualitativo de la importancia

Según el análisis cualitativo de la importancia los sucesos más determinantes son el 1, el 2 y el 3, es decir, el fallo del filtro mecánico o la distracción de los operarios de la línea 3.

6) *Análisis cuantitativo, cálculo de la probabilidad del suceso top*

Para analizar el árbol, se calcula, en primer lugar, la probabilidad de cada conjunto mínimo de corte y seguidamente se calcula la probabilidad del suceso top.

P1	0,00004	P6	0,00001	<table border="1"> <thead> <tr> <th>CMC</th> <th>Probabilidad (CMC)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1,2,3,4</td> <td><math>3,2 \cdot 10^{-13}</math></td> </tr> <tr> <td>1,2,3,5</td> <td><math>4,8 \cdot 10^{-14}</math></td> </tr> <tr> <td>1,2,3,6</td> <td><math>1,6 \cdot 10^{-15}</math></td> </tr> <tr> <td>1,2,3,7</td> <td><math>3,2 \cdot 10^{-13}</math></td> </tr> <tr> <td>1,2,3,8</td> <td><math>4,8 \cdot 10^{-14}</math></td> </tr> <tr> <td>1,2,3,9</td> <td><math>1,6 \cdot 10^{-15}</math></td> </tr> </tbody> </table>	CMC	Probabilidad (CMC)	1,2,3,4	$3,2 \cdot 10^{-13}$	1,2,3,5	$4,8 \cdot 10^{-14}$	1,2,3,6	$1,6 \cdot 10^{-15}$	1,2,3,7	$3,2 \cdot 10^{-13}$	1,2,3,8	$4,8 \cdot 10^{-14}$	1,2,3,9	$1,6 \cdot 10^{-15}$
CMC	Probabilidad (CMC)																	
1,2,3,4	$3,2 \cdot 10^{-13}$																	
1,2,3,5	$4,8 \cdot 10^{-14}$																	
1,2,3,6	$1,6 \cdot 10^{-15}$																	
1,2,3,7	$3,2 \cdot 10^{-13}$																	
1,2,3,8	$4,8 \cdot 10^{-14}$																	
1,2,3,9	$1,6 \cdot 10^{-15}$																	
P2	0,02	P7	0,02															
P3	0,02	P8	0,0003															
P4	0,02	P9	0,00001															
P5	0,02																	

Tabla 4.27. Probabilidad de los CMC

La probabilidad del *top* resultante es:

$$P(\text{top}) = 7,39 \cdot 10^{-13}$$

7) *Análisis cuantitativo de la importancia. Cálculo de los índices RAW y RRW*

Cálculo del índice RAW (*Risk Achievement Worth*)

$$RAW_i = \frac{F(\text{top}, Fi = 1)}{F(\text{top})}$$

CMC					Probabilidad
{1, 2, 3, 4}	1	0,02	0,02	0,02	$8 \cdot 10^{-9}$
{1, 2, 3, 5}	1	0,02	0,02	0,0003	$1,2 \cdot 10^{-9}$
{1, 2, 3, 6}	1	0,02	0,02	0,00001	$4 \cdot 10^{-11}$
{1, 2, 3, 7}	1	0,02	0,02	0,02	$8 \cdot 10^{-9}$
{1, 2, 3, 8}	1	0,02	0,02	0,0003	$1,2 \cdot 10^{-9}$
{1, 2, 3, 9}	1	0,02	0,02	0,00001	$4 \cdot 10^{-11}$

$P(\text{top}, F1 = 1) =$	$6,07487 \cdot 10^{-5}$
RAW 1	1,666630417

Tabla 4.28. Ejemplo de cálculo RAW 1

Los índices RAW para cada suceso básico se resumen en la siguiente tabla:

Suceso con P = 1	$P(top, P_{\text{suceso}} = 1)$	RAW
1	$6,07487 \cdot 10^{-5}$	1,666630417
2	$3,70 \cdot 10^{-10}$	$5,00 \cdot 10^2$
3	$3,70 \cdot 10^{-10}$	$5,00 \cdot 10^2$
4	$1,60 \cdot 10^{-10}$	$2,17 \cdot 10^2$
5	$1,61 \cdot 10^{-10}$	$2,17 \cdot 10^2$
6	$1,61 \cdot 10^{-10}$	$2,18 \cdot 10^2$
7	$1,60 \cdot 10^{-10}$	$2,17 \cdot 10^2$
8	$1,61 \cdot 10^{-10}$	$2,17 \cdot 10^2$
9	$1,61 \cdot 10^{-10}$	$2,18 \cdot 10^2$

Tabla 4.29. Valor de los RAW

Según el índice RAW que mide la degradación del sistema en caso de ocurrir el fallo de un determinado componente, los sucesos que convendría modificar son el 1, seguido del 2 y del 3.

Cálculo del índice RRW (*Risk Reduction Worth*)

$$RRW_i = \frac{F(top)}{F(top, F_i = 0)}$$

CMC					Probabilidad
{1,2,3,4}	0	0,02	0,02	0,02	0
{1,2,3,5}	0	0,02	0,02	0,0003	0
{1,2,3,6}	0	0,02	0,02	0,00001	0
{1,2,3,7}	0	0,02	0,02	0,02	0
{1,2,3,8}	0	0,02	0,02	0,0003	0
{1,2,3,9}	0	0,02	0,02	0,00001	0

$P(top, F_1 = 0) =$	0
RAW 1	$\infty$

Tabla 4.30. Ejemplo de cálculo RRW 1

Los índices RRW para cada suceso básico se resumen en la siguiente tabla:

Suceso con $P = 0$	$P(top, P_{\text{suceso}} = 0)$	RRW
1	0,00	$\infty$
2	0,00	$\infty$
3	0,00	$\infty$
4	$4,19 \cdot 10^{-13}$	1,76
5	$6,91 \cdot 10^{-13}$	1,07
6	$7,37 \cdot 10^{-13}$	1,00
7	$4,19 \cdot 10^{-13}$	1,76
8	$6,91 \cdot 10^{-13}$	1,07
9	$7,37 \cdot 10^{-13}$	1,00

Tabla 4.31. Valor de los RRW

Desde el punto de vista de descenso del riesgo, si se considera que un componente es completamente fiable (no falla nunca) los sucesos básicos más determinantes son el 1, el 2 y el 3.

#### 8) *Propuesta de medidas correctoras*

El análisis cualitativo y el cuantitativo coinciden en que los sucesos más determinantes para que se produzca el suceso *top* son el 1, el 2 y el 3. Por tanto, se actuará sobre estos sucesos.

Se podría introducir un filtro mecánico auxiliar antes de los operarios 3 y 4, y otro operario que revise los residuos que transporta la cinta entre el filtro mecánico inicial y el trómel.

9) *Esquema de la instalación mejorada*

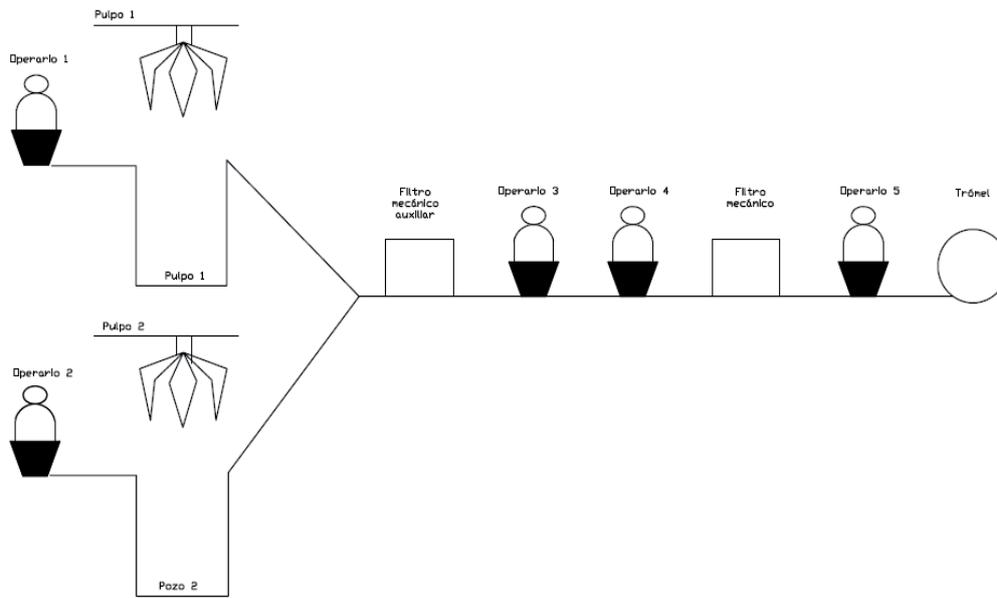


Figura 4.13. Esquema de la instalación de separación de residuos

10) *Definición del nuevo árbol de la instalación y cálculo de la disminución de la probabilidad del suceso no deseado*

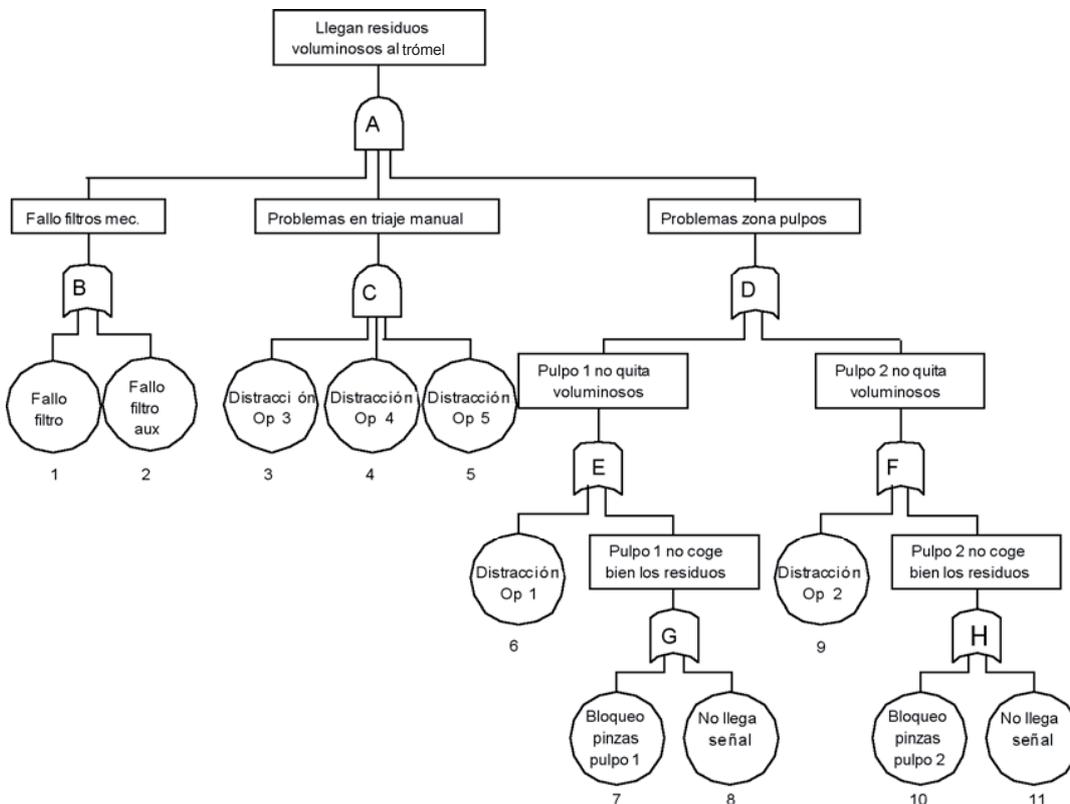


Figura 4.14. Árbol de fallos de la instalación mejorada para el suceso *top* analizado

$$A = B \wedge C \wedge D$$

$$A = (1 \vee 2) \wedge (3 \wedge 4 \wedge 5) \wedge (E \vee F)$$

$$A = (1 \vee 2) \wedge (3 \wedge 4 \wedge 5) \wedge ((6 \vee G) \vee (9 \vee G8))$$

$$A = (1 \vee 2) \wedge (3 \wedge 4 \wedge 5) \wedge (6 \vee (7 \vee 8) \vee 9 \vee (10 \vee 11))$$

$$A = (1 \wedge 3 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 6) \vee (1 \wedge 3 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 7) \vee (1 \wedge 3 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 8) \vee (1 \wedge 3 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 9) \vee (1 \wedge 3 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 10) \vee (1 \wedge 3 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 11) \vee (2 \wedge 3 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 6) \vee (2 \wedge 3 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 7) \vee (2 \wedge 3 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 8) \vee (2 \wedge 3 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 9) \vee (2 \wedge 3 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 10) \vee (2 \wedge 3 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 11)$$

Los conjuntos mínimos de corte son ahora:

{1,3,4,5,6}	{1,3,4,5,7}	{1,3,4,5,8}	{1,3,4,5,9}	{1,3,4,5,10}	{1,3,4,5,11}
{2,3,4,5,6}	{2,3,4,5,7}	{2,3,4,5,8}	{2,3,4,5,9}	{2,3,4,5,10}	{2,3,4,5,11}

Y la nueva probabilidad del suceso *top* es:

$$P(top) = 3,11 \cdot 10^{-15}$$

$$\frac{P(top)_{inicial}}{P(top)_{mejorado}} = \frac{7,3896 \cdot 10^{-13}}{3,11 \cdot 10^{-15}} = 238$$

La probabilidad de que lleguen objetos voluminosos se ha reducido en 238 veces, lo que se considera una gran mejora respecto al sistema inicial, ya que es importante que la planta tenga un funcionamiento continuo, sin necesidad de detenerla para liberar la entrada al trómel de residuos voluminosos, lo que supone una mayor intervención de mano de obra, un menor rendimiento de la instalación y un mayor tiempo de vida del trómel.

## 4.6. Caso 5: AF refinería de azúcar

### 1) Descripción de la instalación

Existen determinadas sustancias, como es el caso del polvo de azúcar que, aunque parezca inofensivo, bajo ciertas condiciones puede provocar explosiones. En las refinерías de azúcar, por ejemplo, se pueden producir explosiones en caso de formarse una nube de polvo de elevada concentración que se ponga en contacto con algún punto de ignición. La zona de envasado de una refinería de azúcar consta de unos silos que almacenan el azúcar refinado, que posteriormente se introduce en los paquetes y se cierran mediante un aporte de calor.

En la parte inferior del silo existe una válvula dosificadora automática que abre a medida que se necesita envasar azúcar. Existe siempre un operario que controla este proceso, de manera que si se produce algún fallo en la válvula, por ejemplo que quede bloqueada en abierto, el operario pueda accionarla de forma manual y de este modo se evita verter polvo de azúcar y con ello, la formación de nubes de polvo en la zona de envasado. En esta zona de envasado existe también un detector de concentraciones elevadas de polvo, de modo que al superarse una concentración máxima predefinida acciona un sistema de extracción de polvo. Este sistema de extracción cuenta con dos aspiradores.

Como se ha comentado anteriormente, en la zona de envasado existen superficies que se encuentran a temperaturas elevadas, por ejemplo aquellas que se dedican a sellar los paquetes. Tanto el aumento excesivo de temperatura en alguna de estas zonas como un posible deterioro del cableado que allí se dispone, pueden provocar algún tipo de chispa que finalmente derive en la ignición de una nube de polvo. Para evitar el calentamiento excesivo de las superficies de sellado de los paquetes se emplea un termostato. Si el termostato no actuara, existe un dispositivo de alarma que suena cuando la temperatura supera la temperatura máxima predefinida, con lo cual el operario encargado puede regular la temperatura de dichas superficies manualmente.

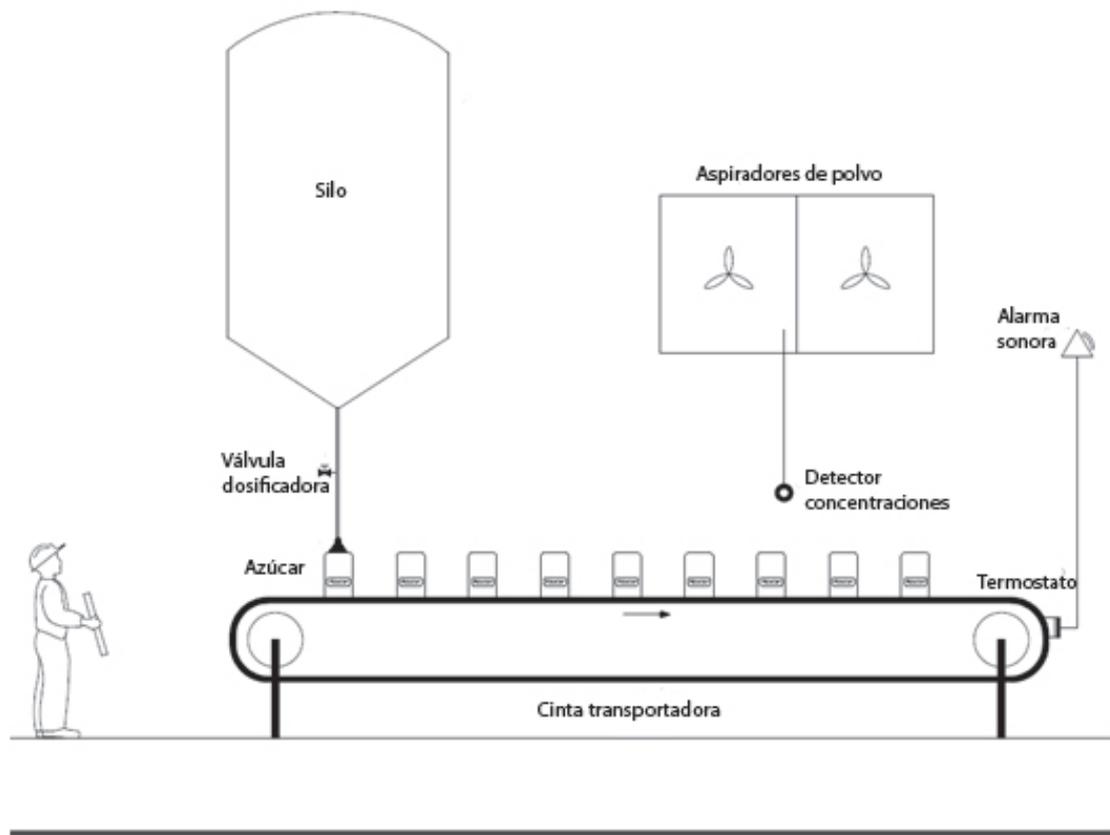


Figura 4.15. Esquema de la refinería de azúcar

## 2) Definición del objetivo y alcance

El objetivo de este ejercicio es analizar la probabilidad de que se produzca el suceso no deseado o suceso *top*: explosión de nube de polvo de azúcar.

Como datos para abordar el problema se pueden considerar los siguientes:

- Probabilidad de bloqueo en abierto de la válvula automática dosificadora: 0,008.
- Probabilidad de despiste de un operario: 0,002.
- Probabilidad de fallo en la transmisión de señal del detector de concentraciones elevadas de polvo a los ventiladores: 0,0315.
- Probabilidad de fallo de un aspirador: 0,0015.
- Probabilidad de desgaste del cableado: 0,0017.
- Probabilidad de fallo del termostato: 0,0013.
- Probabilidad de fallo de la alarma acústica: 0,0012.

Definición del árbol de fallos para el suceso no deseado

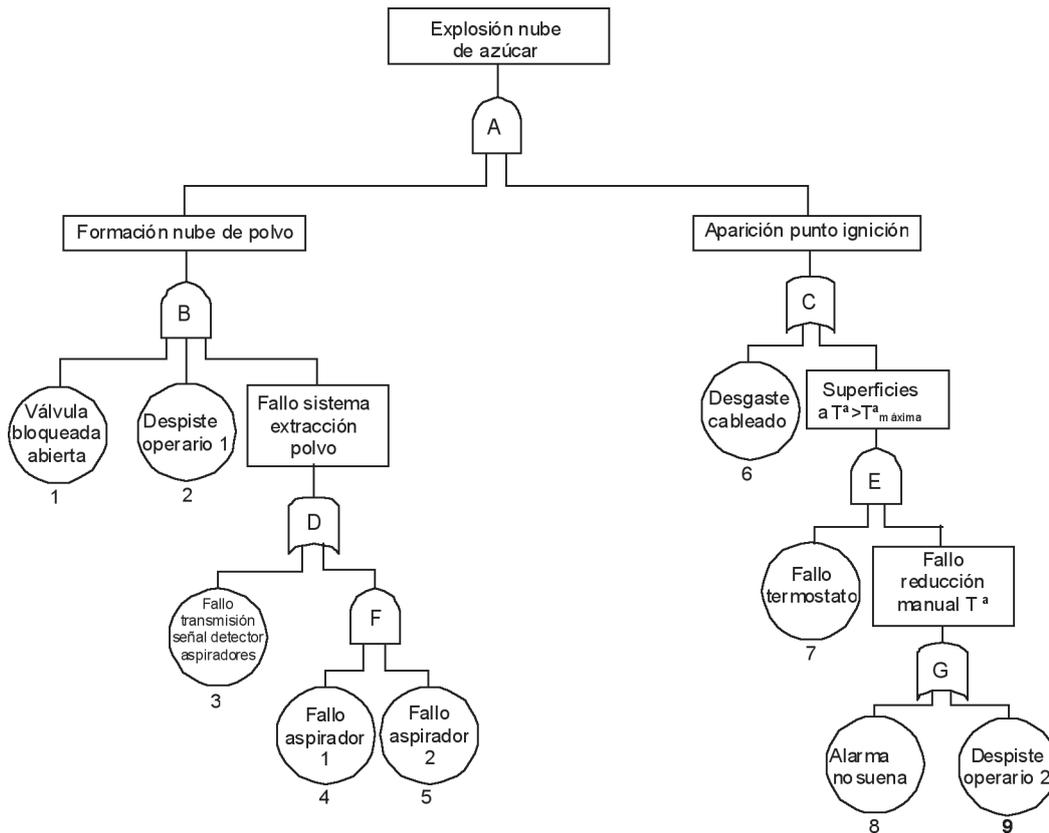


Figura 4.16. Árbol de fallos de explosión de nube de azúcar

Ecuación booleana, la ecuación reducida y los conjuntos mínimos de fallo

$$A = B \wedge C$$

$$A = (1 \wedge 2 \wedge D) \wedge (6 \vee E) = (1 \wedge 2 \wedge (3 \vee F)) \wedge [6 \vee ((7 \wedge G))]$$

$$A = [1 \wedge 2 \wedge (3 \vee (4 \wedge 5))] \wedge [6 \vee (7 \wedge (8 \vee 9))]$$

Simplificación de la ecuación:

$$A = [(1 \wedge 2 \wedge 3) \vee (1 \wedge 2 \wedge 4 \wedge 5)] \wedge [6 \vee ((7 \wedge 8) \vee (7 \wedge 9))]$$

$$A = [(1 \wedge 2 \wedge 3) \vee (1 \wedge 2 \wedge 4 \wedge 5)] \wedge [(6 \vee (7 \wedge 8)) \vee (7 \wedge 9)]$$

Ecuación reducida:

$$A = (1 \wedge 2 \wedge 3 \wedge 6) \vee (1 \wedge 2 \wedge 3 \wedge 7 \wedge 8) \vee (1 \wedge 2 \wedge 3 \wedge 7 \wedge 9) \vee$$

$$\vee (1 \wedge 2 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 6) \vee (1 \wedge 2 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 7 \wedge 8) \vee (1 \wedge 2 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 7 \wedge 9)$$

Conjuntos mínimos de corte:

{1, 2, 3, 6}    {1, 2, 3, 7, 8}    {1, 2, 3, 7, 9}    {1, 2, 4, 5, 6}    {1, 2, 4, 5, 7, 8}    {1, 2, 4, 5, 7, 9}

5) *Análisis cualitativo de la importancia*

Un conjunto mínimo de fallo es de orden 4, tres CMC son de orden 5 y dos conjuntos mínimos de corte son de orden 6.

Suceso básico	Orden del conjunto						Importancia $\sum \frac{n}{orden}$
	I	II	III	IV	V	VI	
1				1	3	2	= 1/4 + 3/5 + 2/6 = 1,183
2				1	3	2	= 1/4 + 3/5 + 2/6 = 1,183
3				1	2		= 1/4 + 2/5 = 0,65
4					1	2	= 1/5 + 2/6 = 0,53
5					1	2	= 1/5 + 2/6 = 0,53
6				1	1		= 1/4 + 1/5 = 0,45
7					2	2	= 2/5 + 2/6 = 0,73
8					1	1	= 1/5 + 1/6 = 0,36
9					1	1	= 1/5 + 1/6 = 0,36

Tabla 4.32. Análisis cualitativo de la importancia

Según el análisis cualitativo de la importancia, los sucesos más importantes son el 1 y el 2.

6) *Análisis cuantitativo, cálculo de la probabilidad del suceso top*

Para analizar el árbol, se calcula en primer lugar la probabilidad de cada conjunto mínimo de fallo y seguidamente se calcula la probabilidad del suceso *top*.

P1	0,0008	P6	0,0017
P2	0,0315	P7	0,0013
P3	0,0015	P8	0,0012
P4	0,0015	P9	0,002
P5	0,002		

Tabla 4.33. Probabilidad de los sucesos básicos

CMC	Probabilidad (CMC)
{1, 2, 3, 6}	$6,426 \cdot 10^{-10}$
{1, 2, 3, 7, 8}	$5,8968 \cdot 10^{-13}$
{1, 2, 3, 7, 9}	$9,828 \cdot 10^{-13}$
{1, 2, 4, 5, 6}	$1,2852 \cdot 10^{-12}$
{1, 2, 4, 5, 7, 8}	$1,17936 \cdot 10^{-15}$
{1, 2, 4, 5, 7, 9}	$1,9656 \cdot 10^{-15}$

Tabla 4.34. Probabilidad de los CMC

La probabilidad del *top* se calcula en función de las probabilidades de los conjuntos mínimos de corte según la siguiente ecuación:  $P(top) = 1 - \prod (1 - P(CMC_i))$ . Luego,  $P(top) = 6,45 \cdot 10^{-10}$ .

7) *Análisis cuantitativo de la importancia. Cálculo de los índices RAW y RRW*

Cálculo del índice RAW (*Risk Achievement Worth*)

$$RAW_i = \frac{F(top, Fi = 1)}{F(top)}$$

CMC							Probabilidad
{1, 2, 3, 6}	1	0,0315	0,0015	0,0017			$8 \cdot 10^{-9}$
{1, 2, 3, 7, 8}	1	0,0315	0,0015	0,0013	0,0012		$1,2 \cdot 10^{-9}$
{1, 2, 3, 7, 9}	1	0,0315	0,0015	0,0013	0,002		$4 \cdot 10^{-11}$
{1, 2, 4, 5, 6}	1	0,0315	0,0015	0,002	0,0017		$8 \cdot 10^{-9}$
{1, 2, 4, 5, 7, 8}	1	0,0315	0,0015	0,002	0,0013	0,0012	$1,2 \cdot 10^{-9}$
{1, 2, 4, 5, 7, 9}	1	0,0315	0,0015	0,002	0,0013	0,002	$4 \cdot 10^{-11}$

$P(top, F1 = 1) =$	$8,07 \cdot 10^{-8}$
RAW 1	$1,25 \cdot 10^2$

Tabla 4.35. Ejemplo de cálculo para el RAW 1

Los índices RAW para cada suceso básico se resumen en la siguiente tabla:

Suceso con P = 1	$P(top, Psuceso = 1)$	RAW
1	$8,07 \cdot 10^{-8}$	$1,25 \cdot 10^2$
2	$2,05 \cdot 10^{-8}$	$3,17 \cdot 10^1$
3	$4,29 \cdot 10^{-7}$	$6,65 \cdot 10^2$
4	$1,50 \cdot 10^{-9}$	2,33
5	$1,29 \cdot 10^{-9}$	2,00
6	$3,79 \cdot 10^{-7}$	$5,87 \cdot 10^2$
7	$1,86 \cdot 10^{-9}$	2,88
8	$1,14 \cdot 10^{-9}$	1,76
9	$1,14 \cdot 10^{-9}$	1,76

Tabla 4.36. Valores de los RAW

Según el índice RAW que mide la degradación del sistema en caso de ocurrir el fallo de un determinado componente, los sucesos que convendría modificar son el 1, el 3 y el 6.

Cálculo del índice RRW (*Risk Reduction Worth*)

$$RRW_i = \frac{F(top)}{F(top, F_i = 0)}$$

CMC						Probabilidad
{1, 2, 3, 6}	0	0,0315	0,0015	0,0017		0
{1, 2, 3, 7, 8}	0	0,0315	0,0015	0,0013	0,0012	0
{1, 2, 3, 7, 9}	0	0,0315	0,0015	0,0013	0,002	0
{1, 2, 4, 5, 6}	0	0,0315	0,0015	0,002	0,0017	0
{1, 2, 4, 5, 7, 8}	0	0,0315	0,0015	0,002	0,0013	0,0012
{1, 2, 4, 5, 7, 9}	0	0,0315	0,0015	0,002	0,0013	0,002

$P(top, F1 = 0)$	0
RRW 1	$\infty$

Tabla 4.37. Ejemplo de cálculo para el RRW 1

Tabla resumen de los RRW obtenidos para este caso:

Suceso con P = 0	$P(top, Psuceso = 0)$	RRW
1	0	$\infty$
2	0	$\infty$
3	$1,29 \cdot 10^{-12}$	500,973201
4	$6,44 \cdot 10^{-10}$	1,00200011
5	$6,44 \cdot 10^{-10}$	1,00200011
6	$1,58 \cdot 10^{-12}$	409,652903
7	$6,44 \cdot 10^{-10}$	1,00244706
8	$6,45 \cdot 10^{-10}$	1,00091625
9	$6,44 \cdot 10^{-10}$	1,00152801

Tabla 4.38. Valores de los RRW

Desde el punto de vista de descenso del riesgo, cuando se considera que un componente es completamente fiable (no falla nunca) los sucesos básicos más determinantes son el suceso 1 y el suceso 2.

#### 8) *Propuesta de medidas correctoras*

Según estos cálculos, los sucesos básicos 1, 2, 3 y 6 referentes a la válvula automática, la transmisión de señal del detector a los aspiradores de polvo, el aspirador y el desgaste de cableado, serían los elementos sobre los que haría falta actuar. En este caso se opta por instalar una válvula dosificadora en serie con la existente a la salida del silo, así como otro aspirador de polvo para garantizar la aspiración del polvo en el caso de que los otros dos no funcionen. La instalación de esta nueva válvula resuelve el problema cuando la válvula inicial no funciona porque se queda bloqueada en abierto, ya que sería necesario que la segunda válvula también se quedara bloqueada en cerrado. Asimismo, la presencia de un tercer aspirador reduce considerablemente el fallo en la extracción de polvo.

#### 9) *Esquema de la instalación mejorada*

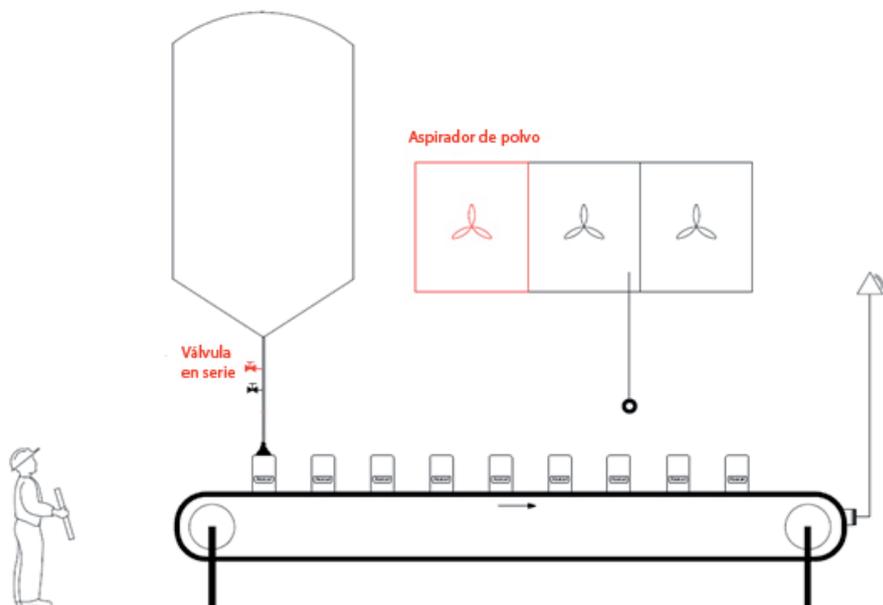


Figura 4.17. Esquema de la refinería de azúcar mejorada

10) Definición del nuevo árbol de la instalación y cálculo de la disminución de la probabilidad del suceso no deseado

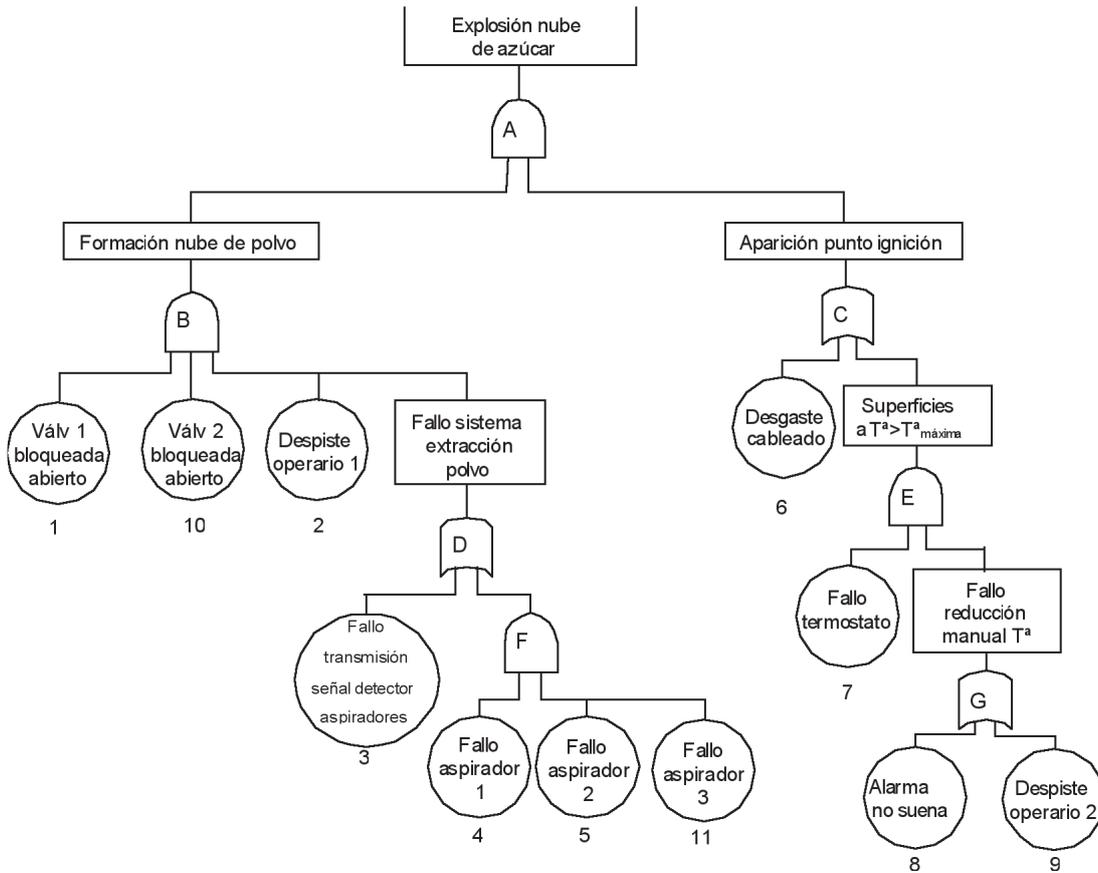


Figura 4.18. Árbol de fallos del suceso top para el sistema mejorado

$$A = B \wedge C$$

$$A = (1 \wedge 2 \wedge 10 \wedge D) \wedge (6 \vee E)$$

$$A = [1 \wedge 2 \wedge 10 \wedge (3 \vee (4 \wedge 5 \wedge 11))] \wedge [6 \vee (7 \wedge (8 \vee 9))]$$

Simplificación:

$$A = [(1 \wedge 2 \wedge 3 \wedge 10) \vee (1 \wedge 2 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 10 \wedge 11)] \wedge [6 \vee ((7 \wedge 8) \vee (7 \wedge 9))]$$

$$A = [(1 \wedge 2 \wedge 3 \wedge 10) \vee (1 \wedge 2 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 10 \wedge 11)] \wedge [(6 \vee (7 \wedge 8)) \vee (7 \wedge 9)]$$

Ecuación reducida:

$$A = (1 \wedge 2 \wedge 3 \wedge 6 \wedge 10) \vee (1 \wedge 2 \wedge 3 \wedge 7 \wedge 8 \wedge 10) \vee (1 \wedge 2 \wedge 3 \wedge 7 \wedge 9 \wedge 10) \vee \\ \vee (1 \wedge 2 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 6 \wedge 10 \wedge 11) \vee (1 \wedge 2 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 7 \wedge 8 \wedge 10 \wedge 11) \vee \\ \vee (1 \wedge 2 \wedge 4 \wedge 5 \wedge 7 \wedge 9 \wedge 10 \wedge 11)$$

Conjuntos mínimos de corte:

{1, 2, 3, 6, 10}    {1, 2, 3, 7, 8, 10}    {1, 2, 3, 7, 9, 10}    {1, 2, 4, 5, 6, 10, 11}    {1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11}    {1, 2, 4, 5, 7, 9, 10, 11}

CMC	Probabilidad (CMC)
{1, 2, 3, 6, 10}	$5,1408 \cdot 10^{-12}$
{1, 2, 3, 7, 8, 10}	$4,71744 \cdot 10^{-15}$
{1, 2, 3, 7, 9, 10}	$7,8624 \cdot 10^{-15}$
{1, 2, 4, 5, 6, 10, 11}	$1,54224 \cdot 10^{-17}$
{1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11}	$1,41523 \cdot 10^{-20}$
{1, 2, 4, 5, 7, 9, 10, 11}	$2,35872 \cdot 10^{-20}$

Tabla 4.39. Probabilidad de los CMC

$$P(top) = 1 - \prod (1 - P(CMC_i)). \text{ Luego, } P(topfin) = 5,15 \cdot 10^{-12}, P(topini) / P(topfin) = 125$$

La mejora realizada reduce en dos órdenes de magnitud la probabilidad de que haya una explosión de la nube de azúcar, lo que se considera suficientemente exitoso en relación con las medidas correctoras implantadas, ya que tanto la instalación de una válvula dosificadora en *by-pass* como la de un tercer aspirador son relativamente sencillas de implantar.

## 5. MÉTODO DEL ÁRBOL DE SUCESOS

### 5.1. Descripción teórica

El objetivo del árbol de sucesos es la identificación de las cadenas de sucesos que siguen a un suceso iniciador. Se diferencia de la técnica de árbol de fallos en que este persigue el análisis en profundidad de las causas que provocan dicho suceso iniciador. Por ello normalmente ambos métodos se utilizan de forma complementaria en el análisis de accidentes, tal y como se muestra en la figura 5.2.

El árbol de sucesos es una forma de estudiar las secuencias de un accidente, ya que relacionan cada suceso iniciador con la secuencia de propagación temporal de los sucesos que están en el origen de las consecuencias de un accidente. Posteriormente se valoran de forma cualitativa y cuantitativa dichas secuencias accidentales con el objeto de identificar las más importantes, teniendo en cuenta que la ocurrencia de un suceso de la secuencia puede estar condicionada a la ocurrencia de su precursor en la cadena de sucesos.

El análisis por árbol de sucesos tiene dos aplicaciones principales:

- Preaccidente, que trata de analizar el origen de los distintos accidentes posibles y el papel que desempeñan las funciones de protección. El suceso iniciador se corresponde con el desarrollo de un peligro que puede desembocar en un accidente.
- Postaccidente, que investiga las posibles consecuencias de un determinado accidente. El suceso iniciador es un accidente, el cual puede incluso haber sido desarrollado mediante la aplicación de un preaccidente.

El árbol de sucesos se construye a partir de un suceso iniciador. Este árbol incluye éxitos y fallos de las funciones previstas, conectando dicho iniciador con las posibles consecuencias finales. Cada rama del árbol representa una línea de evolución que conduce a un efecto final, generalmente no deseado (daño). También es posible que una secuencia

de acontecimientos favorables lleve a un efecto final sin consecuencias adversas. Así, dado un iniciador, cada rama o cadena de sucesos representa la evolución del accidente (secuencia accidental), que conduce a una de varias consecuencias finales posibles. A continuación se describen los pasos para construir y analizar el árbol de sucesos.

1) *Descripción de la instalación*

Consiste en identificar los principales elementos de la instalación y en describir el funcionamiento de la misma.

2) *Definición del objetivo y alcance*

Consiste en definir cuál es el propósito del análisis.

3) *Identificación de sucesos iniciales de interés*

Los sucesos iniciadores son fallos u otros factores que, en el caso de producirse, originan la respuesta de las medidas de seguridad, para evitar consecuencias negativas. Un suceso iniciador puede ser tanto un fallo del sistema (sobrecarga de un depósito, aumento de temperatura de un reactor, etc.), como factores externos al mismo (caída de un rayo, fallo de la red de suministro eléctrico, etc.).

4) *Definición de circunstancias adversas y funciones de seguridad previstas para el control de sucesos*

Identificar la secuencia de medidas de seguridad que entrarían en funcionamiento en el caso de que ocurriera el suceso iniciador, tales como parada automática de una bomba, puesta en marcha de un sistema de enfriamiento, etc.; así como de posibles circunstancias adversas, como por ejemplo, aparición de un punto de ignición.

5) *Construcción del árbol de sucesos con inclusión de todas las posibles respuestas del sistema*

Para construir el árbol de sucesos se parte del suceso iniciador. A partir de este, y dependiendo de cada sistema, entrarían en funcionamiento las medidas de seguridad frontales, es decir, aquellas que están establecidas para que respondan directamente en el caso de que ocurran determinados fallos. Las medidas de seguridad frontales pueden responder positivamente o no, lo que provocaría la entrada en funcionamiento de las

medidas de seguridad redundantes, que son aquellas que están previstas sólo para el caso de que fallen las medidas de seguridad frontales.

El árbol de sucesos está formado por una línea de cabecera en la que aparece en primer lugar el suceso iniciador, y, a continuación, las medidas de seguridad frontales, ordenadas según el orden de actuación previsto para estas, y las medidas redundantes, ordenadas también según el orden de actuación previsto.

Una vez producido el suceso iniciador, pueden ocurrir dos cosas: que la primera medida de seguridad actúe según lo previsto (éxito), o que no sea así (fracaso). Esto se representa en el árbol desglosando el suceso iniciador en dos ramas. El proceso continúa preguntando, para cada una de las ramas, si la medida de seguridad o la circunstancia adversa actuará (éxito) o no (fracaso), y se definen así todas las posibles secuencias en las que podrá derivar el suceso iniciador hasta llegar a la consecuencia final.

Así, cada una de las secuencias accidentales asociadas a un suceso iniciador corresponde a un escenario o rama del árbol de sucesos. De esta forma, cada escenario viene caracterizado por la actuación con éxito o fracaso, de las funciones de protección diseñadas para contrarrestar el desarrollo de dicho suceso iniciador.

Cada una de las secuencias derivará en una consecuencia (incendio, situación controlada con paro del proceso, situación controlada y el proceso continúa, etc).

Suceso iniciador	Función 1	Función 2	Secuencias accidentales
------------------	-----------	-----------	-------------------------

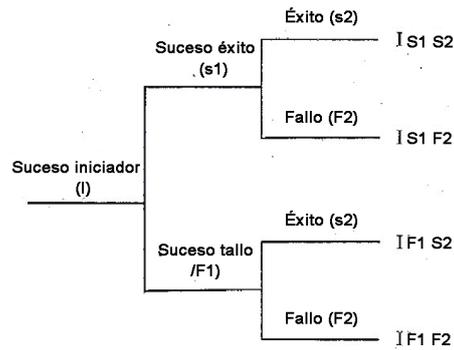


Figura 5.1. Esquema modelo árbol de sucesos

#### 6) Estimación de la probabilidad de cada secuencia del árbol de sucesos

El siguiente paso es calcular la probabilidad de ocurrencia de cada secuencia, multiplicando la probabilidad del suceso iniciador por la probabilidad de que ocurran los eventos de éxito y fracaso por los que se deriva en cada una de las subdivisiones (ramas) que conforman la secuencia.

#### 7) Cuantificación de las situaciones con peligro

Para conocer la probabilidad de cada una de las consecuencias negativas (incendio, explosión, etc.), se sumarán las probabilidades de cada una de las secuencias del árbol que den lugar a una misma consecuencia negativa.

#### 8) Verificación de todas las respuestas del sistema

Para comprobar que no ha habido ningún error, la suma de las probabilidades de todas las secuencias debe ser igual a la probabilidad del suceso iniciador.

#### 9) Medidas correctoras

Una vez cuantificada la probabilidad de las posibles situaciones de peligro, se proponen medidas correctoras para mejorar el sistema. Estas medidas pueden ser nuevas funciones de seguridad, mejora de las existentes, eliminación de circunstancias adversas o implantación de medidas paliativas de estas, etc.

### 10) Esquema de la instalación mejorada

En este punto se describe la instalación una vez implantadas las medidas correctoras.

### 11) Nuevo árbol de sucesos y cálculo de la disminución de las probabilidades de resultados adversos

Por último, se representa el nuevo árbol de sucesos y se calcula la nueva probabilidad de que se produzcan situaciones de peligro.

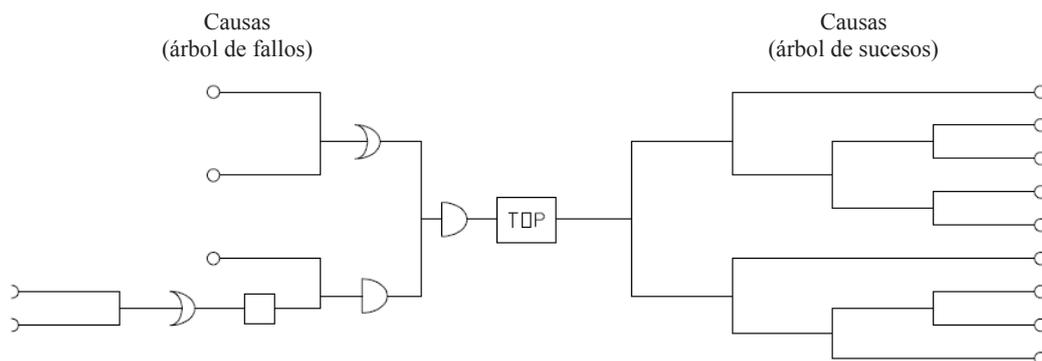


Figura 5.2. Esquema de la relación entre el árbol de fallos y el árbol de sucesos

## 5.2. Caso 1: AS depósito disolvente

### 1) Descripción de la instalación

La instalación consiste en la planta de almacenamiento de disolvente altamente inflamable descrita en el caso del apartado 4.3, y cuyo esquema se muestra en la figura 4.5.

La siguiente tabla indica las probabilidades de fallo de los sucesos implicados.

Suceso	Probabilidad
Fallo del LC	0,003
Fallo del control automático de la bomba P1 al detectar LC	0,005
Falla indicador nivel LI	0,002
Fallo del operario	0,05
Fallo de la válvula (cierre accidental)	0,005
Fallo del rebosadero (se obstruye)	0,03

Tabla 5.1. Probabilidades de los sucesos implicados

La probabilidad de que llegue más disolvente al depósito D1 del que puede contener es de 0,025.

## 2) *Definición del objetivo y alcance*

El objetivo es analizar las consecuencias o posibles escenarios que podrían darse si llega demasiado disolvente al depósito D1 y calcular las probabilidades de las consecuencias peligrosas que podrían darse.

## 3) *Identificación de sucesos iniciales de interés*

En este caso, dado que el alcance de este problema consiste en reducir la probabilidad de que se produzca un vertido al suelo, el suceso iniciador será que llegue más disolvente al depósito D1 del que este puede contener, suceso cuya probabilidad es conocida.

## 4) *Definición de circunstancias adversas y funciones de seguridad previstas para el control de sucesos*

Para el suceso «llega más disolvente al depósito del que este puede contener», existen las siguientes funciones o controles de seguridad en la instalación actual, que actuarían en el orden que se establece a continuación:

- El control de nivel (LC) detecta que el nivel del depósito D1 supera el límite admisible y envía una señal al equipo de bombeo P1.
- El equipo de bombeo se detiene al recibir la señal, con lo que deja de bombear más disolvente al depósito.
- Existe un control de nivel visual (LI) que muestra el nivel de disolvente en el depósito.
- Un operario puede observar un nivel por encima del normal y detener manualmente el equipo de bombeo.
- Existe un depósito de seguridad (D3) para recoger el disolvente que rebose del depósito D1.



do el suceso iniciador, es decir, cuando llega al depósito D1 más disolvente del que este puede contener, es:

$$P(s1) = 0,025 \times 0,997 \times 0,995 = 0,0248$$

$$P(s2) = 0,025 \times 0,997 \times 0,005 \times 0,998 \times 0,95 = 0,000118$$

$$P(s3) = 0,025 \times 0,997 \times 0,005 \times 0,998 \times 0,05 \times 0,965 = 0,000006$$

$$P(s4) = 0,025 \times 0,997 \times 0,005 \times 0,998 \times 0,05 \times 0,035 = 2,18 \cdot 10^{-7}$$

$$P(s5) = 0,025 \times 0,997 \times 0,005 \times 0,002 \times 0,965 = 2,4105 \cdot 10^{-7}$$

$$P(s6) = 0,025 \times 0,997 \times 0,005 \times 0,002 \times 0,035 = 8,72 \cdot 10^{-9}$$

$$P(s7) = 0,025 \times 0,003 \times 0,998 \times 0,95 = 7,11 \cdot 10^{-5}$$

$$P(s8) = 0,025 \times 0,003 \times 0,9998 \times 0,05 \times 0,965 = 3,61 \cdot 10^{-6}$$

$$P(s9) = 0,025 \times 0,003 \times 0,998 \times 0,05 \times 0,035 = 1,31 \cdot 10^{-7}$$

$$P(s10) = 0,003 \times 0,002 \times 0,965 = 1,45 \cdot 10^{-7}$$

$$P(s11) = 0,003 \times 0,002 \times 0,035 = 2,25 \cdot 10^{-9}$$

#### 7) *Cuantificación de las situaciones con peligro*

Las respuestas indeseadas, cuya probabilidad se espera reducir, son aquellas que conducen al vertido del disolvente por el suelo de la nave. Por tanto, son las secuencias número 4, 6, 9 y 11.

La probabilidad de que ocurra un vertido incontrolado se obtiene a partir de la suma de las probabilidades de las secuencias que llevan al resultado no deseado:

$$\text{Probabilidad de derrame} = [P(s4) + P(s6) + P(s9) + P(s11)] = 0,025 \times (8,7063 \cdot 10^{-6} + 3,4895 \cdot 10^{-7} + 5,2395 \cdot 10^{-6} + 0,00000021) = 3,62619 \cdot 10^{-7}$$

#### 8) *Verificación de todas las respuestas del sistema*

Se verifican las combinaciones obtenidas comprobando que la suma de las probabilidades de cada una de las secuencias coincide con la probabilidad del suceso inicial, en este caso, «llega más depósito a D1 del que puede contener»:

$$P(\text{total secuencias}) = P(s1) + P(s2) + P(s3) + P(s4) + P(s5) + P(s6) + P(s7) + P(s8) + P(s9) + P(s10) + P(s11) = 0,025$$

### 9) Medidas correctoras

Para reducir la probabilidad de derrame incontrolado, se proponen las siguientes medidas correctoras:

- Añadir un segundo control de nivel, por si el primero falla, que le indique a la bomba que pare.
- Añadir una segunda conducción, con su válvula, del depósito D1 al depósito de vertido seguro (D3).
- Incluir un segundo rebosadero en el depósito D1.
- Enviar a un operario a comprobar, y corregir si es necesario, que, tras realizar cualquier operación de mantenimiento que conlleve accionar la válvula de conexión al depósito D3, esta se deje en posición abierta de nuevo.

De estas medidas se decide implantar la del segundo rebosadero y la de encargar a un operario, por requerir un menor coste de inversión. La probabilidad de que el operario que realiza la comprobación de que la válvula al depósito D3 esté abierta es de 0,95.

### 10) Esquema de la instalación mejorada

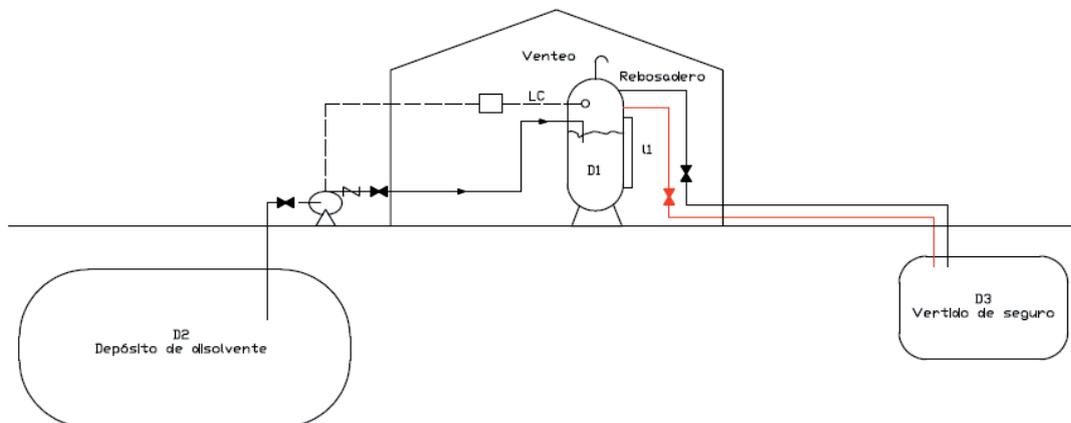


Figura 5.4. Esquema de la planta de almacenamiento de disolvente mejorada

### 11) Nuevo árbol de sucesos y cálculo de la disminución de las probabilidades de resultados adversos

La probabilidad de que, si llega más fluido a D1 del que este puede contener, se produzca cada una de las secuencias, se resume en la siguiente tabla:



Secuencia	LC	P1	LI	Operario bomba	Rebos.1	Rebos. 2	Válvula D3	Operario válvula	Probabilidad consecuencia
1	0,997	0,995	1	1	1	1	1	1	0,02480038
2	0,997	0,005	0,998	0,95	1	1	1	1	0,00011816
3	0,997	0,005	0,998	0,05	0,97	1	0,995	1	$6,0021 \cdot 10^{-6}$
4	0,997	0,005	0,998	0,05	0,97	1	0,005	0,95	$2,8653 \cdot 10^{-8}$
5	0,997	0,005	0,998	0,05	0,97	1	0,005	0,05	$1,5081 \cdot 10^{-9}$
6	0,997	0,005	0,998	0,05	0,03	0,97	0,995	1	$1,8006 \cdot 10^{-7}$
7	0,997	0,005	0,998	0,05	0,03	0,97	0,005	0,95	$8,5959 \cdot 10^{-10}$
8	0,997	0,005	0,998	0,05	0,03	0,97	0,005	0,05	$4,5242 \cdot 10^{-11}$
9	0,997	0,005	0,998	0,05	0,03	0,03	1	1	$5,5969 \cdot 10^{-9}$
10	0,997	0,005	0,002	1	0,97	1	0,995	1	$2,4056 \cdot 10^{-7}$
11	0,997	0,005	0,002	1	0,97	1	0,005	0,95	$1,1484 \cdot 10^{-9}$
12	0,997	0,005	0,002	1	0,97	1	0,005	0,05	$6,0443 \cdot 10^{-11}$
13	0,997	0,005	0,002	1	0,03	0,97	0,995	1	$7,2169 \cdot 10^{-9}$
14	0,997	0,005	0,002	1	0,03	0,97	0,005	0,95	$3,4453 \cdot 10^{-11}$
15	0,997	0,005	0,002	1	0,03	0,97	0,005	0,05	$1,8133 \cdot 10^{-12}$
16	0,997	0,005	0,002	1	0,03	0,03	1	1	$2,2433 \cdot 10^{-10}$
17	0,003	1	0,998	0,95	1	1	1	1	$7,1108 \cdot 10^{-5}$
18	0,003	1	0,998	0,05	0,97	1	0,995	1	$3,6121 \cdot 10^{-6}$
19	0,003	1	0,998	0,05	0,97	1	0,005	0,95	$1,7244 \cdot 10^{-8}$
20	0,003	1	0,998	0,05	0,97	1	0,005	0,05	$9,0756 \cdot 10^{-10}$
21	0,003	1	0,998	0,05	0,03	0,97	0,995	1	$1,0836 \cdot 10^{-7}$
22	0,003	1	0,998	0,05	0,03	0,97	0,005	0,95	$5,1731 \cdot 10^{-10}$
23	0,003	1	0,998	0,05	0,03	0,97	0,005	0,05	$2,7227 \cdot 10^{-11}$
24	0,003	1	0,998	0,05	0,03	0,03	1	1	$3,3683 \cdot 10^{-9}$
25	0,003	1	0,002	1	0,97	1	0,995	1	$1,4477 \cdot 10^{-7}$
26	0,003	1	0,002	1	0,97	1	0,005	0,95	$6,9113 \cdot 10^{-10}$
27	0,003	1	0,002	1	0,97	1	0,005	0,05	$3,6375 \cdot 10^{-11}$
28	0,003	1	0,002	1	0,03	0,97	0,995	1	$4,3432 \cdot 10^{-9}$
29	0,003	1	0,002	1	0,03	0,97	0,005	0,95	$2,0734 \cdot 10^{-11}$
30	0,003	1	0,002	1	0,03	0,97	0,005	0,05	$1,0913 \cdot 10^{-12}$
31	0,003	1	0,002	1	0,03	0,03	1	1	$1,35 \cdot 10^{-10}$

Tabla 5.2. Cálculo de la probabilidad de cada secuencia

Las secuencias en las que se produce derrame de disolvente son: s5, s8, s9, s12, s15, s16, s20, s2, s24, s27, s30, s31.

La probabilidad de vertido incontrolado en la instalación mejorada es:

$$\begin{aligned} & [P(s5) + P(s8) + P(s9) + P(s12) + P(s15) + P(s16) + P(s20) + P(s23) + P(s24) + \\ & + P(s27) + P(s30) + P(s31)] = 0,025 \times (6,03222 \cdot 10^{-8} + 1,80967 \cdot 10^{-9} + 2,23876 \\ & \cdot 10^{-7} + 2,41773 \cdot 10^{-9} + 7,25318 \cdot 10^{-11} + 8,973 \cdot 10^{-9} + 3,63023 \cdot 10^{-8} + \\ & + 1,08907 \cdot 10^{-9} + 1,3473 \cdot 10^{-7} + 1,455 \cdot 10^{-9} + 4,365 \cdot 10^{-11} + 5,4 \cdot 10^{-9}) = \\ & = 1,19123 \cdot 10^{-8} \end{aligned}$$

La mejora relativa del sistema es:

$$\text{Mejora} = \frac{P_{\text{inicial}}}{P_{\text{final}}} = \frac{3,62619 \cdot 10^{-7}}{1,19123 \cdot 10^{-8}} = 30,4$$

Es decir, el sistema mejorado tiene 30 veces menos probabilidad de que se produzca un derrame que el sistema inicial.

### 5.3. Caso 2: AS fuga de butadieno

#### 1) Descripción de la instalación

Para el presente caso se van a analizar los posibles sucesos que pueden derivar de una fuga de butadieno de una tubería en el interior de una nave. La nave dispone de un detector de gases que emitirá una alarma en caso de fuga y cerrará automáticamente el paso de gas. También dispone de un sistema de extinción de incendios automático mediante agua pulverizada. Para el análisis se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- La fuga puede ser grande o pequeña.
- La ignición, si la hay, puede ser inmediata, temprana o tardía.
- Cuando la ignición se produce con acumulación de gas puede producir una explosión. Una fuga pequeña con ignición inmediata se supone con demasiada poca concentración como para producir explosión.

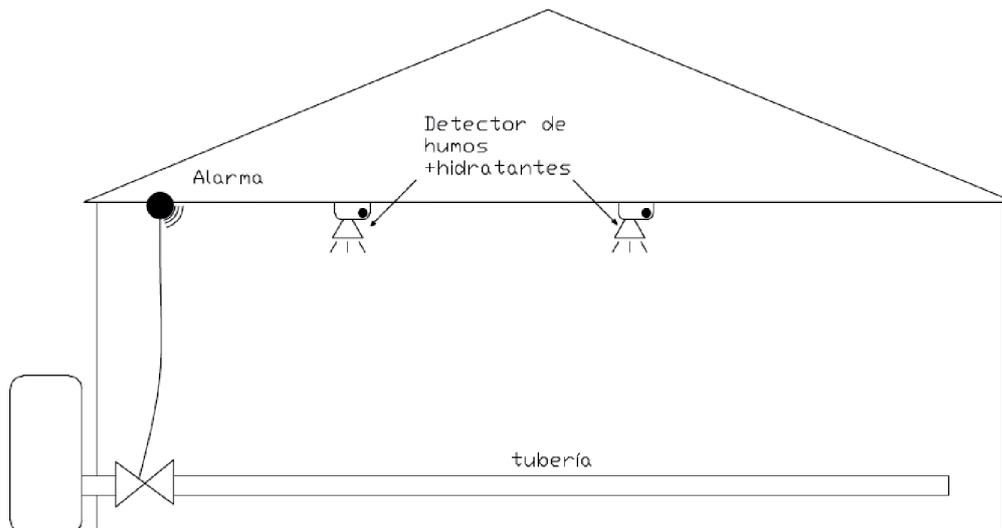


Figura 5.6. Esquema de la instalación de transporte de butadieno

## 2) Definición del objetivo y alcance

Para este ejercicio se pide la elaboración de un árbol de sucesos en el caso de fuga de butadieno para la instalación descrita en el punto anterior, teniendo en cuenta todos los factores relevantes en caso de producirse el incidente, así como todas las funciones de seguridad previstas para tales casos y las posibles respuestas del sistema. Se deben, asimismo, proponer mejoras para evitar las situaciones más desfavorables.

Suceso	Probabilidad
Probabilidad de fuga	10%
Tamaño de fuga grande	50%
Fallo del detector de gases	20%
Fallo de la válvula de cierre	5%
Probabilidad de ignición inmediata (*)	50%
Probabilidad de ignición temprana (*)	25%
Probabilidad de ignición tardía (*)	10%
Probabilidad de explosión	30%
Fallo del sistema contraincendios	20%

(\*) Respecto de la probabilidad total de ignición

Tabla 5.3. Probabilidades de los sucesos implicados

### 3) *Identificación de sucesos iniciales de interés*

En este caso, el suceso iniciador consiste en la generación de una fuga que causa un escape de gas en el interior de una nave industrial.

### 4) *Definición de circunstancias adversas (CA) y funciones de seguridad (FS) previstas para el control de sucesos*

Por orden de actuación tenemos:

- Tamaño de la fuga (CA).
- El detector de gas (FS).
- La válvula de cierre (FS).
- Que haya ignición (CA).
- Que esta sea inmediata (CA)
- Que sea temprana (CA).
- Que se produzca explosión (CA).
- El sistema de protección de incendios activo-hidrantes (FS).

### 5) *Estimación de la probabilidad de cada secuencia del árbol de sucesos*

○	No hay fuga
▷	Detonación
≡	Fuego sofocado
□	Bola de fuego o incendio en charco
■	VCE
●	Llamaradas
▶	Nube de gas-dispersión
—	Dardo de fuego

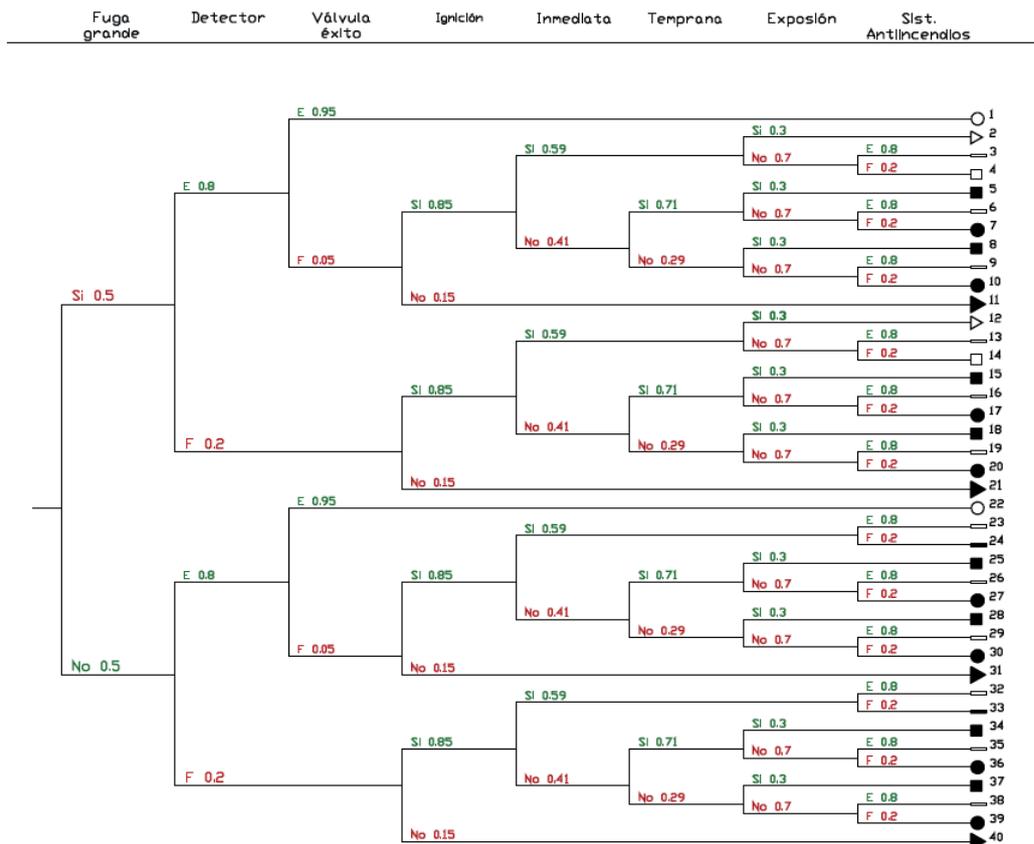


Figura 5.7. Árbol de sucesos de la fuga de butadieno

Caso	Consecuencia	Probabilidad total
1	Fuga controlada	0,038000
2	Detonación	0,000301
3	Fuego sofocado	0,000562
4	Bola de fuego o incendio en charco	0,000140
5	Explosión de nube de vapor confinada (VCE)	0,000148
6	Fuego sofocado	0,000277
7	Llamaradas	0,000069
8	Explosión de nube de vapor confinada (VCE)	0,000061
9	Fuego sofocado	0,000113
10	Llamaradas	0,000028
11	Nube de gas - dispersión	0,000300
12	Detonación	0,001505

Caso	Consecuencia	Probabilidad total
21	Nube de gas - dispersión	0,001500
22	Fuga controlada	0,038000
23	Fuego sofocado	0,000802
24	Dardo de fuego	0,000201
25	Explosión de nube de vapor confinada (VCE)	0,000148
26	Fuego sofocado	0,000277
27	Llamaradas	0,000069
28	Explosión de nube de vapor confinada (VCE)	0,000061
29	Fuego sofocado	0,000113
30	Llamaradas	0,000028
31	Nube de gas - dispersión	0,000300
32	Fuego sofocado	0,004012

Caso	Consecuencia	Probabilidad total	Caso	Consecuencia	Probabilidad total
13	Fuego sofocado	0,002808	33	Dardo de fuego	0,001003
14	Bola de fuego o incendio en charco	0,000702	34	Explosión de nube de vapor confinada (VCE)	0,000742
15	Explosión de nube de vapor confinada (VCE)	0,000742	35	Fuego sofocado	0,001386
16	Fuego sofocado	0,001386	36	Llamaradas	0,000346
17	Llamaradas	0,000346	37	Explosión de nube de vapor confinada (VCE)	0,000303
18	Explosión de nube de vapor confinada (VCE)	0,000303	38	Fuego sofocado	0,000566
19	Fuego sofocado	0,000566	39	Llamaradas	0,000141
20	Llamaradas	0,000141	40	Nube de gas - dispersión	0,001500

Tabla 5.4. Probabilidades de las posibles secuencias de sucesos

#### 6) Cuantificación de las situaciones de peligro

La probabilidad, en tanto por uno, para cada una de las posibles respuestas que dan lugar a una situación de peligro, es de:

Probabilidad	Consecuencia
0,001805	Detonación
0,000843	Bola de fuego o incendio en charco
0,002509	Explosión de nube de vapor confinada (VCE)
0,001171	Llamaradas
0,003600	Nube de gas - dispersión
0,001204	Dardo de fuego

Tabla 5.5. Probabilidad de cada una de las posibles respuestas del sistema

#### 7) Verificación de todas las respuestas del sistema

La suma de las probabilidades de cada una de las posibles secuencias coincide con la probabilidad del suceso inicial, en este caso, fuga que produce un escape de gas.

Probabilidad	Consecuencia
0,076000	Fuga controlada
0,001805	Detonación
0,012868	Fuego sofocado
0,000843	Bola de fuego o incendio en charco
0,002509	Explosión de nube de vapor confinada (VCE)
0,001171	Llamaradas
0,003600	Nube de gas - dispersión
0,001204	Dardo de fuego
<i>0,100000</i>	<i>Total (= probabilidad de fuga de escape de gas)</i>

Tabla 5.6. Verificación del sistema

### 8) Medidas correctoras

Para reducir la probabilidad de consecuencias que entrañen situaciones de peligro, se propone la inclusión de dos nuevas funciones de seguridad (FS). La primera consiste en instalar un detector de gases junto al sistema de lucha contraincendios, con la finalidad de que, unido a un mantenimiento adecuado, la probabilidad de éxito alcance el 90%. La segunda medida consiste en colocar extintores de CO<sub>2</sub> estratégicamente para permitir apagar el incendio en caso de fallo del sistema de lucha contraincendios (probabilidad de fallo 20%).

### 9) Esquema de la instalación mejorada

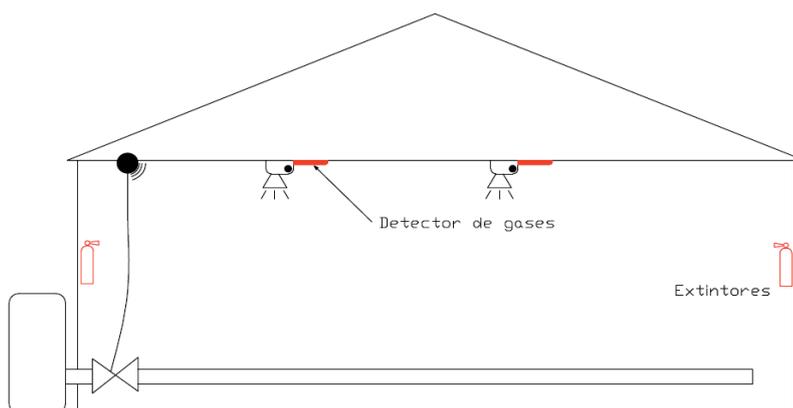


Figura 5.8. Esquema de la instalación de transporte de butadieno mejorada



Caso	Consecuencia	Probabilidad total	Caso	Consecuencia	Probabilidad total
1	Fuga controlada	0,042750	27	Nube de gas - dispersión	0,000750
2	Detonación	0,000339	28	Fuga controlada	0,042750
3	Fuego sofocado	0,000711	29	Fuego sofocado	0,001016
4	Fuego sofocado	0,000063	30	Fuego sofocado	0,000090
5	Bola de fuego o incendio en charco	0,000016	31	Dardo de fuego	0,000023
6	Explosión de nube de vapor confinada (VCE)	0,000167	32	Explosión de nube de vapor confinada (VCE)	0,000167
7	Fuego sofocado	0,000351	33	Fuego sofocado	0,000351
8	Fuego sofocado	0,000031	34	Fuego sofocado	0,000031
9	Llamaradas	0,000008	35	Llamaradas	0,000008
10	Explosión de nube de vapor confinada (VCE)	0,000068	36	Explosión de nube de vapor confinada (VCE)	0,000068
11	Fuego sofocado	0,000143	37	Fuego sofocado	0,000143
12	Fuego sofocado	0,000013	38	Fuego sofocado	0,000013
13	Llamaradas	0,000003	39	Llamaradas	0,000003
14	Nube de gas - dispersión	0,000338	40	Nube de gas - dispersión	0,000338
15	Detonación	0,000752	41	Fuego sofocado	0,002257
16	Fuego sofocado	0,001580	42	Fuego sofocado	0,000201
17	Fuego sofocado	0,000140	43	Dardo de fuego	0,000050
18	Bola de fuego o incendio en charco	0,000035	44	Explosión de nube de vapor confinada (VCE)	0,000371
19	Explosión de nube de vapor confinada (VCE)	0,000371	45	Fuego sofocado	0,000779
20	Fuego sofocado	0,000779	46	Fuego sofocado	0,000069
21	Fuego sofocado	0,000069	47	Llamaradas	0,000017
22	Llamaradas	0,000017	48	Explosión de nube de vapor confinada (VCE)	0,000152
23	Explosión de nube de vapor confinada (VCE)	0,000152	49	Fuego sofocado	0,000318
24	Fuego sofocado	0,000318	50	Fuego sofocado	0,000028
25	Fuego sofocado	0,000028	51	Llamaradas	0,000007
26	Llamaradas	0,000007	52	Nube de gas - dispersión	0,000750

Tabla 5.7. Probabilidades de las posibles secuencias de sucesos del sistema mejorado

Por tanto, las probabilidades para cada una de las posibles respuestas son de:

Probabilidad	Consecuencia
0,085500	Fuga controlada
0,001091	Detonación
0,009524	Fuego sofocado
0,000051	Bola de fuego o incendio en charco
0,001516	VCE
0,000071	Llamaradas
0,002175	Nube de gas - dispersión
0,000073	Dardo de fuego
0,100000	Total (= probabilidad de fuga)

Tabla 5.8. Probabilidad de cada una de las posibles respuestas del sistema mejorado

Como puede comprobarse, la probabilidad de las respuestas de peligro se ha reducido respecto al sistema inicial, así como la probabilidad de que se produzca un incendio y termine siendo sofocado. La probabilidad de terminar en bola de fuego o incendio en charco, junto con la de llamarada y dardo de fuego, son las que más se reducen con las medidas implantadas, y es 16 veces inferior la probabilidad de que ocurran. El resto de respuestas peligrosas también se reducen, aunque en menor medida. Por su parte, la probabilidad de que la fuga sea controlada antes de que se desarrolle cualquier situación de peligro, aumenta.

## 5.4. Caso 3: AS gasolinera

### 1) Descripción de la instalación

La instalación objeto de análisis del presente caso consiste en el proceso de descarga de combustible en una gasolinera, compuesta de las siguientes partes:

- Depósito de la gasolinera: su función es la de almacenar el combustible trasegado.
- Cisterna del camión con válvula de cierre para detener la descarga. Durante todo el proceso de descarga estará un operario presente para vigilar. Del mismo mo-

do, también se dispone de un extintor de fácil acceso y de un saco de tierra absorbente para retener el líquido.

– Los sistemas de seguridad que hay instalados en la gasolinera son:

Una red eléctrica con protección antideflagrante y una protección adicional, un pararrayos.

Un sistema de hidrantes como medida de protección de incendios.

Un drenaje, con una pendiente en el suelo hacia los sumideros de evacuación.

## 2) Definición del objetivo y alcance

Para este ejercicio se pide la elaboración de un árbol de sucesos en el caso de un suceso iniciador de derrame de gasolina en la operación de descarga de combustible para la instalación descrita en el punto anterior, teniendo en cuenta todos los factores relevantes en caso de producirse el incidente, así como todas las funciones de seguridad previstas para tales casos y las posibles respuestas del sistema. Se pretenden reducir las probabilidades de que ocurran los sucesos finales no deseados de incendio y vertido en el sistema de alcantarillado.

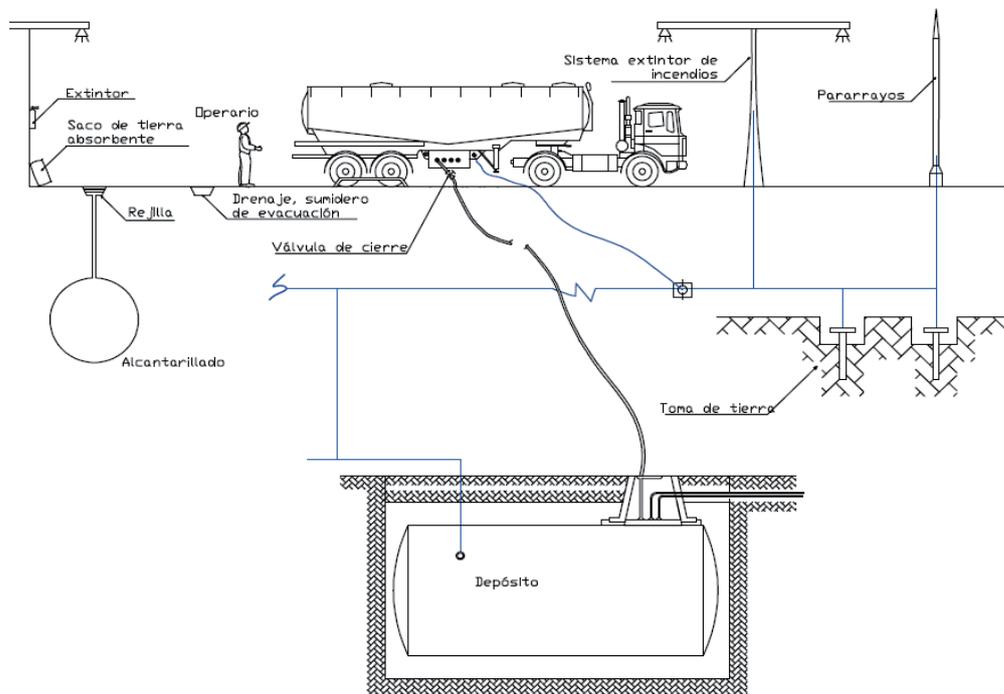


Figura 5.10. Esquema del proceso de descarga de combustible

### 3) *Identificación de sucesos iniciales de interés*

En este caso, el suceso iniciador consiste en la descarga de una cantidad de combustible que exceda la capacidad del depósito, cuya probabilidad se estima en un 0,1.

### 4) *Definición de circunstancias adversas (CA) y funciones de seguridad (FS) previstas para el control de sucesos*

Por orden de actuación tenemos:

- El operario atento para detener el proceso de descarga (FS).
- La válvula de cierre de la cisterna (FS).
- La existencia de un punto de ignición cercano a la red eléctrica (CA).
- La protección antideflagrante de la red eléctrica (FS).
- Situación atmosférica con riesgo eléctrico (CA), que podría provocar un incendio.
- El pararrayos (FS), que evitaría un posible incendio.
- El sistema de protección de incendios activo-hidrantes (FS).
- El extintor (FS), que actuaría en caso de que faltara el sistema de protección de incendios.
- Acceso a la red de alcantarillado (CA), a la que la gasolina se podría extender.
- La cantidad suficiente de tierra absorbente (FS), que impediría que el vertido llegara al alcantarillado público.

Suceso	Probabilidad
Operario atento	0.8
Funcionamiento de la válvula de cierre	0.99
Existencia de punto de ignición cercano	0.3
Funcionamiento de la instalación antideflagración	0.95
Atmósfera eléctrica	0.2
Funcionamiento del pararrayos	0.99
Funcionamiento del sistema contraincendios activo	0.8
Funcionamiento del extintor	0.85
Acceso a la red de alcantarillado	0.95
Buen uso de la tierra absorbente	0.8

Tabla 5.9. Probabilidad de los sucesos implicados

5) Construcción del árbol de sucesos con inclusión de todas las posibles respuestas del sistema

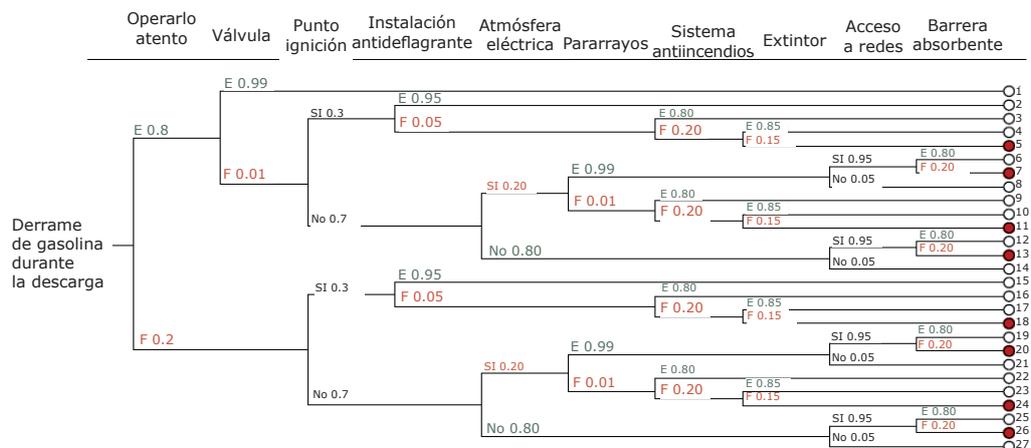


Figura 5.11. Árbol de sucesos del sistema

Caso	Consecuencia
1	Sin consecuencias
2, 3, 4, 9, 10, 15, 16, 17, 22, 23	Conato de incendio
5, 11, 18, 24	Incendio
6, 7, 12, 14, 19, 21, 25, 27	Derrame contenido
7, 13, 20, 26	Vertido a red pública

Tabla 5.10. Posibles respuestas del sistema y su relación con las secuencias del árbol

6) *Estimación de la probabilidad de cada secuencia del árbol de sucesos*

Caso	Probabilidad	Consecuencia	Caso	Probabilidad	Consecuencia
1	$7,92 \cdot 10^{-2}$	Sin consecuencias	15	$5,70 \cdot 10^{-3}$	Conato de incendio
2	$2,28 \cdot 10^{-4}$	Conato de incendio	16	$2,40 \cdot 10^{-4}$	Conato de incendio
3	$9,60 \cdot 10^{-6}$	Conato de incendio	17	$5,10 \cdot 10^{-5}$	Conato de incendio
4	$2,04 \cdot 10^{-6}$	Conato de incendio	18	$9,00 \cdot 10^{-6}$	Incendio
5	$3,60 \cdot 10^{-7}$	Incendio	19	$2,11 \cdot 10^{-3}$	Derrame contenido
6	$8,43 \cdot 10^{-5}$	Derrame contenido	20	$5,27 \cdot 10^{-4}$	Vertido a red pública
7	$2,11 \cdot 10^{-5}$	Vertido a red pública	21	$1,39 \cdot 10^{-4}$	Derrame contenido
8	$5,54 \cdot 10^{-6}$	Derrame contenido	22	$2,24 \cdot 10^{-5}$	Conato de incendio
9	$8,96 \cdot 10^{-7}$	Conato de incendio	23	$4,76 \cdot 10^{-6}$	Conato de incendio
10	$1,90 \cdot 10^{-7}$	Conato de incendio	24	$8,40 \cdot 10^{-7}$	Incendio
11	$3,36 \cdot 10^{-8}$	Incendio	25	$8,51 \cdot 10^{-3}$	Derrame contenido
12	$3,40 \cdot 10^{-4}$	Derrame contenido	26	$2,13 \cdot 10^{-3}$	Vertido a red pública
13	$8,51 \cdot 10^{-5}$	Vertido a red pública	27	$5,60 \cdot 10^{-4}$	Derrame contenido
14	$2,24 \cdot 10^{-5}$	Derrame contenido			

Tabla 5.11. Probabilidad de cada una de las posibles secuencias del árbol

7) *Cuantificación de las situaciones con peligro*

Incendio:

$$\begin{aligned} \text{Caso 5} &= 0,1 \times 0,8 \times 0,01 \times 0,3 \times 0,05 \times 0,2 \times 0,15 &= 3,60 \cdot 10^{-7} \\ \text{Caso 11} &= 0,1 \times 0,8 \times 0,01 \times 0,7 \times 0,2 \times 0,01 \times 0,2 \times 0,15 &= 0,33 \cdot 10^{-7} \\ \text{Caso 18} &= 0,1 \times 0,2 \times 0,3 \times 0,05 \times 0,2 \times 0,15 &= 90,00 \cdot 10^{-7} \\ \text{Caso 24} &= 0,1 \times 0,2 \times 0,7 \times 0,2 \times 0,01 \times 0,2 \times 0,15 &= 8,40 \cdot 10^{-7} \end{aligned}$$

El total de la probabilidad de incendio es  $102,33 \cdot 10^{-7}$ .

Vertido:

$$\begin{aligned} \text{Caso 7} &= 0,1 \times 0,8 \times 0,01 \times 0,7 \times 0,2 \times 0,99 \times 0,95 \times 0,2 &= 0,21 \cdot 10^{-4} \\ \text{Caso 13} &= 0,1 \times 0,8 \times 0,01 \times 0,7 \times 0,8 \times 0,95 \times 0,2 &= 0,85 \cdot 10^{-4} \\ \text{Caso 20} &= 0,1 \times 0,2 \times 0,7 \times 0,2 \times 0,99 \times 0,95 \times 0,2 &= 5,27 \cdot 10^{-4} \\ \text{Caso 28} &= 0,1 \times 0,2 \times 0,7 \times 0,8 \times 0,95 \times 0,2 &= 21,28 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

El total de la probabilidad del vertido es de  $27,61 \cdot 10^{-4}$ .

### 8) Verificación de todas las respuestas del sistema

La suma de las probabilidades de cada una de las posibles secuencias coincide con la probabilidad del suceso inicial, en este caso, derrame de gasolina durante la descarga.

Sin consecuencias	$7,92 \cdot 10^{-2}$
Conato de incendio	$6,26 \cdot 10^{-3}$
Incendio	$1,02 \cdot 10^{-5}$
Derrame contenido	$1,18 \cdot 10^{-2}$
Vertido a red pública	$2,76 \cdot 10^{-3}$
Suma	0,1

Tabla 5.12. Verificación de las respuestas del sistema

### 9) Medidas correctoras

- Incluir, como nueva función de seguridad (FS) un operario pendiente de la operación. Se considera que con una concienciación mayor de los operarios respecto a la gravedad de los posibles accidentes y con la formación suficiente (cursos específicos, de PRL, etc.) se puede mejorar dicha función hasta llegar a una probabilidad de éxito del 95%.
- Dada la existencia de puntos de ignición cercanos, que supone una circunstancia adversa, se propone colocar carteles que avisen del riesgo y prohíban las acciones que supongan un potencial punto de ignición, aunque la eficacia de la medida está condicionada a la concienciación de los sujetos en el área, por lo que se considera una baja reducción de la probabilidad de que aparezca un punto de ignición (al 25%).
- Añadir un sistema de prevención de incendios activo como función de seguridad. En este caso, el éxito de la medida depende de la fiabilidad, que puede mejorarse con un mantenimiento adecuado, pasando a una probabilidad de éxito del 95%.
- Mejoras en el funcionamiento del extintor. Tanto las revisiones periódicas como el hecho de tener uno de repuesto y a mano, pueden aumentar las probabilidades de éxito al 99%.

Aumento de la eficacia de la tierra absorbente, con el uso de barreras absorbentes para la contención del vertido mejora considerablemente el éxito de su uso res-

pecto a la de la tierra absorbente debido a su rapidez y facilidad de colocación, por lo que las probabilidades de éxito se considera que mejoran al 95%.

10) *Esquema de la instalación mejorada*

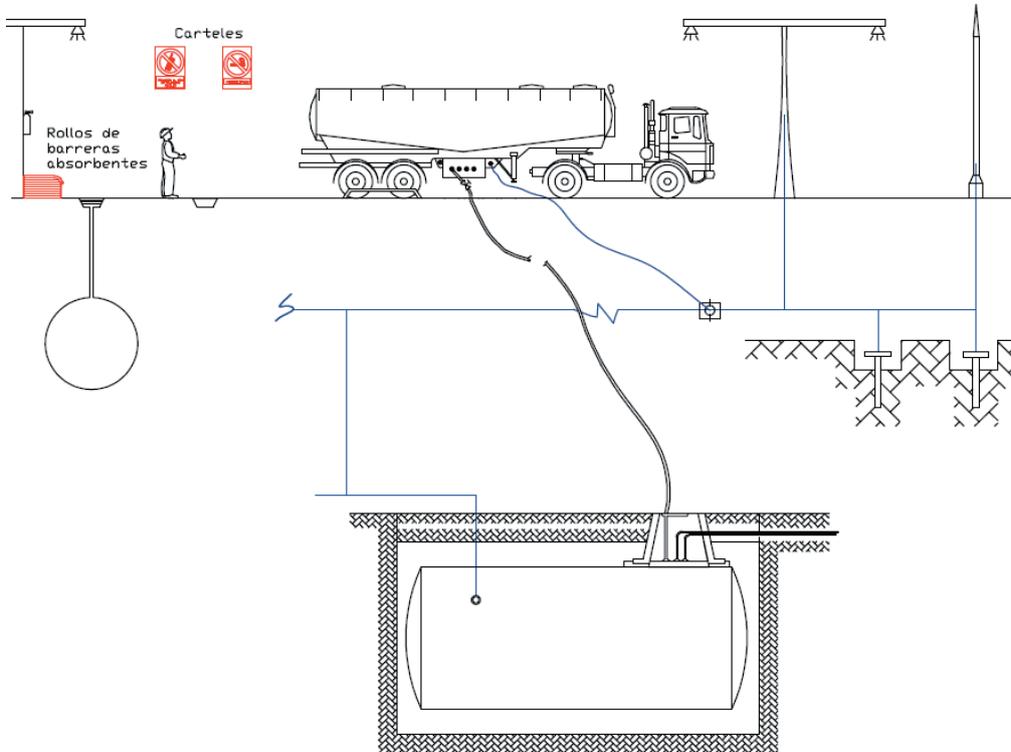


Figura 5.12. Esquema del proceso de descarga de combustible mejorado

11) *Nuevo árbol de sucesos y cálculo de la disminución de las probabilidades de resultados adversos*

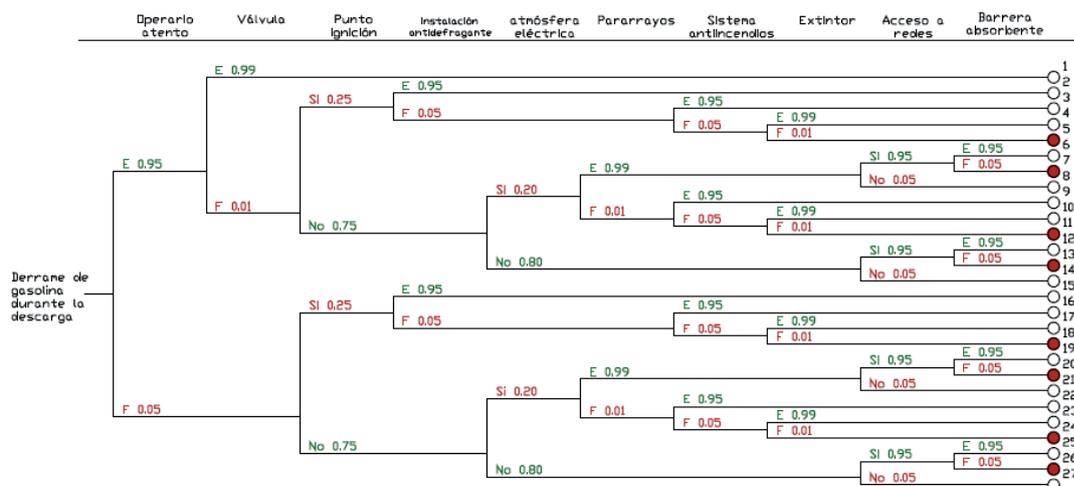


Figura 5.13. Árbol de sucesos del proceso de descarga de combustible mejorado

Los nuevos valores, si se aplican todas las medidas correctoras propuestas, serían los siguientes:

Incendio:

$$\text{Caso 5} = 0,1 \times 0,95 \times 0,01 \times 0,25 \times 0,05 \times 0,05 \times 0,01 = 5,94 \cdot 10^{-9}$$

$$\text{Caso 11} = 0,1 \times 0,95 \times 0,01 \times 0,75 \times 0,2 \times 0,01 \times 0,05 \times 0,01 = 0,71 \cdot 10^{-9}$$

$$\text{Caso 18} = 0,1 \times 0,05 \times 0,25 \times 0,05 \times 0,05 \times 0,01 = 31,3 \cdot 10^{-9}$$

$$\text{Caso 24} = 0,1 \times 0,05 \times 0,75 \times 0,2 \times 0,01 \times 0,05 \times 0,01 = 3,75 \cdot 10^{-9}$$

El total de la probabilidad de incendio es  $41,7 \cdot 10^{-9}$ , y se reduce en más de 2.400 veces la probabilidad de que suceda un incendio.

Vertido:

$$\text{Caso 7} = 0,1 \times 0,95 \times 0,01 \times 0,75 \times 0,2 \times 0,99 \times 0,95 \times 0,05 = 6,70 \cdot 10^{-6}$$

$$\text{Caso 13} = 0,1 \times 0,95 \times 0,01 \times 0,75 \times 0,8 \times 0,95 \times 0,05 = 0,27 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{Caso 20} = 0,1 \times 0,05 \times 0,75 \times 0,2 \times 0,99 \times 0,95 \times 0,05 = 0,35 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{Caso 28} = 0,1 \times 0,05 \times 0,75 \times 0,8 \times 0,95 \times 0,05 = 1,42 \cdot 10^{-4}$$

El total de la probabilidad del vertido es  $8,74 \cdot 10^{-4}$ , y se reduce por tres la probabilidad de que haya un vertido. La reducción de la probabilidad de estas respuestas indeseadas se considera satisfactoria, sobre todo en el caso de incendio.

# 6. COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS

Técnica	Objetivo	Procedimiento	Resultado	Observaciones
HAZOP	Identificación de problemas que pueden comprometer la productividad de la planta	Divide el proceso en nodos críticos e identifica las desviaciones, sus posibles causas y consecuencias	Listado de problemas de seguridad y operación, potenciales desviaciones, consecuencias, causas y medidas correctoras del sistema	Cualitativo, por lo que el analista suele decidir aplicar mejoras en aquellas desviaciones que producen efectos más devastadores, independientemente de lo frecuentes que sean. Útil para mostrar problemas potenciales. Útil para analizar un gran número de componentes, pero después conviene complementarlo con otro método, que ya se aplicaría a aquellas partes del sistema más susceptibles de fallos
AMFE	Identificación de todas las formas de fallo de la pieza de un equipo y de los efectos potenciales del fallo sobre el sistema	Despiece del equipo. Listado de todos los modos posibles de mal funcionamiento. Efectos del fallo en otros equipos o en el resto del sistema. Análisis del valor de cada fallo y de sus efectos	Listado de los modos de fallo identificados, sus efectos potenciales, procedimientos de control y compensación y las consecuencias potenciales para el sistema	Cualitativo. Puede cuantificarse si se conocen las probabilidades de fallo de los componentes, lo que proporciona una priorización de los fallos que ayuda a la toma de decisiones sobre las mejoras que se deben aplicar. Pobre en las identificaciones de combinaciones interactivas de los fallos de los equipos

Técnica	Objetivo	Procedimiento	Resultado	Observaciones
Árbol de fallos	Deducción desde el evento principal y procediendo hacia atrás de todas las combinaciones de fallos hasta llegar a sus causas. Quedan a la vista los modos de fallo ocultos resultantes de la interacción y combinación de los modos de mal funcionamiento	Construcción de un diagrama mediante símbolos lógicos que muestran las interacciones lógicas entre los eventos básicos, los intermedios y el evento final o suceso <i>top</i>	Listado de fallos del equipo y/o las operaciones que pueden resultar de un mal funcionamiento, clasificados cualitativamente según su importancia	Cualitativo. Puede cuantificarse si se conocen las probabilidades de fallo de los componentes y subsistemas. Permite el examen y la cuantificación de los factores críticos de la cadena de fallos. Hay que elaborar un árbol de fallos por cada tipo de suceso no deseado que se quiera analizar en el sistema, con lo cual podría llegar a ser muy costoso, motivo por el cual se suele aplicar después de haber realizado un HAZOP o un AMFE
Árbol de sucesos	Identificación de los accidentes potenciales a partir de un evento inicial y procediendo hacia adelante	Diseñar un árbol de decisión que muestre la secuencia y propagación del accidente. Define las relaciones cronológicas entre el evento iniciador y los que siguen. Clasifica los accidentes para determinar los riesgos más importantes	Un árbol gráfico de decisión que ilustra la forma en que se propaga un evento de mal funcionamiento dando los éxitos y fallos de las funciones de seguridad a medida que progresa el accidente	Cualitativo. Puede cuantificarse si se conocen las probabilidades de fallo de los componentes y subsistemas. Pobre en el manejo de fallos parciales o retardos. Útil para el análisis de eventos que tienen varias combinaciones de salida. Las mejoras que se proponen como resultado de este método consisten en nuevos mecanismos de control o de contención para las posibles respuestas del sistema

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- AENOR. UNE-EN 60812:2008 (2008): *Técnicas de análisis de la fiabilidad de sistemas. Procedimiento de análisis de los modos de fallo y de sus efectos (AMFE)*.
- CASAL, J., H. MONTIEL, E. PLANAS, J. A. VÍLCHEZ (1999): *Análisis del riesgo en instalaciones industriales*, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- INSHT. NTP 238: *Nota Técnica de Prevención: Los análisis de peligros y de operabilidad en instalaciones de proceso*, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- INSHT. NTP 328: *Análisis de riesgos mediante el árbol de sucesos*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- INSHT. NTP 333: *Nota Técnica de Prevención: Análisis probabilístico de riesgos: metodología del árbol de fallos y errores*, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- INSHT. NTP 417: *Nota Técnica de Prevención: Análisis cuantitativo de riesgos: fiabilidad de componentes e implicaciones en el mantenimiento preventivo*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- MARTORELL, S., E. DOMÉNECH (2001): *Análisis del riesgo en la industria*, Universitat Politècnica de València, Valencia.
- PROTECCIÓN CIVIL (1994a): *Guía técnica: Metodología para el análisis de riesgos, visión general*. Dirección General de Protección Civil y Emergencias del Ministerio del Interior de España, Madrid.
- PROTECCIÓN CIVIL (1994b): *Guía técnica. Métodos cualitativos para el análisis de riesgos*, Dirección General de Protección Civil, Ministerio de Justicia e Interior, Madrid.
- PROTECCIÓN CIVIL (1994c): *Guía técnica. Métodos cuantitativos para el análisis de riesgos*, Dirección General de Protección Civil, Ministerio de Justicia e Interior, Madrid.
- STORCH DE GRACIA, J. M. (1998): *Manual de seguridad industrial en plantas químicas y petroleras. Fundamentos, Evaluación de riesgos y Diseño*, MC Graw-Hill, Madrid.