

# Identificación de riesgos en barcos remolcadores mediante el análisis de efecto y modo de falla

## *Risk identification in tugboat using failure mode and effect analysis*

<sup>a</sup>Maira Cecilia Gasca-Mantilla <sup>b</sup>Luis Leonardo Camargo-Ariza <sup>c</sup>Juan Guillermo Almanza-Solis

 <sup>a</sup> Doctor en Ciencias, magasca@uan.edu.co, Universidad Antonio Nariño, Santa Marta, Colombia

 <sup>b</sup> Doctor en Ciencias, lcmargoa@umagdalen.edu.co, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia

 <sup>c</sup> Ingeniero Electromecánico, jalmanza30@uan.edu.co, Universidad Antonio Nariño, Santa Marta, Colombia

**Recibido:** Mayo 22 de 2021 **Aceptado:** Agosto 27 de 2021

**Forma de citar:** M.C. Gasca, Mantilla, L.L. Camargo-Ariza, J.G. Almanza-Solis. "Identificación de riesgos en barcos remolcadores mediante el análisis de efecto y modo de falla", *Mundo Fesc*, vol 11, no. 22 pp. 163-175, 2021.

### Resumen

---

Los barcos remolcadores son esenciales para la operación de los puertos marítimos. Estos tienen las funciones de remolcar y ayudar a aquellos buques, gabarras o barcazas que no pueden moverse por sí solos; además, de escoltar a buques que contengan mercancías peligrosas. Estos navíos en su mayoría tienen propulsión de motor diésel de gran potencia en relación con el tamaño del barco. El motor es el elemento principal de un remolcador. Este trabajo tiene como objetivo estimar el número de ponderación del riesgo para cada una de las fallas del motor, para priorizar las actividades de mantenimiento y mejorar la confiabilidad del motor del barco con base en este indicador. Para esto se utiliza la herramienta del análisis de efecto y modo de falla, las norma SAE JA 1011, SAE JA 1012 e ISO 14224 y, la valoración de la severidad, la ocurrencia y la posibilidad de detención de cada falla. Se obtiene como resultado la división del activo en 6 subsistemas, se identifican 473 fallas en total, 17 de alto riesgo, 28 de mediano riesgo y 428 de bajo riesgo. Concluyendo que la mayoría de las fallas críticas se encuentran en el sistema de enfriamiento del motor.

**Palabras clave:** AMEF, Barcos Remolcador, Confiabilidad, Mantenimiento, Motor, NPR

---

**Autor para correspondencia:**

\*Correo electrónico: magasca@uan.edu.co



**Abstract:** 

---

Tugboats are essential for the operation of seaports. These have the functions of towing and helping those ships, barges or barges that cannot move by themselves; in addition, to escort ships containing dangerous goods. These vessels are mostly powered by a diesel engine of great power in relation to the size of the ship. The engine is the main element of a tugboat. The objective of this work is to estimate the risk weighting number for each of the engine failures, in order to prioritize maintenance activities and improve the reliability of the ship's engine based on this indicator. For this, the failure mode and effect analysis tool, the SAE JA 1011, SAE JA 1012 and ISO 14224 standards and the assessment of the severity, the occurrence and the possibility of detection each failure are used. The result is the division of the asset into 6 subsystems, 473 failures are identified in total, 17 of high risk, 28 of medium risk and 428 of low risk. It can be concluded that, most of the critical faults are in the engine cooling system.

**Keywords:** FMEA, Tugboat, Reliability, Maintenance, Engine, RPN

**Introducción**

Mantenimiento es la acción de tener el equipo en las condiciones para el cual fue diseñado. Esta acción impacta en los procesos de producción al disminuir los costos, garantizar la vida útil del equipo y aumentar su confiabilidad y disponibilidad [1] [2]. La filosofía de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, RCM, se centra en garantizar la confiabilidad de los activos, es decir, que el equipo no falle [3] [4]. Para esto se utilizan herramientas como: Análisis de Criticidad, Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF), Análisis Causa Raíz, entre otras. El AMEF identifica las fallas funcionales y los modos en que esta se presentan, para proponer acciones de manteniendo acordes con la falla [5] [6]. El Número Probable de Riesgo, NPR, es un indicador que cuantifica el riesgo en cada una de las fallas [7] [8]. El uso combinado del AMEF y NPR facilita la priorización de las actividades y la consecución de los recursos para el mantenimiento.

Los remolcadores de potencia de 1300 hp son artefactos navales flotantes de empuje que son usados normalmente para llevar productos derivados del petróleo por medio de barcazas de un puerto a otro [9]. Estos

remolcadores cuentan con un motor diésel C4.4 acoplado a un generador; su función principal es alimentar los otros equipos requeridos para la operación del barco [10] [11]. Si el motor llegase a presentar falla ocasionaría la parada imprevista del remolcador [12], afectando así la producción, retrasos en las operaciones y la seguridad de los activos de la empresa tales como barcazas y el remolcador mismo [13].

La falla del motor genera pérdidas en las empresas de logística portuaria debido al aumento en: los tiempos de viaje, los tiempos de espera y la disponibilidad del puerto. La parada de un remolcador representa a la empresa aproximadamente 680 dólares por hora y por un día son aproximadamente 60 millones de pesos colombianos por cada remolcador que esté inactivo [14]. El tiempo de parada está asociado a la consecución en sitio de los recursos para el mantenimiento como recurso humano, herramientas, repuestos, refacciones y desplazamiento [15].

Por las razones expuestas se realiza esta investigación que tiene como propósito estimar el NPR de las fallas basándose en el AMEF del motor, para sugerir las diferentes actividades o tareas de mantenimiento asociadas a cada falla y priorizarlas según

el riesgo [16]. Esto impacta positivamente en la operación del remolcador.

## Materiales y Métodos

Para estimar el número probable de riesgo de las fallas encontradas en un motor diésel de un barco remolcador, se realiza una investigación aplicada. Esta tiene como objetivo encontrar estrategias para planear y priorizar el mantenimiento en este tipo de barcos. Para su desarrollo se realiza el siguiente procedimiento:

Primero se identifican los detalles técnicos y operacionales del activo. Esto se realiza con base en la información del fabricante, manual de operación, manual de mantenimiento y en una inspección física del motor. El propósito de esta etapa es obtener descripción del equipo y su desagregación en subsistemas, utilizando la norma ISO 14224 [17].

Segundo se realiza el AMEF teniendo en cuenta las normas SAE JA 1011 [18] y SAE JA1012 [19]. El propósito de este paso es dar respuesta a los siguientes interrogantes: ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional? ¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones? ¿Cuál es la causa de cada falla funcional? ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla? ¿En qué sentido es importante cada falla? ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla? ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada? A partir de esto se obtiene el catálogo de fallas del equipo con la información de: la función, la falla funcional, el modo de falla, la causa de la falla, efectos de la falla y la tarea o actividad de mantenimiento recomendado; para cada parte de los subsistemas del equipo.

Posteriormente, se calcula el NPR a cada una de las fallas documentadas. Esto se realiza evaluando los criterios de severidad (S), ocurrencia (O) y detección (D) [20], según Tabla I y Tabla II.

**Tabla I.** Criterios de evaluación para el NPR.

Criterio	Valor	Pregunta
Severidad (S) Se evalúa el impacto o gravedad que tiene la falla con respecto al funcionamiento del equipo	1	No afecta el funcionamiento del equipo
	2	Afecta el funcionamiento del equipo en un 20 %
	3	Afecta el funcionamiento del equipo en un 30 %
	4	Afecta el funcionamiento del equipo en un 40 %
	5	Afecta el funcionamiento del equipo en un 50 %
	6	Afecta el funcionamiento del equipo en un 60 %
	7	Afecta el funcionamiento del equipo en un 70 %
	8	Afecta el funcionamiento del equipo en un 80 %
	9	Afecta el funcionamiento del equipo en un 90 %
	10	Afecta el funcionamiento del equipo en un 100 %

Ocurrencia o frecuencia (O) Se evalúa la ocurrencia o frecuencia de la falla	1	Se presenta falla en 12 meses o más
	2	se presenta falla en 10 meses
	3	Se presenta falla en 9 meses
	4	Se presenta falla en 8 meses
	5	Se presenta falla en 7 meses
	6	Se presenta falla en 6 meses
	7	Se presenta falla en 4 meses
	8	Se presenta falla en 3 meses
	9	Se presenta falla en 2 meses
	10	Se presenta falla en 1 mes o menos
Detección (D) Se evalúan la probabilidad y los controles de detección de la falla	1	Casi seguro la detección de la falla
	2	Muy alta la detección de la falla
	3	Altamente moderada la detección de la falla
	4	Casi moderada la detección de la falla
	5	Moderada la detección de la falla
	6	Baja la detección de la falla
	7	Muy baja la detección de la falla
	8	Remota la detección de la falla
	9	Muy remota la detección de la falla
	10	Casi imposible la detección de la falla

**Tabla II.** Baremo para la interpretación de los resultados.

NPR= (S*O*D)	Clasificación de la falla
500-1000	Alto riesgo
250-499	Mediano riesgo
1-249	Bajo riesgo

El cálculo del NPR se deben repetir luego de un tiempo aproximado de un año porque las condiciones pueden cambiar y así los valores de NPR para cada falla.

## Resultados y Discusiones

Los principales resultados se enuncian a continuación:

### A. Descripción del equipo.

El motor CAT C4.4 está ubicado en el cuarto de máquinas del remolcador. Este está soportado en bases rígidas sobre los absorbedores de vibración y se encuentra acoplado a un generador de 76 kw 440 VAC 60 Hz cada uno. En la Tabla III se registra la descripción técnica del equipo.

Tabla III. Descripción del equipo analizado.

DESCRIPCION DEL EQUIPO			
1. NOMBRE: MOTOR DE COMBUSTION CAT C4.4		2. CODIGO: S1M08222	
3. UBICACION: SALA DE MAQUINAS		4. FABRICANTE / PROVEEDOR: CATERPILLAR	
CARACTERISTICAS Y ESPECIFICACIONES			
Serial: J1Z08222, Motor: Potencia 122 HP (90.975KW) @ 1800 rpm, Engine modelo: C4.4 Dita, No. De cilindros: 4 en líneas, Desplazamiento: 4.4 L (243 pulg <sup>3</sup> ), Diámetro: 105 mm (4.13 in.), Carrera: 127 mm (5 in.), Capacidad refrigerante del motor: 45 litros aproximados, Capacidad de aceite sistema de lubricación: 8.5 litros SAE 15W40, Rotación: En sentido contrario a las manecillas del reloj (CCW), Turbo: 268-5359, Max Alt: 1000M, Fuel pump/gov: 272-2797, Fuel Valve No: 232-2724, Arrangement No: 4608706, Bare Eng Hi Idle Rpm: 1890 rpm, el motor esta soportado sobre unos absorbedores de vibración montados en bases rígidas.			
FUNCIONAMIENTO Y MANEJO			
La función principal del motor C4.4 es entregar la potencia de 122 HP (90.975 kW) a una velocidad de trabajo de 1800 RPM, a un generador de 76 kW. 440 VAC 60 Hz, para la alimentación eléctrica de todos los equipos que componen la operatividad del remolcador, el motor tiene un orden de encendido 1-3-4-2, su rotación es en sentido contrario a las manecillas del reloj (CCW), cuando el motor se ve desde el lado del volante. Los pistones tienen un diámetro de 105 mm (4.13"), una carrera de 127 mm (5.00") y el consumo o desplazamiento es de 4.41 (243 pulg <sup>3</sup> ) de combustible. Consta de dos sistemas de refrigeración cerrados HTC Y LTC y un circuito de lubricación.			
IMAGEN			
			
DESAGREGACION			
SISTEMA	COMPONENTE	DESCRIPCION	CODIGO
SISTEMA DE ADMISION	Filtro de aire. Indicador de restricción. Turbocompresor. Sistema de enfriamiento de admisión de aire. Manifold de admisión. Culata de cilindros. Cuatro válvulas de admisión. Cuatro cilindros.	El sistema de admisión tiene la finalidad de suministrar aire limpio para la combustión dentro de la cámara. El aire es aspirado a través del filtro hacia la entrada de aire del turbocompresor, se comprime y se calienta aproximadamente 150°C (300°F) antes de enviarlo al postenfriador. Cuando el aire fluye por el postenfriador, la temperatura del aire comprimido desciende alrededor de 50°C (120°F), el enfriamiento del aire de admisión aumenta la eficiencia de la combustión.	01
SISTEMA DE ESCAPE	Válvulas de escape. Multiple de escape. Exosto que tiene un silenciador. Turbocompresor.	Tiene la finalidad de expulsar los gases calientes provocados por la combustión, a una temperatura máxima de trabajo de 575 °C, salen expulsados por el pistón del motor a través de las válvulas de escape, luego ingresan al multiple, pasan por un sistema de reducción de ruido y finalmente son liberados a la atmósfera.	02
SISTEMA DE ENFRIAMIENTO	Sistema principal. Sistema auxiliar. Dos intercambiadores de calor en una caja de mar (box Cooler), principal y auxiliar. Bomba principal de enfriamiento. Bomba auxiliar de enfriamiento. Dos tanques de expansión. Caja de termostato. Sensor de temperatura de refrigerante. Sensor de nivel de refrigerante. Galerías internas de bloque. Mangueras. Tuberías de entrada y salida de refrigerante. Enfriador de aceite. Postenfriador. Dos termómetros en las tuberías de entrada y salida de refrigerante en los sistemas principal y auxiliar del motor.	La función del sistema principal de enfriamiento es mantener la temperatura de trabajo del motor entre 82 y 90 °C, disipando el calor excesivo generado por la combustión y la fricción de los componentes internos del motor. La función del sistema auxiliar de enfriamiento es mantener la temperatura del aire de trabajo del motor en 50 °C para una mejor eficiencia en la combustión.	03
SISTEMA DE LUBRICACION	Bomba de aceite de motor. Enfriador de aceite del motor. Filtro de aceite motor principal. Válvula de derivación (bypass). Carter de aceite.	El motor tiene un sistema de lubricación cuyas funciones principales son la limpieza, el enfriamiento y la lubricación de las partes móviles del motor con aceite SAE 15W40. Este tipo de aceite debe trabajar máximo a 110 °C. La presión en el sistema de lubricación funciona entre 56 y 80 PSI.	04

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO			
	Bloque del motor. Conductos. Rociadores. Sensor e interruptor de presión de aceite. Interruptor de presión de aceite.		
SISTEMA DE COMBUSTIBLE	Bomba eléctrica de cebado de combustible. Bomba de inyección. Cuatro inyectoras. Filtro primario de combustible y otro de respaldo Interruptor de presión diferencial de filtros de combustible. Sensor de fuga de combustible en la línea de alta presión. Tanques de combustible. Línea de suministro. Línea de retorno. Sistema de corte de combustible.	El combustible se extrae de los tanques de combustible B2 y E2, ubicados en el cuarto de control del remolcador, pasa por dos etapas de filtrado, sigue hacia la bomba de transferencia y de allí hacia la bomba de inyección de combustible.	05
SISTEMA ELECTRICO Y CONTROL	Baterías Alternador Motor de arranque Interruptor Switch Master Protecciones Cables y conectores varios Sensores Relé	Su función principal es suministrar 24 VDC al motor, al motor de arranque, al módulo de control del generador y a los sensores del motor diésel. Los 24 VDC para el arranque del motor son suministrados por dos baterías de 12 V y 600 A/h, referencia 48-ST1000 conectadas en serie, ubicada en una caja plástica, al lado derecho del motor diésel, las baterías reciben carga del alternador.	06

**B. El AMEF del motor.**

Se documentaron 473 fallas, identificando la función del subsistema o parte, modo de la falla, causa de la falla, efecto de la falla, tarea o actividad de mantenimiento recomendada y el NPR en cada una de ellas. En la Tabla IV se muestran solo las 17 fallas con calificación de alto riesgo.

Tabla IV. AME del motor generador del remolcados.

FUNCIÓN DEL SUBSISTEMA	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODOS DE FALLA	CAUSA DE FALLA	O	EFFECTOS DE LAS FALLAS	TAREA O ACTIVIDAD DE MANTENIMIENTO RECOMENDADA	D	R	
<b>SISTEMA DE ADMISION</b>										
Suministrar aire limpio para la combustión dentro de la cámara. El aire es aspirado a través del filtro hacia la entrada de aire del turbocompresor, se comprime y se calienta aproximadamente 150°C (300°F) antes de enviarlo al postenfriador. Cuando el aire fluye por el postenfriador, la temperatura del aire comprimido desciende alrededor de 50°C (120°F) al enfriamiento del	Suministrar aire a una presión mínima de 15 psi de aire limpio a la cámara de combustión.	No suministra aire a una presión mínima de 15 psi de aire limpio a la cámara de combustión.	Suciedad acumulada en filtro de admisión de aire primario	Agentes contaminantes del ambiente de operación	8	Las partículas suspendidas en el aire quedan atrapadas en el filtro de admisión de aire primario, en algún momento obstruye la entrada de aire al filtro, si el indicador de restricción de filtro se encuentra en el color rojo, significa que la obstrucción en el filtro es alta. No hay ingreso de aire a la cámara de combustión, si el motor estaba operando comienza hacer derrateo y pérdida de potencia, la generación eléctrica no es la adecuada para mantener la carga de los sistemas eléctricos del remolcador, si el motor estaba detenido no permite el arranque. Hay escape de humo negro y las RPM del motor se rebajan. Se coloca en servicio el motor del generador de respaldo. Por política de operaciones establece que con la falla del generador principal se debe amarrar el remolcador, así se cuenta con el generador de respaldo. Tiempo para diagnosticar, la cambiar el filtro primario de admisión y colocar en funcionamiento 1 hora.	Inspeccionar el nivel de saturación del filtro de admisión de aire del motor del generador, si el indicador de restricción es rojo limpiar el filtro de admisión de aire y después de tres limpiezas cambiar el filtro de admisión de aire.	8	5	12
		Suministrar aire a una presión mínima de 15 psi de aire limpio a la cámara de combustión.	Alabes de la rueda compresora dañados	Filtros de aires saturados	8	10	Después de una intervención de mantenimiento es posible que algún elemento o partícula de gran tamaño ingrese al turbocompresor ocasionando daños a los alabes de la rueda compresora, no suministra la cantidad y la presión de aire necesaria a la cámara de combustión, cuando el equipo entra en funcionamiento el aire de admisión se escapa al medio ambiente, no entra el aire suficiente a la cámara de combustión, el motor comienza a bajar las RPM y pierde potencia, porque el ingreso de aire a la cámara de combustión es inferior a la requerida. Hay escape de humo negro y las RPM del motor se	Inspección periódica de los filtros de aire de admisión y alabes de la rueda compresora del turbocompresor.	10	8

aire de admisión aumenta la eficiencia de la combustión.		Suministra aire a menor presión a la cámara de combustión.			rebanan. Se coloca en servicio el motor del generador de respaldo. Por política de operaciones establece que con la falla del generador principal se debe amarrar el remolcador, así se cuenta con el generador de respaldo. Avisa fluvial planner y a mantenimiento. Tiempo para diagnosticar, ajustar codo de admisión a la culata y colocar en funcionamiento 3 días si el repuesto está disponible.					
			Asientos de las válvulas de admisión de aire gastadas	Mala calibración de válvulas	7	La apertura y cierre van gastando los asientos de las válvulas de admisión del motor, en algún momento la válvula pierde hermeticidad porque el asiento está gastado y hay escape de aire de admisión que no ingresa a la cámara de combustión. No entra el aire suficiente a la cámara de combustión, el motor comienza a bajar las RPM y pierde potencia. Hay escape de humo negro y las RPM del motor se rebajan. Se coloca en servicio el motor del generador de respaldo. Avisa a mantenimiento y a fluvial planner. Envía técnico y	10	Hacer prueba de holgura de las válvulas de admisión y escape, si la holgura es mayor 0.35 milímetros recalibrar las válvulas de admisión y escape.	9	630

FUNCIÓN DEL SUBSISTEMA	FUNCION	FALLA FUNCIONAL	MODOS DE FALLA	CAUSA DE FALLA	O	EFFECTOS DE LAS FALLAS	S	TAREA O ACTIVIDAD DE MANTENIMIENTO RECOMENDADA	D	R
						repuesto. Tiempo para diagnosticar, cambiar las válvulas de admisión del motor del generador y colocar en funcionamiento 3 días.				

SISTEMA DE ESCAPE

Expulsar los gases calientes provocados por la combustión, a una temperatura máxima de trabajo de 575 °C, salen expulsados por el pistón del motor a través de las válvulas de escape, luego ingresan al múltiple, pasan por un sistema de reducción de ruido y finalmente son liberados a la atmósfera.	Expulsar los gases de escape del motor del generador al ambiente a una temperatura entre 250 a 400 °C.	Expulsa los gases de escape al ambiente a una temperatura superior a 400 °C.	Sistema de enfriamiento del motor en falla	Bomba auxiliar de enfriamiento desgastada	8	La fricción va gastando los rodamientos de la bomba principal de agua de enfriamiento del motor, los rodamientos se calientan y aumenta la vibración, en algún momento los rodamientos se frenan y hay riesgo que los componentes internos de la bomba de agua auxiliar se dañen.	10	Cambiar bomba auxiliar de enfriamiento.	10	800
--	--	--	--	---	---	---	----	---	----	-----

SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

Mantener la temperatura de trabajo del motor entre 82 y 90 °C, disipando el calor excesivo generado por la combustión y la fricción de los componentes internos del motor sistema principal, y el sistema auxiliar es mantener la temperatura del aire de trabajo del motor en 50 °C para una mejor eficiencia en la combustión.	Mantener la temperatura del refrigerante del sistema principal de motor diésel del generador entre 82 a 93 °C	No mantiene la temperatura del refrigerante del motor por entre 82 a 95 °C	Rodamientos de la bomba de agua principal del motor gastados	Fricción en los rodamientos de la bomba	8	La fricción va gastando los rodamientos de la bomba principal de agua de enfriamiento del motor, los rodamientos se calientan y aumenta la vibración, en algún momento los rodamientos se frenan y hay riesgo que los componentes internos de la bomba de agua principal se dañen. No hay flujo de refrigerante hacia las galerías del motor, el refrigerante queda dentro de las galerías sin intercambio y no pasa a la caja de mar a enfriarse. Aumenta la temperatura y a los 98 °C, se activa una alarma de alta temperatura de refrigerante en la pantalla del motor, si la temperatura sigue incrementando y alcanza los 105 °C, el motor se apaga, no hay generación de energía eléctrica momentáneamente, se coloca en servicio el motor del generador de respaldo. Por política de operaciones establece que con la falla del generador principal se debe amarrar el remolcador, así se cuenta con el generador de respaldo. Avisa a mantenimiento y a fluvial planner. Tiempo para diagnosticar, cambiar la bomba de agua principal de enfriamiento del motor, llevar técnico y repuesto y colocar en funcionamiento hasta 3 días.	10	cambiar rodamientos de la bomba principal de enfriamiento del motor.	10	800
--	---	--	--	---	---	---	----	--	----	-----

FUNCION DEL SUBSISTEMA	FUNCION	FALLA FUNCIONAL	MODOS DE FALLA	CAUSA DE FALLA	O	EFFECTOS DE LAS FALLAS	S	TAREA O ACTIVIDAD DE MANTENIMIENTO RECOMENDADA	D	R
			Tapa del tanque de expansion del sistema principal de enfriamiento seteada mayor a 7 psi	Mala instalacion de la tapa error humano	10	Después de una intervención de mantenimiento es posible que se instale una tapa del tanque de expansion del sistema principal de enfriamiento, seteada a una presión mayor de 7 psi. Los gases de refrigerante iguales a 7 psi no son liberados por la tapa del tanque de expansion, se incrementa la temperatura del refrigerante en las galerías del motor, la temperatura del refrigerante del motor comienza incrementar lentamente, si supera los 98°C, se activa una alarma de alta temperatura de refrigerante en la pantalla del motor, si la temperatura sigue incrementando y alcanza los 105 °C, el motor se apaga, no hay generacion de energia eléctrica momentáneamente, se coloca en servicio el motor del generador de respaldo. Por política de operaciones establece que con la falla del generador principal se debe amarrar el remolcador, así se cuente con el generador de respaldo. Avisa a mantenimiento y a fluvial planner. Tiempo para diagnosticar, cambiar la tapa del tanque de expansion del sistema de principal de enfriamiento del motor, llevar el repuesto al remolcador y colocar en funcionamiento 3 días.	10	Rediseño: En el procedimiento de intervención al tanque de expansion de refrigerante, colocar la actividad de verificar que la tapa este seteada a 7 psi.	5	500
	Contener el refrigerante en el sistema de enfriamiento del motor diesel	No contiene el refrigerante en el sistema de enfriamiento del motor diesel	Sello mecánico de la bomba de refrigerante del sistema principal cristalizado	Fricción del sello mecánico de la bomba	8	La temperatura, la fricción y desgaste de componentes de la bomba de refrigerante hacen que se cristalice el sello mecánico de la bomba, esto produce fuga de refrigerante por el orificio testigo de la bomba, el refrigerante sale en gotas y cae a la sentina, en algún momento puede incrementarse la fuga del refrigerante y este baja. Cuando el nivel de refrigerante sea inferior a 1/4 del tanque de expansion del motor del generador, se activa una alarma en el módulo de control del motor y la alarma general de máquinas, este se apaga y no hay suministro de energia, entra el sistema de 24V, se coloca en servicio el motor del generador de respaldo para suministrar energia a los sistemas del remolcador., se coloca en servicio el motor del generador de respaldo. Por política de operaciones establece que con la falla del generador principal se debe amarrar el remolcador, así se cuente con el generador de respaldo. Avisa a mantenimiento y a fluvial planner. Tiempo para diagnosticar, cambiar la bomba del sistema principal de enfriamiento, rellenar el refrigerante y colocar en funcionamiento 3 día en llevar el técnico y el repuesto.	10	Inspeccionar visualmente el área del testigo de la bomba de refrigerante del sistema principal, si encuentra humedad por el testigo, programar el cambio de bomba de refrigeración principal.	10	800
	Contener el refrigerante en el sistema auxiliar de enfriamiento del motor diesel	No contiene el refrigerante en el sistema auxiliar de enfriamiento del motor diesel	Sello mecánico de la bomba de refrigerante del sistema auxiliar cristalizado	Fricción del sello mecánico de la bomba	5	La temperatura, la fricción y desgaste de componentes de la bomba de refrigerante hacen que se cristalice el sello mecánico de la bomba, esto produce fuga de refrigerante por el orificio testigo de la bomba, el refrigerante sale en gotas y cae a la sentina, en algún	10	Inspeccionar visualmente el área del testigo de la bomba de refrigerante del sistema auxiliar, si encuentra humedad por el testigo, programar el cambio de bomba de refrigeración auxiliar.	10	500
FUNCIÓN DEL SUBSISTEMA	FUNCION	FALLA FUNCIONAL	MODOS DE FALLA	CAUSA DE FALLA	O	EFFECTOS DE LAS FALLAS	S	TAREA O ACTIVIDAD DE MANTENIMIENTO RECOMENDADA	D	R
						momento puede incrementarse la fuga del refrigerante y esta baja. Cuando el nivel de refrigerante sea inferior a 1/4 del tanque de expansion del motor del generador, se activa una alarma en el módulo de control del motor y la alarma general de máquinas, se activa una alarma en módulo de control y se activa la alarma general de máquinas "bajo nivel de refrigerante", se saca de línea y se asegura, se coloca en servicio el generador de respaldo. Por política de operaciones establece que con la falla del generador auxiliar se debe amarrar el remolcador, así se cuente con el generador de respaldo. Avisa a mantenimiento y a fluvial planner. Tiempo para diagnosticar, cambiar la bomba del sistema auxiliar de enfriamiento, rellenar el refrigerante				



						y colocar en funcionamiento 3 días en llevar el técnico y el repuesto.				
			Carcasa de la bomba de agua golpeada	Carcasa de la bomba mal instalada	6	En una intervención de mantenimiento es posible que golpeen con un objeto contundente la carcasa de la bomba de agua y la agrietan, cuando entre en funcionamiento el motor habrá fuga de refrigerante. Cuando el nivel de refrigerante llegue por debajo de 1/4 del tanque de expansión del motor del generador, se activa una alarma en módulo de control y se activa la alarma general de máquinas "bajo nivel de refrigerante", se saca de línea y se asegura, se coloca en servicio el generador de respaldo. Por política de operaciones establece que con la falla del generador auxiliar se debe amarrar el remolcador, así se cuente con el generador de respaldo. Avisa a mantenimiento y a fluvial planner. Envía técnico y repuesto. Tiempo para diagnosticar, drenar refrigerante, cambiar la bomba de agua, suministrar refrigerante y colocar en funcionamiento hasta 3 días.	10	Inspeccionar visualmente en la superficie de la tubería del sistema auxiliar, si encuentra humedad o grietas en la carcasa, programar cambio de la tubería del sistema auxiliar de enfriamiento.	10	600
	Activar alarma por bajo nivel de refrigerante sistema auxiliar del motor en la alarma de máquinas.	No activa alarma por bajo nivel de refrigerante sistema auxiliar del motor en la alarma de máquinas.	Señal de salida del módulo de control dañada	Conexiones del módulo de control sulfatados	6	Después de una intervención de mantenimiento es posible que el módulo de control se dañe y no se envíe la señal para activar la alarma general de máquinas, en caso de pérdida de refrigerante se emite la alarma en el módulo de control del motor y la alarma general de máquinas no se activara, se coloca en servicio el generador de respaldo. Por política de operaciones establece que con la falla del generador principal se debe amarrar el remolcador, así se cuente con el generador de respaldo. Avisa a fluvial planner y a mantenimiento. Tiempo para diagnosticar, cambiar el módulo y colocar en servicio, hasta 3 días, más el tiempo en corregir la fuga de refrigerante.	10	Cambiar módulo de control.	10	600
SISTEMA DE LUBRICACIÓN										

FUNCIÓN DEL SUBSISTEMA	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODOS DE FALLA	CAUSA DE FALLA	O	EFFECTOS DE LAS FALLAS	TAREA O ACTIVIDAD DE MANTENIMIENTO RECOMENDADA	D	R	
Suministrar una presión al sistema de lubricación cuyas funciones principales son la limpieza, el enfriamiento y la lubricación de las partes móviles del motor con aceite SAE 15W40. Este tipo de aceite debe trabajar máximo a 110 °C. La presión en el sistema de lubricación funciona entre 56 y 80 PSI.	Contener el aceite del motor del generador	No contiene el aceite del generador	Sellos de montaje de la bomba de agua cristalizados	Sellos de la bomba de agua fatigados	7	El cambio de temperatura sobre los sellos de montaje de la bomba de agua lo cristalizan, en algún momento se fisura, el aceite fuga y humedece la superficie de la bomba de agua y la carcasa frontal del motor diésel, la tierra y el polvo se adhieren a la superficie y no luce bien. Con el tiempo si la fuga se mantiene aumenta el consumo de aceite. Avisa a fluvial planner y a mantenimiento. Tiempo para diagnosticar, drenar el refrigerante, cambiar el sello de montaje de la bomba de agua y colocar en funcionamiento hasta 3 días.	Inspeccionar visualmente el área del sello de montaje de la bomba de agua del motor de generación, si encuentra humedad, programar cambio del sello de montaje de la bomba de agua	10	700	
	Mantener el aceite del motor a una temperatura entre 87 a 97 °C.	Mantiene el aceite del motor a una temperatura superior a 97 °C	Sistema de enfriamiento del refrigerante dañado	Bomba auxiliar de enfriamiento desgastada	5	En cualquier momento la bomba auxiliar de agua se daña, no hay flujo de agua hacia el poses fiador, no se enfría el aceite del motor que sale de las galerías, si la temperatura del aceite de supera los 50 °C el motor comienza a bajar las RPM y pierde potencia. Hay escape de humo negro. Se coloca en servicio el motor del generador de respaldo.	cambiar bomba auxiliar de enfriamiento del motor.	10	500	
SISTEMA DE COMBUSTIBLE										
Generar una potencia de 122 HP (90.975 kW) a una velocidad de trabajo de 1800 RPM a el generador de 76 KW 440 VAC 60 HZ El motor tiene un orden de encendido 1-3-4-2, su rotación es en sentido contrario a las manecillas del reloj (CCW), cuando el motor se ve desde el lado del volante.	Generar un torque de 122 HP a 1800 RPM al generador	No genera un torque al generador de 122 HP a 1800 RPM	Falla del sistema de combustible	Bomba de cebado y transferencia de combustible dañada	6	La fricción va gastando los componentes internos de la bomba de cebado y transferencia de combustible, en algún momento entrega una presión inferior a xx bar a la bomba de inyección, la presión de combustible no es suficiente para que la bomba de inyección mantenga presión de pulverización de los inyectores, el motor del generador pierde potencia hasta que se apaga.	Instalación de un medidor de presión de entrega de combustible al módulo de control para monitoreo y control de parámetros del motor por parte del maquinista, de lo contrario cambiar bomba de cebado y transferencia.	10	9	540

Succionar de los tanques de servicio y suministrar el combustible en la cantidad correcta y en el momento preciso al interior de los cilindros, y así generar una combustión, que se convierte en la fuerza mecánica del generador que posteriormente se transforma en energía eléctrica.	Contener el combustible	No contiene el combustible	Sellos de la bomba de inyección de combustible cristalizados	Sellos de la bomba de inyección fatigados	5	La temperatura y la presión de combustible cristalizan los sellos de la bomba de inyección de combustible, en algún momento se agrieta y se presentan fugas de combustible que humedecen el área de la bomba de inyección de combustible, la fuga es lenta, el polvo y la tierra se adhieren a la humedad. No luce bien. Avisa a fluvial planner y a mantenimiento. Tiempo para diagnostica cambiar los sellos de la bomba de inyección de combustible y colocar en funcionamiento hasta 3 días.	10	Inspeccionar visualmente el área del sello de la bomba de inyección, si la encuentra húmeda, programar cambio	10	500
<b>SISTEMA ELÉCTRICO Y DE CONTROL</b>										

FUNCIÓN DEL SUBSISTEMA	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODOS DE FALLA	CAUSA DE FALLA	O	EFFECTOS DE LAS FALLAS	S	TAREA O ACTIVIDAD DE MANTENIMIENTO RECOMENDADA	D	R
Activar una alarma cuando ocurre una parada del motor, el indicador LED "COMMON SHUTDOWN" queda encendido junto con una alarma sonora en el módulo de control del generador, en la pantalla se visualiza la causa de la falla y se activa la alarma de emergencia del motor del generador. (La indicación visual no aplica para el Puerto Triunfo y Puerto Berrio.)	Activar una alarma sonora y luminosa en los cuartos de máquinas y una alarma en el módulo de control del generador, cuando se activa la parada de emergencias "parada de emergencia activada", cuando se acciona el paro de emergencia del motor del generador. (La indicación visual no aplica para el Puerto Triunfo y Puerto Berrio.)	No activa una alarma sonora y luminosa en los cuartos de máquinas y una alarma en el módulo de control del generador, cuando se activa la parada de emergencias "parada de emergencia activada", cuando se acciona el paro de emergencia del motor del generador.	Pines de conexión de entrada de alarma al módulo de control humedo.	Agentes contaminantes del ambiente de operación	8	La humedad y la contaminación se adhieren a los pines de conexión de entrada de alarma al módulo de control, estos se sulfatan y la señal se aísla. En caso que falle el generador que se encuentra en servicio y se accione la parada de emergencia del motor este lo apaga, el módulo de control no recibe señal de la parada de emergencia y no envía señal al módulo de alarmas del tablero principal del cuarto de control, no se activan las alarmas sonora y luminosa del cuarto de máquinas, cuarto del thruster y cuarto de control. Se avisa fluvial planner y a mantenimiento. tiempo para diagnosticar, limpiar los pines de conexión y restablecer el sistema hasta 3 días, mas el tiempo que se demore en corregir la falla que genere apagar el motor.	7	Realizar limpieza periódicamente con limpiador de contacto de los pines de conexión de entrada de alarma.	9	504
Suministrar 24 VDC al motor, al módulo de control del generador, sistema de alarmas y a los sensores del motor diésel, los 24 VDC para el arranque del motor son suministrados por dos baterías de 12 V y 600 A/h, referencia 48-ST1000 conectadas en serie, ubicada en una caja plástica, al lado derecho del motor diésel, las baterías reciben carga del alternador.	Suministrar 28=1 v a 55 A al banco de baterías y sistema eléctrico del motor. (Puerto Berrio y Puerto Triunfo)	No suministra 28=1 v a 55A al banco de baterías y sistema eléctrico del motor. (Puerto Berrio y Puerto Triunfo)	Correa de transmisión de potencia del motor al alternador dañada	Correa de transmisión de potencia cristalizada	9	En cualquier momento, la correa de transmisión de potencia del motor al alternador se daña, no hay suministro de 28=1V para cargar el banco de baterías y alimentar el sistema eléctrico del motor, el motor diésel continúa trabajando con la alimentación del banco de baterías. Se pierde la alimentación de los indicadores analógicos de presión de aceite, temperatura de refrigerante y horómetro. Si el generador continúa trabajando, el banco de baterías se descarga y el generador se apaga. Se activa una alarma sonora y luminosa en el generador y alarma de máquinas, se activan las luces de emergencia. Es necesario colocar en servicio el generador de respaldo. Por política de operaciones se debe amarrar el remolcador así se cuente con el generador de respaldo. Avisar a mantenimiento y fluvial planner. Tiempo para diagnosticar, trasladar al técnico, conseguir el repuesto, cambiar la correa de transmisión de potencia del motor al alternador y colocar en funcionamiento hasta 3 días.	10	Cambiar correa de transmisión de potencia del motor.	10	900
	Suministrar 28=1 voltios a 55 A al banco de baterías y sistema eléctrico del motor. (Capulico Calamar, San Pablo y Magangué)	No suministra 28=1 voltios a 55 A al banco de baterías y sistema eléctrico del motor. (Capulico Calamar, San Pablo y Magangué)	Correa de transmisión de potencia del motor al alternador dañada	correa de transmisión de potencia al alternador cristalizada	9	En cualquier momento, la correa de transmisión de potencia del motor al alternador se daña, no hay suministro de 28=1V a 55A para cargar el banco de baterías y alimentar el sistema eléctrico del motor, el motor diésel continúa trabajando con la alimentación del banco de baterías. Se activa una alarma de "carga de alternador". Si el generador continúa trabajando, el banco de baterías se descarga y el generador se apaga. Se activa una alarma sonora y luminosa en el generador y alarma de máquinas, se activan las luces de emergencia. Es necesario colocar en servicio el generador de respaldo. Por política de operaciones se debe amarrar el remolcador así se cuente con el generador de respaldo. Avisar a	10	Cambiar correa de transmisión de potencia del motor al alternador.	10	900
FUNCIÓN DEL SUBSISTEMA	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODOS DE FALLA	CAUSA DE FALLA	O	EFFECTOS DE LAS FALLAS	S	TAREA O ACTIVIDAD DE MANTENIMIENTO RECOMENDADA	D	R
						mantenimiento y fluvial planner. Tiempo para diagnosticar, trasladar al técnico, conseguir el repuesto, cambiar la correa de transmisión de potencia del motor al alternador y colocar en funcionamiento hasta 3 días.				

El AMEF completo queda consignada en un catálogo, en donde detalla el contexto operacional y funcional del motor, así como las fallas y los posibles mantenimientos.

**C. Clasificación de las fallas por subsistemas y por su NPR**

La Figura 1, muestra la clasificación de las fallas por su nivel de riesgo. Esto se realiza teniendo en cuenta el baremo mostrado en la Tabla 2, el NPR calculado con la Tabla 1 y el AMEF. En el equipo estudiado se identificaron 17 fallas con alto riesgo, 28 fallas de mediano riesgo y 428 de bajo riesgo.

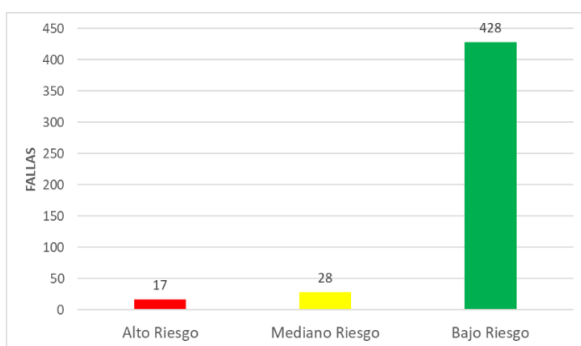


Figura 1. Clasificación de las fallas por su NPR

La Figura 2, muestra las fallas presentadas en cada Subsistema. El Subsistema más propenso a fallar es el Sistema de Enfriamiento. Este representa el 26 % de las posibles fallas (121 falla). El Subsistema con menor porcentaje es el Sistema de Escape con el 4 % de las posibles fallas (17).

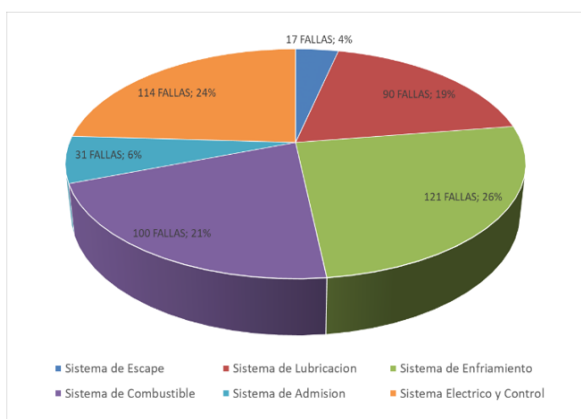


Figura 2. Clasificación de las fallas por Subsistema

La Figura 3, muestra la clasificación de las fallas por Subsistema y por su nivel de riesgo.

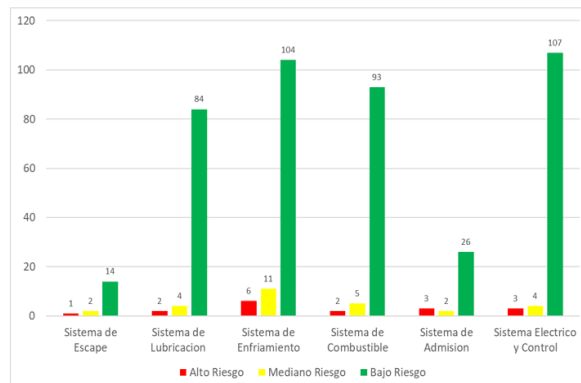


Figura 3. Clasificación de las fallas por subsistema y nivel de riesgo

**Conclusiones**

Es posible identificar el riesgo en los barcos remolcadores usando la herramienta del AMEF y el NPR al motor generador del mismo.

La descripción del equipo facilita el manejo de la información a los operarios y a los mantenedores, porque divide el equipo en subsistemas, identificando sus partes y funciones.

El AMEF elaborado presenta suficiente información del proceso de funcionamiento del motor, al igual que la forma en que este puede fallar, facilitando la asignación de actividades de mantenimiento.

Las 17 fallas de alto riesgo deben ser atendidas con prioridad en el mantenimiento, para disminuir el riesgo y los tiempos de parada del equipo.

El sistema de enfriamiento del motor registra el mayor número de falla totales y mayor número de fallas de alto riesgo, clasificándolo como un subsistema crítico para la operación.

A cada modo de falla se le debe asignar

una acción de mantenimiento, estas pueden ser preventivas, predictivas o correctivas. Se recomienda en lo posible actividades preventivas y predictivas priorizando las de alto riesgo.

## Referencias

- [1] M. Gasca, L. Camargo y B. Medina, «Gestión del mantenimiento para la confiabilidad operacional,» *Revista Espacios*, vol. 41, n° 47, pp. 250-261, 2020.
- [2] L. Mora, *Mantenimiento. Planeación, ejecución y control*, México D. F: Alfaomega Grupo Editor, 2009.
- [3] M. Gasca, L. Camargo y B. Medina, «Sistema para evaluar la confiabilidad de equipos críticos en el sector industrial,» *Información tecnológica*, vol. 28, n° 4, pp. 111-124, 2017.
- [4] J. Moubray, *Reliability-centered maintenance*, New York: Industrial Press Inc, 2001.
- [5] H. Liu, L. Wang, L. Z. y Y. Hu, «Improving risk evaluation in FMEA with cloud model and hierarchical TOPSIS method,» *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 27, n° 1, pp. 84-95, 2018.
- [6] I. Silva-Urbina, M. Rodríguez-Pineda, R. Acosta-Rozo y P. Gómez-Monsalve, «Diseño de plan de mantenimiento preventivo para los talleres del centro CIES Sena Regional Norte de Santander utilizando metodología AMEF,» *Mundo FESC*, vol. 9, n° 18, pp. 36-46, 2019.
- [7] L. Pérez-Domínguez, E. Almeida y E. León, «Aplicación de los métodos AMEF-TOPSIS-AHP para determinar el RPN,» *Mundo FESC*, vol. 11, n° 21, pp. 37-46, 2021.
- [8] L. Pérez-Domínguez, M. Cruz-Hernández, D. Luviano-Cruz y L. Rodríguez-Picón, «Aplicación AMEF con MOORA para la evaluación de un caso,» *Mundo FESC*, vol. 11, n° 21, pp. 26-36, 2021.
- [9] X. Wei, S. Jia, Q. Meng y K. Tan, «Tugboat scheduling for container ports,» *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 142, n° 10, p. 102071, 2020.
- [10] M. Jurkovič, T. Kalina, O. Stopka, P. Gorzelanczyk y B. Abramović, «Economic Calculation and Operations Research in Terms of LNG Carriage by Water Transport: A Case Study of the Port of Bratislava,» *Sustainability*, vol. 13, n° 6, p. 3414, 2021.
- [11] CATERPILLAR, «SISTEMAS DE POTENCIA MARINOS,» 1 6 2020. [En línea]. Available: [https://www.cat.com/es\\_MX/products/new/power-systems/marine-power-systems.html](https://www.cat.com/es_MX/products/new/power-systems/marine-power-systems.html). [Último acceso: 15 1 2021].
- [12] C. Rojas, «Análisis de fallas en motores y generadores eléctricos de embarcación marítima de carga,» Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, 2021.
- [13] A. Ramírez, J. Coy y M. Velásquez, «Infraestructura logística y estrategias de marketing para la competitividad portuaria,» *Revista de economía & administración*, vol. 12, n° 2, pp. 95-112, 2015.
- [14] GRUPO EMPRESARIAL PUERTO DE SANTA MARTA, «PUERTO DE SANTA MARTA,» 1 6 2020. [En línea]. Available: <https://www.spsm.com.co/Servicios/TarifasPuerto>. [Último acceso: 1 2 2021].

- [15] M. Fernández y L. Shkiliova, «Validación de un método para el cálculo de indicadores de mantenimiento,» *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 21, n° 4, pp. 72-79, 2012.
- [16] P. Chemweno, L. Pintelon, A. Van Horenbeek y P. Muchiri, «Development of a risk assessment selection methodology for asset maintenance decision making: An analytic network process (ANP) approach,» *International Journal of Production Economics*, vol. 170, n° 12, pp. 663-676, 2015.
- [17] ISO, *14224:2016 Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment*, SUiza: ISO, 2016.
- [18] SAE, *JA1011\_200908, Evaluation criteria for reliability-centered maintenance (RCM) processes*, Washington: SAE, 2009.
- [19] SAE, *JA1012\_201108, A guide to the reliability-centered maintenance (RCM) standard*, Washington: SAE, 2002.
- [20] D. Gazzoli, S. Sebastián y C. Ghisolfi, «Matriz de riesgo: experiencia en nuestro laboratorio,» *Revista Bioquímica y Patología Clínica*, vol. 85, n° 1, pp. 21-25, 2021.