

## Root Cause Analysis in a thermoelectric generation plant in Ecuador.

### Análisis Causa Raíz en central de generación termoeléctrica de Ecuador.

#### Autores:

Ing. López-Coronel, Gabriel Fernando  
Facultad de posgrado, maestría en mantenimiento industrial  
Universidad Técnica de Manabí  
Maestrante  
Portoviejo – Ecuador



[glopez2061@utm.edu.com](mailto:glopez2061@utm.edu.com)



<https://orcid.org/0009-0009-8621-490X>

Dra. Real-Pérez, Grether Lucia, Ph.D.  
Carrera de ingeniería industrial, Facultad de matemáticas, física o química  
Universidad Técnica de Manabí  
Portoviejo – Ecuador



[grether.real@utm.edu.ec](mailto:grether.real@utm.edu.ec)



<https://orcid.org/0000-0003-4792-6217>

Ing. Moreira-Mendoza, Néstor Roberto, Mgtr.  
Carrera de tecnología superior en electrónica.  
Instituto Superior Tecnológico Paulo Emilio Macias.  
Portoviejo – Ecuador



[nestor.moreira@itspem.edu.ec](mailto:nestor.moreira@itspem.edu.ec)



<https://orcid.org/0000-0003-0179-7421>

Citación/como citar este artículo: López-Coronel, Gabriel Fernando., Real-Pérez, Grether Lucia., y Moreira-Mendoza, Néstor Roberto. (2023). Análisis Causa Raíz en central de generación termoeléctrica de Ecuador. MQRInvestigar, 7(3), 3589-3608.

<https://doi.org/10.56048/MQR20225.7.3.2023.3589-3608>

Fechas de recepción: 06-AGO-2023 aceptación: 06-SEP-2023 publicación: 15-SEP-2023



<https://orcid.org/0000-0002-8695-5005>

<http://mqrinvestigar.com/>



## Resumen

Las organizaciones industriales a lo largo del tiempo han estado en la búsqueda de diferentes maneras de racionalizar los costos de mantenimiento de los activos, pero sin realizar un estudio integral del impacto en la eficiencia técnica y económica del negocio. El objetivo de este artículo consiste en aplicar el Análisis Causa Raíz al proceso de generación eléctrica que se encuentra instalado en una central termoeléctrica de la Corporación Eléctrica del Ecuador, para obtener recomendaciones objetivas que tributen a erradicar las causas de los fallos y a mejorar los índices de eficiencia del proceso de generación. Para dar respuesta al objetivo se procedió al análisis de modos de fallos, se caracterizaron los elementos, activos y sistemas dentro de la planta, para asignar el grado de criticidad, y jerarquizar los problemas detectados. Asimismo, se realizó la valoración de hipótesis para la identificación de la causa raíz y la elaboración de mejoras para aumentar los índices de gestión: Confiabilidad, Mantenibilidad, Disponibilidad y Costo por Indisponibilidad por Fallo. Estos índices fueron mejorados significativamente, por lo que el proceso de generación logró alcanzar mayor eficiencia técnica y económica.

**Palabras clave:** Análisis Causa Raíz, Confiabilidad, Mantenibilidad, Disponibilidad, Costo por Indisponibilidad por Fallo.

## Abstract

Industrial organizations over time have been searching for different ways to rationalize asset maintenance costs, but without carrying out a comprehensive study of the impact on the technical and economic efficiency of the business. The objective of this article is to apply the Root Cause Analysis to the electricity generation process that is installed in a thermoelectric power plant of the Electricity Corporation of Ecuador, in order to obtain objective recommendations that contribute to eradicating the causes of failures and improving the failure rates. efficiency of the generation process. In order to respond to the objective, the analysis of failure modes was carried out, the elements, assets and systems within the plant were characterized, to assign the degree of criticality, and prioritize the problems detected. Likewise, the evaluation of hypotheses was carried out for the identification of the root cause and the elaboration of improvements to increase the management indices: Reliability, Maintainability, Availability and Cost for Unavailability due to Failure. These indices were significantly improved, so the generation process managed to achieve greater technical and economic efficiency.

**Keywords:** Root Cause Analysis, Reliability, Maintainability, Availability, Cost of Unavailability due to Failure.

## Introducción

Para (Amendola, 2003) productividad y competencia son características de los ambientes donde se desempeñan corporaciones e industrias, las cuales se ven obligadas a maximizar sus capacidades productivas y minimizar costos operativos. La condición y disponibilidad de sus sistemas productivos juegan un papel decisivo en el éxito de sus negocios.

Un gran número de organizaciones e industrias actuales aún se encuentran en la generación del mantenimiento como actividad correctiva, esta etapa solo genera paradas inesperadas al esperar solo a reparar cuando falló el activo, produciendo pérdidas económicas según (Donoso et al., 2022) pueden ser: indisponibilidad productiva, impactos en seguridad y ambiente, mayor costo en reparaciones después del fallo.

A nivel mundial la gran mayoría de las industrias menos actualizadas están perdiendo millones de ingresos por no producir sus plantas a una máxima capacidad, básicamente por no tener un plan de mantenimiento efectivo que reduzca la indisponibilidad de sus activos por fallos imprevistos, situación que ocurre por darle poca o nula importancia a la actividad de mantenimiento, calificándola como un recurso para cubrir emergencias e incluso definirlo como un mal necesario de la planta que debe ser tolerado (García Palencia, 2006)

Es por esto que (Castro-Castro & Cendales-Ladino, 2019) indica que, debido a la gran cantidad de pérdidas económicas, y en algunos casos humana, dentro de las organizaciones, se vieron obligados a tomar medidas que usan el análisis de los fallos como herramienta fundamental para la adquisición de información y conocimiento para determinar el tiempo de vida útil de los activos y sus elementos, así como los efectos que provocan dichos elementos al estar en mal estado o por mala operación generando fallos de los procesos.

La toma de decisiones a nivel de diseño de una planta industrial, normalmente se considera una relación directa entre el costo de capital (inversión) y el costo de mantenimiento asociado a la misma, (Arata, 2009) es este indicador, en muchos casos, el que permite la mejora continua, implementando una gestión de mantenimiento que otorgue mayor seguridad y confiabilidad a los activos.

Las empresas generadoras de energía eléctrica que se encuentran ubicadas dentro del sector estratégico de servicios básicos, deben cumplir con los valores establecidos de Disponibilidad y Confiabilidad, que son los objetivos principales del negocio, los cuales son, de manera importante, evaluados por un organismo de control nacional.

Con el fin de obtener mayores índices de Confiabilidad y Disponibilidad es necesario aplicar el método de análisis de criticidad en los activos que afectan directamente y de manera significativa el alcance del objetivo de la organización, teniendo en cuenta que se deben dar soluciones, sin que aquello genere mayor costo en la planificación de mantenimiento existente.

Para, (Valenzuela Toledo, 2021) en su estudio reconoce la importancia de identificar el equipo de mayor criticidad, y poder llegar a determinar los componentes y actividades de mayor riesgo para la producción en indisponibilidad y menor confiabilidad.

Por tanto, el objetivo de este artículo consiste en aplicar el Análisis Causa-Raíz (ACR) a un proceso de generación eléctrica que se encuentra instalado en una central termoeléctrica de la Corporación Eléctrica del Ecuador, para obtener mejoras objetivas que tributen a erradicar las causas de los fallos y a mejorar los índices de eficacia del proceso de generación.

Como resultado principal de la aplicación del ACR está la detección de las causas fundamentales de los problemas del proceso de generación eléctrica de la central termoeléctrica - Corporación Eléctrica Ecuador y la identificación de soluciones objetivas. Los índices de Confiabilidad, Mantenibilidad, Disponibilidad y Costo por Indisponibilidad por Fallo calculados mejoran significativamente, con los cual el proceso de generación alcanzará mayor eficiencia técnica y económica.

## **Material y métodos**

La aplicación del método ACR, permitirá identificar las causas raíces y obtener soluciones, que puedan erradicar estas causas, mediante una actividad enfocada al mantenimiento, y culminando con la evaluación de los resultados, que permitan realizar los reajustes necesarios para llegar a un nivel de eficiencia deseado.



Para (Catalán & Aparisi, 2019). “El análisis de causa raíz se utiliza para investigar cuáles son las causas que han originado un determinado problema o incidencia, poder actuar sobre ellas evitando así su recurrencia en el futuro”.

Según (Berroteran et al., 2021), el ACR presenta las siguientes ventajas: mejora la fiabilidad, reduce los costos de reparación y penalización por indisponibilidad de las unidades de generación, amplía el acceso corporativo a la información, y mejora la comunicación de las lecciones aprendidas. Asimismo, (Taco & Elena, 2019), afirma que el ACR identifica los problemas, mejora la eficacia de los procesos, posibilita enfocar esfuerzos en la racionalización, mejora en la moral y en el personal de la empresa.

Para aplicar este método de análisis se debe llevar a cabo un orden de actividades secuenciales a saber: (Sepúlveda et al., 2022).

1. Conformación del equipo de trabajo.
2. Definición y jerarquización de problemas.
3. Definición y costos de los modos de fallo
4. Definición y validación de hipótesis.
5. Definición de causas raíces físicas, humanas y latentes.
6. Identificación y aplicación de las recomendaciones
7. Evaluación de la efectividad de las recomendaciones

### **1. Conformación del equipo de trabajo**

El equipo de trabajo, para acompañar la aplicación del método ACR, debe estar compuesto por especialistas de diferentes áreas que participan en el proceso de generación, que cuenten con la experiencia y conocimientos necesarios para ser consultados, emitir criterios, elaborar lluvias de ideas sobre los diferentes modos de fallos y sus soluciones, procesar información y aportar todo tipo de orientación básica, que sea de suma importancia para el análisis.

## 2. Definición y jerarquización de problemas

El análisis de criticidad de problemas, comienza con la utilización de la Matriz Cualitativa de Riesgo según (Parra & Crespo Marquez, 2020), tabla 1, para evaluar los parámetros siguientes: recurrencia del evento, impacto operacional, flexibilidad operacional, costo de mantenimiento e impacto en seguridad, higiene y ambiente, que son los que afectan directamente al negocio de las empresas donde se aplica el ACR.

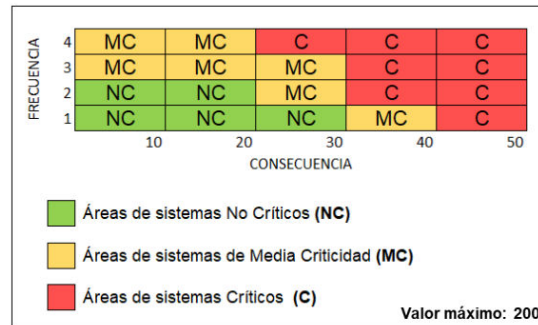
Tabla 1. Matriz Cualitativa de Riesgo, parámetros y equivalencia

Parámetros	Equivalencia
Recurrencia de eventos (RE)	
Pésimo - mayor a 4 fallos/año	4
Malo - entre 1 a 4 fallos/año	3
Regular - 0.5 a 1 fallos/año	2
Promedio - 0.25 a 0.5 fallos/año	1
Impacto operacional (IO)	
Parada inmediata en de toda la generación	10
Parada inmediata de generación parcial	8
Impacta a la disponibilidad inmediata	6
Parada controlada	4
No genera ningún efecto en la generación	1
Flexibilidad operacional (FO)	
No existe opción de producción	4
Hay opción de repuesto compartido	2
Función de repuesto disponible	1
Costo de mantenimiento (CM)	
Mayor o igual a \$20.000,00	2
Inferior a \$20.000,00	1
Impacto en seguridad higiene ambiente (SHA)	
Afecta la seguridad humana/ambiente - alto impacto	8
Afecta las instalaciones causando daños severos	6
Impacto ambiental bajo que viola normas ambientales	4
Provoca molestias mínimas a las instalaciones o al ambiente	2
No hay afectación	1

. Fuente: [Acoplada para la generación eléctrica (Sepúlveda et al., 2022)]

El nivel de criticidad se obtiene como resultado de la evaluación de los niveles de frecuencia y consecuencia (Figura 1).

Figura 1. Tabla de matriz de criticidad (frecuencia - consecuencia)



Fuente(Rodríguez et al.)

y aplicando las siguientes ecuaciones:

$$\text{Criticidad} = \text{Frecuencia} * \text{Consecuencia} \quad (1)$$

Donde:

Frecuencia (Recurrencia de eventos, RE o Número de fallos en un tiempo determinado),

$$\text{Consecuencias} = (\text{IO} * \text{FO}) + \text{CM} + \text{SHA} \quad (2)$$

### 3. Definición y costos de los modos de fallo.

Definidos de cada uno de los modos de fallo que brinda como resultado el análisis de la Matriz de Criticidad, se contestan, de manera ordenada, las siguientes preguntas: ¿Qué fue lo que ocurrió?, esta pregunta se recomienda que se responda a nivel de activos. ¿Cuándo ocurrió?, aquí se incluyen las fechas y las frecuencias de recurrencia del evento. ¿Dónde ocurrió el problema?, aquí se agrupan las instalaciones y permite visualizar si hay diversos problemas en una misma área. ¿Importancia?: Se describe el impacto y las consecuencias del evento de fallo sobre el ambiente, las personas y las operaciones (pérdidas económicas).

### 4. Definición y validación de hipótesis.

Determinados la criticidad de los modos de fallos y sus costos de reparación y sanción por la pérdida de producción, le corresponde al grupo de especialistas preguntar: ¿por qué ocurren los modos de fallos?, y emitir los criterios convenientes, según sus experiencia o registros



obtenidos durante la vida del activo, para obtener diferentes hipótesis, que una vez verificadas, se conviertan en la causa raíz del modo de fallo. En esta etapa de definición de hipótesis, se validan con datos y evidencias las hipótesis más probables y se descartan las hipótesis que no contienen bases contundentes, apoyados en los siguientes aspectos: variables de operación, historiales de mantenimiento, registro de bitácoras operacionales, registros de histórico de órdenes de trabajo del activo, resultados de inspección física, resultados de análisis de laboratorio, información de compras y justificativos, procedimientos de mantenimiento según manuales del fabricante, procedimiento de operación según manual de fabricantes, datos y modificaciones actualizadas sobre el diseño realizadas por el fabricante, registro de entrenamiento del personal encargado

##### **5. Definición de causas raíces físicas, humanas y latentes.**

Logrado identificar las hipótesis y validadas con los aspectos antes mencionados, se procede a definir las posibles causas raíces para cada una de las hipótesis validadas, clasificándolas en tres posibles causas según (Latino et al., 2002) Causa Raíz física (envuelve materiales o cosas tangibles que pueden o no provocar dicha hipótesis), Causa Raíz humana (debido a una inapropiada intervención del ser humano), Causa Raíz Latente (relacionada con la falta o deficiencia en la gestión y administración).

##### **6. Identificación y aplicación de las recomendaciones.**

Las recomendaciones se aplican para evitar o reducir la frecuencia de los eventos, disminuyendo los impactos que conllevan estos fallos, sean económicos, al ambiente, a la seguridad de las personas o a la calidad de la producción, mejorando así la confiabilidad del proceso. Además, se debe justificar la inversión para aplicar la solución bajo un Análisis de Costo Riesgo Beneficio (ACRB) sobre la base de los siguientes criterios: prevenir la frecuencia del fallo original o similares, no generar nuevos problemas adicionales o nuevos modos de fallos, minimizar y controlar los efectos y consecuencias que traen consigo los nuevos modos de fallos que se puedan generar como consecuencia de las mejoras propuestas, y por último, no desviarse de los objetivos y las metas de la organización. Una vez aplicándolas, se debe realizar el ACRB, para poder calcular los valores exactos y poder cuantificar el beneficio de la organización por la implementación de las mismas.

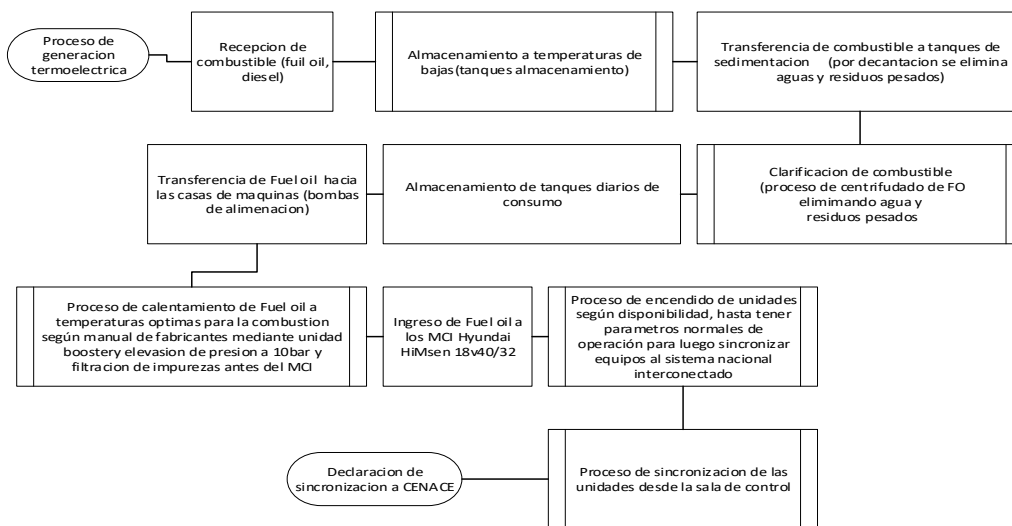
## 7. Evaluación de la efectividad de las recomendaciones

Finalmente, realizado el ACRB se obtienen los valores del costo, entonces, se procede al análisis de indicadores comparando el antes y el después.

### Características del proceso analizado.

El ACR se realiza a un proceso de generación termoeléctrica que se encuentra instalado en una central termoeléctrica de la Corporación Eléctrica del Ecuador, ver figura 2.

Figura 2. Diagrama de flujo proceso de generación termoeléctrica



. Fuente: [propia]

## Resultados

### 1. Conformación del equipo de trabajo.

Esta etapa se inició por definir la cantidad de especialistas (E) que conforman el grupo, que al menos, sea estadísticamente significativa para hacer fiable la aplicación del ACR.

Para esto se utilizó un método probabilístico asumiendo una ley de probabilidad binomial (Freund, 2000):

$$E = \frac{p*(1-p)*k}{i^2} \quad (3)$$



Donde:

p: proporción estimada del error, %

k: constante asociada al nivel de confianza. Por tabla, para  $NC = 1 - \alpha$  ( $\alpha = 0.01$ ),

i: Nivel de precisión deseado (0.14 - 0.50),

$$E = \frac{0,05*(1-0.05)*6,65}{0,0625} = 5,05 (5)$$

Este resultado justifica que 5 especialistas son suficientes para lograr la autenticidad de la aplicación. Por motivos de confidencialidad, no se muestran los nombres y apellidos, solo se enumera los cargos, actividades y años de experiencia:

- Facilitador y líder organizador para la aplicación del método ACR, (20 años)
- Supervisor de operación y aportador de información base del histórico de producción del proceso de generación, (14 años)
- Supervisor de mantenimiento y aportador de información base de trazabilidad de los activos y repuestos, así como de informes de mantenimientos realizados en los procesos, (5 años)
- Especialista en ingeniería, encargado de los procedimientos requeridos sobre compras públicas de los activos y repuestos para el mantenimiento, así como rutinas implementadas en cada mantenimiento, (9 años)
- Especialista en adquisición aporte de conocimientos legales sobre compras públicas, (7 años)

## 2. Definición y jerarquización de problemas

El grupo de especialistas definió las principales afectaciones de los activos del proceso de generación. Se realizó la calificación de cada uno de los modos de fallos, a partir de los parámetros y sus equivalencias, de la tabla 1. Las equivalencias se otorgaron sobre la base de las experiencias y datos estadísticos de las bitácoras de los técnicos. Se aplicaron las ecuaciones 1 y 2. Ejemplo para el modo de Fallo en generador

Frecuencia o Recurrencia de eventos (RE), para Regular - 0.5 a 1 fallos/año = 2

Consecuencias =  $(8 * 4) + (2 + 6) = 40$

Criticidad =  $2 * 40 = 80$

Los resultados de la evaluación de los modos de fallo más recurrentes se muestran en la tabla 2:

Tabla 2. Definición y jerarquización de problemas.

Modo de fallo más recurrentes	RE	IO	FO	CM	SHA	Conse- cuencia	Criti- cidad	Jerar- quía
Fallo en generador	2	8	4	2	6	40	80	C
Fallo en turbocargador	2	10	4	2	6	48	96	C
Fallo en autofiltro de aceite	2	7	4	1	2	31	62	SC
Fallo en autofiltro de combustible	3	1	1	1	2	4	12	NC
Fallo de sensores de temperatura de Cilindros	4	1	1	1	1	3	12	NC
Fallo en válvula termostática de aceite	3	4	2	1	1	10	30	NC
Fallo en bomba de refuerzo (booster)	3	1	1	1	1	3	9	NC

Fuente: [propia elaborada de modos de fallo presentadas en el proceso de generación]

Se puede observar en la tabla 2 que, solo tres de ellos presentan la jerarquía que merece continuar en el análisis, es decir, los modos de fallo críticos (C) y semi-críticos (SC).

### 3. Definición y costos de los modos de fallo

Priorizados los modos de fallo C y SC, se procede a la descripción de cada uno de ellos, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Descripción del problema

Preguntas	Fallo Generador	Fallo turbocargador	Fallo autofiltro de aceite
¿Qué?	Parada de emergencia por olor a humo y presencia de chispas dentro del generador	Constantes picos de sobrerrevoluciones del turbocargador	Disparo de seguridad por baja presión de lubricación
¿Cuándo?	Confidencial	Confidencial	Confidencial
¿Dónde?	Confidencial	Confidencial	Confidencial
Cuantificación del impacto			
Seguridad	No existió afectación en seguridad	No existió afectación en seguridad	No existió afectación en seguridad

Ambiente	Leve afectación por humo	No existió afectación en ambiente	No existió afectación en ambiente
Costos directos, \$ (Costo Mano Obra, CMO + Costo Materiales, CM), *	817.143,33 (3.143,33 + 814.000,00)	119.810,00 (5.510,00 + 114.300,00)	18.650,00 (250,00 + 18.400,00)
Costo de penalización, \$ (PE) *	18.329,60	6.873,60	3.436,80
Penalización total, \$ (PT = CMO+CM+PE)	835.472,93	126.683,60	22.086,80
Frecuencia recurrente de eventos por año			
Frecuencia de fallo, anual (FF)	0.5	0.5	0.5
Información de recurrencia de eventos	El fallo se presentó con una recurrencia de <u>dos años</u> según registros de bitácoras y ordenes de trabajo	El fallo se presentó con una recurrencia de <u>dos años</u> según registros de bitácoras y ordenes de trabajo	El fallo se presentó con una recurrencia de <u>dos años</u> según registros de bitácoras y ordenes de trabajo
Impacto total del evento de fallo anual			
Riesgo Total Anual (RTA), \$/año **	417.736,47	63.341,80	11.043,40

Fuente: [propia, elaborada por los registros de la central termoeléctrica]

Información adicional de soporte sobre los cálculos (\*, \*\*):

\* Tabla 4. CMO, CM y PE. Ejemplo - Modo de fallo 1. Generador. Ídem para modos de fallos 2 y 3.

Modo de fallo 1. Generador					
Costo de Mano de Obra					
Personal	Sueldo base	Valor de hora	N° de técnicos	TR	Total
Técnico	\$1.650,00	\$ 6,88	4	64	\$ 1.760,00
Misceláneo	\$1.100,00	\$ 4,58	4	64	\$ 1.173,33
Supervisor mtto	\$2.100,00	\$ 8,75	1	24	\$ 210,00
				total	\$ 3.143,33
Costos materiales (insumos para mtto.)					
Ítem	C/U	Cantidad	Total		
Polos nuevos	\$ 80.000,00	10	\$ 800.000,00		
Diodos	\$ 200,00	10	\$ 2.000,00		
Uniones interpolares	\$ 1.200,00	10	\$ 12.000,00		
		Total	\$ 814.000,00		
Penalización	Valor x kWh	Potencia efectiva	Tiempo F/L	Penalidad	
	0,04	7160	64	\$ 18.329,6	

\*\* Tabla 5. Cálculo de Riesgo Total Anual (RTA), \$/año. Ejemplo - Modo de Fallo 1. Ídem para modos de fallos 2 y 3.

Modo de fallo	Ran kin g	FF f/añ o	CMO \$	CM \$	CAR \$/año	T R	IP \$/h	PE \$	PAF \$/año	RTA \$/año
Generador	C	0,5	3.143,33	814.000	408.571,67	64	286,4 0	18.329,6 0	9.164,80	417.736,47

CAR - Costo anual de reparación = FF x (CMO + CM)

TR - Tiempo de reparación

IP - Impacto de producción

PE - Costo de penalización por modo de fallo = IP x TR

PAF - Penalización anual por modo de fallo = FF x PE

RTA - Riesgo total anual = CAR + PAF

Los costos y valores son referenciales para mantener confidencialidad de marcas.

#### 4. Definición y validación de hipótesis

Definida la criticidad de los modos de fallos, determinados sus costos de reparación y penalización de la producción, se procede a emitir las diferentes hipótesis sobre: ¿por qué ocurren los modos de fallos? Las que sean verificadas se convierten normalmente en la causa raíz del modo de fallo.

Tabla 6. Matriz de ACR Modo de fallo - definición y validación de hipótesis. Ejemplo - Modo de fallo 1.

Modo de fallo	#	Hipótesis: A (Alta probab.) B (Media probab.) C (Baja probab.)	Clasific. Hipótesis: Tipo A (Prob. Alta). Tipo B (Prob. Media) Tipo C (Prob. Baja)	Proceso de validacion. Responsable de validar
1. Generador	1,a	Conexiones internas de polos rota	C	Personal de mtto electrico inspecciona uniones interporales de los polos encontrando conexiones quemadas y otras flojas asi como los diodos rectificadores <b>(hipotesis confirmada)</b>
	1,b	Corto a tierra	B	Personal operador revisa puntos de coneccion a



				tierra sin encontrar evidencias, personal de mto electrico revisan protecciones <b>(hipotesis descartada)</b>
	1,c	Desgaste de barnis protector	C	Personal de mto electrico inspecciona cobertura de barnis de rotor y estator sin novedad <b>(hipotesis descartada)</b>
	1,d	Sobre corriente en sistema de entrega	A	Personal Operador y analista revisan protección y tendencias de voltaje y corriente dentro del sistema SCADA, personal de mto electrico revisan protecciones <b>(hipotesis descartada)</b>

Fuente: [propia elaborada por equipo de trabajo]

### 5. Definición de causas raíces físicas, humanas y latentes

Logrado identificar las hipótesis y validando los aspectos antes mencionados, se procede a definir las posibles causas raíces, tabla 7, para cada hipótesis confirmada, clasificándolas en tres posibles causas según (Latino et al., 2002).

Tabla 7. Matriz de ACR, determinación de las causas raíz.

Modo de fallo	Hipótesis:	Clasificac. Hipótes:	Proceso de validacion. Responsable de validar	#	Causas: Física (F), Humanas (H), Latentes (L)
Generador	Conexiones internas de polos rotas	C <b>(probab. Baja)</b>	Personal de mto inspecciona uniones interpolares de los polos encontrando conexiones quemadas y otras flojas, asi como los diodos rectificadores <b>(hipótesis confirmada)</b>	1,b,1	Se identifican uniones interpolares partidas, asi como diodos quemados y vbaroas uniones con permno flojos (F)
				1,b,2	Uniones interpolares rígidas con agretamientos en su parte superior (F)
				1,b,3	No se tenía procedimiento de revisión de polos dentro del manual, ni datos de tolerancia permible de vibración (L)
Turbocargador	Fisuras en carcasas	B	Personal de Operación verifica en tendencia	2,a,1	Estructura externa de carcasa sin refuerzo por mal diseño (F)

			sobrevoluciones de rpm del turbocargador Personal de mtto. inspecciona carcasas encontrando fisuras alrededor de la media luna lado turbina. <b>(hipótesis confirmada)</b>	2,a,2	Soportaría del ducto de escape soldada y rígida ante alta vibración genera agrietamiento (F)
				2,a,3	Falta de procedimiento de toma de vibraciones (L)
Autofiltro de LO atascado	Empeler de giro se encuentra flojo	C	Personal de mtto inspecciona empeler de giro del autofiltro y se encuentra sin un perno de sujeción, por lo que dejó de girar el filtro automático provocando saturación rápida <b>(hipótesis confirmada)</b>	3,a,1	Perno flojo de empeler (F)
				3,a,2	Falta de procedimiento para ajuste de perno (L)

Fuente: [propia elaborada por equipo de trabajo]

## 6. Identificación e implementación de las Recomendaciones

A continuación, tabla 8, se presenta a modo de ejemplo la identificación e implementación de las mejoras para el modo de fallo 1. Similarmente se procedió con los modos de fallo 2 y 3.

Tabla 8. Matriz de ACR identificación e implementación de las soluciones. Ejemplo - Modo de fallo 1.

Causas: físicas (F), humanas (H), latentes (L)	Se identifican uniones interpolares partidas, así como diodos quemados y varias uniones con pernos flojos (F)	Uniones interpolares rígidas con agrietamientos en su parte superior (F)	No se tenía procedimiento de revisión de polos dentro de manual, ni datos de tolerancia permisibles de vibración (L)
Recomendaciones	Compra e instalación de nuevos diodos y compra e instalación de nuevas uniones interpolares flexibles y tolerantes a la vibración ajustes con mayor torque		Modificación de los procesos preventivos aumentando a las órdenes de trabajo la revisión periódica de las uniones interpolares y su torque adecuado
Costos de la recomendación, \$	3.000,00		
Responsable	Gerencia general, Subgerencia de Producción, Jefatura de mtto. Supervisor de mtto.		
Escenario futuro después de la recomendación			
Frecuencia de eventos por año fallos/año (promedio)			0
TR horas (promedio)			64
Imp. Producción. \$/hora (promedio)			286,40
Costos directos por fallo \$/fallo (promedio)			817.143,33



Imp. SHA \$/fallo (promedio)	0
Riesgo \$/año (promedio)	0
N° de años de la recomendación	5
Costo anual de la recomendación, \$/año	600,00
Beneficio anual esperado por la recomendación, \$/año	417.136,47

Fuente: [propia elaborada por equipo de trabajo]

Después de aplicadas las recomendaciones, se realizó un ACRB, tabla 9, para poder calcular valores exactos y poder cuantificar el beneficio de la organización por la implementación de estas técnicas.

Tabla 9. Análisis comparativo de RTA antes y después en los costos.

MODO DE FALLO	Ran king	ACRB	FF f/a ño	CMO \$	CM \$	CAR \$/año	TR	IP \$/h	PE	PAF \$/año	RTA \$/año	Beneficio, (Después - Antes), \$
Avería en polos del generador	C	Antes	0,5	3.143,33	814.000,00	408.571,67	64	286,40	18.329,60	9.164,80	417.736,47	417.736,47
		Después	0	3.143,33	817.000,00	0,00	64	286,40	18.329,60	0,00	0,00	
Avería en turbocargador	C	Antes	0,5	5.510,00	114.300,00	59.905,00	24	286,40	6.873,60	3.436,80	63.341,80	36.565,08
		Después	0,2	5.510,00	121.500,00	25.402,00	24	286,40	6.873,60	1.374,72	26.776,72	
Autofiltro de LO atascado	SC	Antes	0,5	250,00	18.400,00	9.325,00	12	286,40	3.436,80	1.718,40	11.043,40	11.043,40
		Después	0	250,00	20.400,00	0,00	12	286,40	3.436,80	0,00	0,00	

Fuente: [propia elaborada con los registros y valores referenciales y cálculos basados a (Azpilcueta & Parra, 2017)]

## Discusión.

### Evaluación de la efectividad de las recomendaciones

Para concluir exitosamente el análisis hay que efectuar la comparación de los indicadores de gestión de mantenimiento, antes y después de las recomendaciones. Para lo cual se calcularon para cada modo de fallo, los siguientes indicadores con valores referenciales y cálculos basados a (Azpilcueta & Parra, 2017).

Ejemplo para el modo de fallo 1, antes:

$$\text{Confiabilidad TPO} = (1 / \text{FF}) * 365 \text{ Días} \quad (4)$$

$$\text{TPO} = (1 / 0.5) * 365 = 730,00$$

$$\text{Mantenibilidad TPFS} = \text{TR} / \#\text{fallos} \text{ h} \quad (5)$$

$$\text{TPFS} = 64 / 2 = 32$$

$$\text{Disponibilidad: } D = (\text{TPO} / (\text{TPO} + \text{TPFS})) * 100\% \quad (6)$$



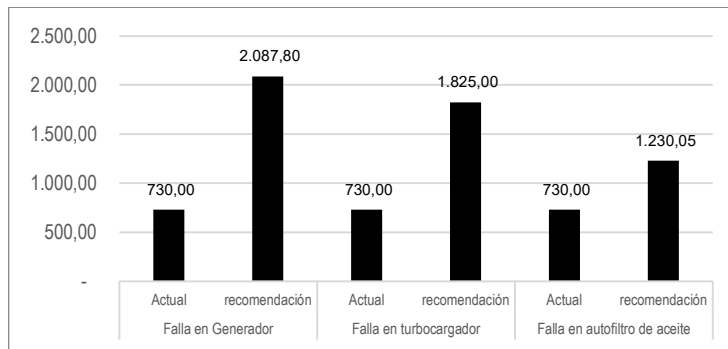
$$D = (730 / (730 + 32)) * 100\% = 95,80$$

$$\text{Costo de indisponibilidad CIF} = (\text{FF} * \text{TPFS} * \text{IP}) \quad \$ \quad (7)$$

$$\text{CIF} = 0,5 * 32 * 286,40 = \$4.582,40$$

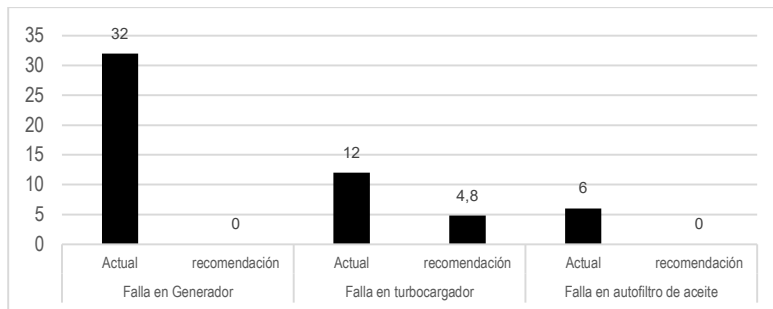
Los resultados de cada modo de fallo se muestran, de forma gráfica, en las figuras 3, 4, 5 y 6 respectivamente.

Figura 3. Índices de Confiabilidad, TPO, Días



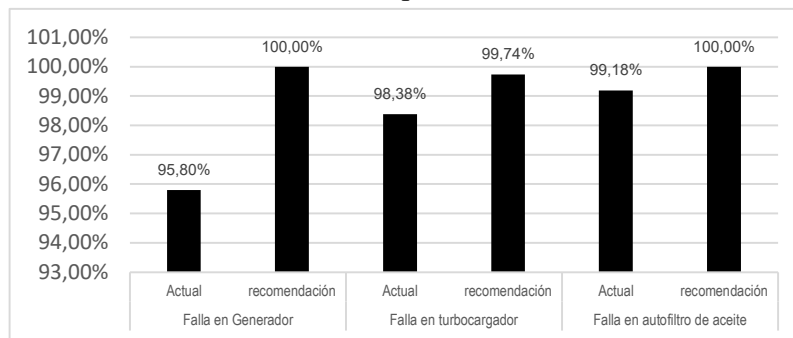
Fuente: [propia elaborada por equipo de trabajo]

Figura 4. Índices de Mantenibilidad, TPFS, h



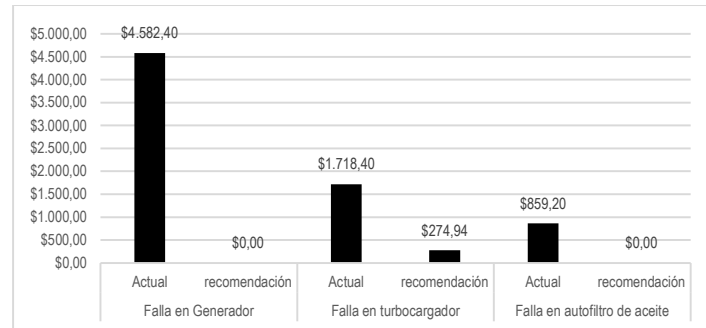
Fuente: [propia elaborada por equipo de trabajo]

5. Índices de Disponibilidad, D, %



Fuente: [propia elaborada por equipo de trabajo]

Figura 6. Costo de Indisponibilidad por Fallo; CIF, \$



Fuente: [propia elaborada por equipo de trabajo]

## Conclusiones

La aplicación del ACR permitió encontrar las causas fundamentales de los problemas del proceso de generación eléctrica de la central termoeléctrica - Corporación Eléctrica Ecuador y permitió identificar recomendaciones objetivas. Este tipo de análisis aborda las causas subyacentes de un problema en lugar de los síntomas superficiales. Los valores de Confiabilidad, Mantenibilidad, Disponibilidad y Costo por Indisponibilidad por Fallo, han sido mejorados significativamente, con lo cual el proceso de generación alcanzará mayor eficiencia técnica y económica.

## Referencias bibliográficas

- Amendola, L. J. D. d. P. d. I. U. P. d. V. (2003). Indicadores de confiabilidad propulsores en la gestión del mantenimiento.
- Arata, A. (2009). *Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales. Aplicación de la Plataforma R-MES*. Ril editores.
- Azpilcueta, J., & Parra, C. (2017). *Análisis Causa Raíz de Fallas (RCFA -Root Cause Failure Analysis)*. Caso de estudio: Sector Construcción.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21098.95688>
- Berroteran, A., García, A., Montero, N., & Rodríguez, A. (2021). Caso de estudio: Técnica de Análisis Causa Raíz (RCA. RISK. V1) y Riesgo aplicada en una línea de envasado de cerveza.
- Castro-Castro, J. D., & Cendales-Ladino, E. D. J. C. e. I. N. (2019). Casos aplicados del análisis de causa raíz: revisión. 29(1), 95-134.
- Catalán, J. P., & Aparisi, M. G. J. c. T. g. d. i. a. l. p. (2019). Análisis de causa raíz: Técnicas y relación con los sistemas de gestión y las no conformidades. 8(2), 84-97.
- Donoso, C., Ferrada, P., Delgado, C., Castillo, K., & Parra, C. (2022). *TRABAJO PROCEDIMIENTO DE ANALISIS RCA (ROOT CAUSE ANALYSIS)*. Diplomado

- Mantenimiento Industrial. UTFSM, Chile. Caso de estudio: Clipadora de doble clip marca POLYCLIP, modelo FCA100.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26474.59847>
- Freund, J. E. S., Gary A. (2000). *Estadística Elemental* (P. P. H. H. SA, Ed. 8va ed.).
- García Palencia, O. (2006). El mantenimiento general.
- Latino, R. J., Latino, M. A., Latino, R. J., Latino, K., & Latino, K. C. (2002). *Root Cause Analysis, Improving Performance for Bottom-Line Results, Second Edition.*  
<https://doi.org/10.1201/9781420040418>
- Parra, C., & Crespo Marquez, A. (2020). *Criticality Analysis Methods. Based on the Risk Assessment Process.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25392.17926>
- Rodríguez, J., Parra, C., Solís, D., López, M., López, M., & Parra, J. Técnica de Jerarquización de Activos MCCR: Matriz de Criticidad Cualitativa de Riesgo.
- Sepúlveda, I., Aravena, H., Guerrero, C., Grichting, A., & Parra, C. (2022). *Análisis Causa Raíz de Fallas (RCFA – Root Cause Failure Analysis). Caso de estudio: Sistema de bombas efluentes Fosa de Riles.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15659.52003/1>
- Taco, G., & Elena, D. (2019). Propuesta de mejora integral para la gestión eficiente de las cuentas del departamento de servicios internos en una financiera de la ciudad de Arequipa, periodo 2019.
- Valenzuela Toledo, N. I. (2021). *Metodología de análisis de criticidad de activos aplicado en planta de procesos para optimizar la productividad en minera Paicaví Universidad de Talca (Chile). Facultad de Ingeniería].*

**Conflicto de intereses:**

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

**Financiamiento:**

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

**Agradecimiento:**

Agradecimientos a todos los que formaron parte del estudio del artículo así como los instructores de la maestría en “gestión eficiente en mantenimiento” de la facultad de posgrado de la Universidad Técnica de Manabí

**Nota:**

El artículo no es producto de una publicación anterior.