UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIA

ANÁLISIS CAUSA RAÍZ APLICADO A FALLAS EN EQUIPOS CRÍTICOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

AUTOR

MITCHELL CRISTIAN ZÚÑIGA POZO

PROFESOR GUÍA

RODRIGO DEMARCO B

PROFESOR CORREFERENTE

MÓNICA LÓPEZ

VALPARAÍSO, 21 DE JULIO DE 2016

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIA

ANÁLISIS CAUSA RAÍZ APLICADO A FALLAS EN EQUIPOS CRÍTICOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

AUTOR

MITCHELL CRISTIAN ZÚÑIGA POZO

PROFESOR GUÍA

RODRIGO DEMARCO B

PROFESOR CORREFERENTE

MÓNICA LÓPEZ

VALPARAÍSO, 21 DE JULIO DE 2016

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haber tenido la oportunidad de vivir hasta estas instancias y ver como mi esfuerzo, dedicación y perseverancia dan sus frutos.

A mi esposa Margarita por haber tenido la paciencia para soportar todos estos años donde las horas de estudio dedicadas fueron en desmedro de nuestra vida familiar, lo bueno que siempre tuvo la convicción que la meta al final borra todo mal recuerdo.

A mi hija Laura que pese a sus cortos tres años ya entendía que tenía que dejar a su padre estudiar y que todo en la vida tiene su tiempo.

A mis padres Jorge y Raquel por lo bien que me criaron, pese a todas las falencias que teníamos siempre trataron de dar lo mejor.

RESUMEN

En la siguiente memoria se describen los pasos para investigar fallas catalogadas como críticas en la industria utilizando la metodología de Análisis Causa Raíz (ACR). El beneficio de ocupar esta metodología principalmente es la minimización de los costos de mantenimiento a largo plazo. Además se muestran las planillas EXCEL mínimas que se deben confeccionar para llevar una correcta y eficiente gestión a la hora de abordar una investigación. La gestión de ACR se basa en control de HH de reuniones, gestión documental de hallazgos encontrados, gestión de tareas, gestión de costos, etc. Se investigan dos falla reales ocurridas en Termoeléctrica Nehuenco bajo la metodología ACR, obteniendo como resultado acciones correctivas y acciones de mejora continua que eliminan el problema de raíz y asegurar que este modo de fallo no volverá a ocurrir.

ABSTRACT

The following report describes the steps to investigate failures listed as critical in the industry using the methodology Root Cause Analysis (RCA). The benefit of taking this approach is mainly minimizing maintenance costs in the long term. In addition the minimum EXCEL spreadsheets that must be prepared for a correct and efficient management when addressing research are presented. ACR management control is based on meeting man hours, findings document management, task management, cost management, etc.

Two real failure occurred in Thermoelectric Nehuenco under the ACR methodology are investigated, resulting in corrective actions and continuous improvement actions that eliminate the root problem and ensure that this failure mode will not happen again.

A mí Querida esposa e
hija por todo su esfuerzo
y dedicación.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS ..... **I**

RESUMEN ..... **II**

ABSTRACT ..... **III**

INDICE DE TABLAS ..... **VI**

INDICE DE FIGURAS ..... **VII**

1. INTRODUCCION **1**

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA **3**

3. OBJETIVOS **5**

3.1. Objetivo General 5
3.2. Objetivos Específicos 5

4. MARCO TEÓRICO **6**

4.1. Antecedentes de la Investigación 6
4.2. Análisis Causa Raíz (ACR) 9
4.2.1. Estructura organizacional de ACR *10*
4.2.2. Sistema de gestión de ACR *13*
4.2.3. Análisis del grado criticidad de fallas *15*
4.2.4. Actividades preliminares *19*
4.2.5. Recolección de datos e informaciones (evidencias) *20*
4.2.6. Análisis de datos y determinación de Causa Raíz *26*
4.2.7. Elección de acciones correctivas *28*
4.2.8. Verificación de la efectividad *34*
4.2.9. Comunicación *35*

5. ESTUDIO DE CASOS REALES **37**

5.1. Alta Vibración Cojinetes Alta Presión Turbina a Vapor Nehuenco 2 37
5.1.1. Descripción del problema *38*
5.1.2. Análisis del grado de criticidad del problema *39*
5.1.3. Recolección de evidencias *41*
5.1.4. Medida de contención *41*
5.1.5. Causa Raíz *42*
5.1.6. Acciones correctivas propuestas *46*
5.1.7. Acciones de mejora continua *46*
5.1.8. Resumen línea de tiempo *47*
5.1.9. Análisis de costos *48*
5.2. Falla Válvula Control de Nivel Domo Media Presión Nehuenco 1 54
5.2.1. Descripción del problema *55*
5.2.2. Análisis del grado de criticidad del problema *56*
5.2.3. Recolección de evidencias *56*
5.2.4. Medida de contención *58*
5.2.5. Causa Raíz *59*
5.2.6. Acciones correctivas propuestas *61*
5.2.7. Acciones de mejora continua *61*
5.2.8. Resumen línea de tiempo *62*
5.2.9. Análisis de costos *63*

6. CONCLUSIONES **68**

7. REFERENCIAS **69**

INDICE DE TABLAS

TABLA 1: COSTO MARGINAL DE PLANTA POR TIPO DE COMBUSTIBLE..... 7
TABLA 2: ÍNDICE DE GRAVEDAD 17
TABLA 3: ÍNDICE DE PROBABILIDAD 17
TABLA 4: FACTORES DE CAUSAS BÁSICAS..... 33
TABLA 5: ÍNDICE DE GRAVEDAD 40
TABLA 6: ACCIONES CORRECTIVAS PROPUESTAS..... 46
TABLA 7: ACCIONES DE MEJORA CONTINUA. 46
TABLA 8: PERDIDAS POR LUCRO CESANTE UNIDAD BLANCO..... 50
TABLA 9: TABLA RESUMEN RECONSTRUCCIÓN UNIDAD BLANCO..... 50
TABLA 10: COSTOS ASOCIADOS A MANO DE OBRA..... 51
TABLA 11: CUADRO DE COSTO POR CARGO..... 51
TABLA 12: HORAS-HOMBRES DESTINADAS A RECOLECTAR EVIDENCIA. 52
TABLA 13: CANTIDAD DE HORAS Y REUNIÓN REALIZADAS. 52
TABLA 14: COSTO TOTAL REUNIONES Y BÚSQUEDA DE EVIDENCIAS PARA ACR..... 52
TABLA 15: RESUMEN PÉRDIDA POR FALLA COJINETE DE HP. 53
TABLA 16: ACCIONES CORRECTIVAS..... 61
TABLA 17: ACCIONES DE MEJORA CONTINUA. 62
TABLA 18: CÁLCULOS POR PÉRDIDA DE INDISPONIBILIDAD DE PLANTA..... 64
TABLA 19: COSTO REPARACIÓN DE VÁLVULA..... 65
TABLA 20: COSTO MANO DE OBRA (REPARACIÓN VÁLVULA)..... 65
TABLA 21: HORAS-HOMBRES DESTINADAS A RECOLECTAR EVIDENCIA. 66
TABLA 22: CANTIDAD DE HORAS Y REUNIÓN REALIZADAS. 66
TABLA 23: COSTO TOTAL REUNIONES Y BÚSQUEDA DE EVIDENCIAS PARA ACR..... 67

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: DESCOMPOSICIÓN DE COSTOS GLOBALES. 4
FIGURA 2: COSTOS DE INEFICIENCIA NEHUENCO 1. 8
FIGURA 3: COSTOS DE INEFICIENCIA NEHUENCO 2. 8
FIGURA 4: VENTAJAS DEL TRABAJO EN EQUIPO. 11
FIGURA 5: DESVENTAJAS DEL TRABAJO EN EQUIPO. 11
FIGURA 6: ORGANIGRAMA ACR. 12
FIGURA 7: PLANILLA CONTROL DE GESTIÓN DE ACR. 14
FIGURA 8: PLANILLA CONTROL DE TAREAS. 15
FIGURA 9: DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN DE FALLAS. 16
FIGURA 10: MATRIZ DE CRITICIDAD. 18
FIGURA 11: DIAGRAMA DE FLUJO DE ACR. 19
FIGURA 12: SET DE PREGUNTAR PARA ORIENTAR LA BUSQUE DE EVIDENCIA 21
FIGURA 13: ASIGNACIÓN DE TAREAS 21
FIGURA 14: PATRONES MÁS COMUNES EN TÉCNICAS DE PREDICCIÓN 23
FIGURA 15: DIAGRAMA CAUSA-EFECTO 27
FIGURA16: PERSPECTIVA TRADICIONAL DE FALLA 28
FIGURA 17: SEIS PATRONES DE FALLA 29
FIGURA 18: TIPOS DE RESISTENCIA AL ESFUERZO 31
FIGURA 19: SECUENCIA CAUSAL 33
FIGURA 20: DIAGRAMA DE DECISIONES DE EFECTIVIDAD DE ACCIÓN CORRECTIVA 34
FIGURA 21: TEMPERATURAS COJINETES TURBINA A VAPOR. 37
FIGURA 22: VIBRACIONES COJINETES TURBINA A VAPOR. 38
FIGURA 23: ALARMA POR ALTA VIBRACIÓN COJINETE HP. 38
FIGURA 24: TENDENCIA DE VIBRACIONES EN COJINETE HP. 39
FIGURA 25: EFECTOS DEL CAMBIO DE CONSIGNA DE TOMA DE CARGA. 42
FIGURA 26: HALLAZGOS ENCONTRADOS EN COJINETES. 44
FIGURA 27: DIAGRAMA CAUSA-EFECTO. 45
FIGURA 28: LÍNEA DE TIEMPO. 47
FIGURA 29: REGISTRO DE DAÑOS EN UNIDAD BLANCO. 48
FIGURA 30: GENERACIÓN ANUAL. 49
FIGURA 31: EVOLUCIÓN COSTO MARGINAL BARRA QUILLOTA. 49
FIGURA 32: DIAGRAMA DE PROCESO DOMO MEDIA PRESIÓN. 54
FIGURA 33: EVENTOS DE FALLA. 55
FIGURA 34: GRÁFICO CONTROL DE NIVEL DE DOMO MEDIA PRESIÓN. 55
FIGURA 35: COMPORTAMIENTO POSICIÓN DE VÁLVULA EN MÍNIMO TÉCNICO. 56
FIGURA 36: COMPORTAMIENTO POSICIÓN DE VÁLVULA EN CARGA BASE. 57
FIGURA 37: INSPECCIÓN DE CANASTILLO Y OBTURADOR DE VÁLVULA AGUA DE ALIMENTACIÓN. 58
FIGURA 38: COMPORTAMIENTO POSICIÓN DE LA VÁLVULA DURANTE ARRANQUE DE UNIDAD. 59
FIGURA 39: DIAGRAMA CAUSA-EFECTO 60
FIGURA 40: EROSIÓN POR CAVITACIÓN 60
FIGURA 41: LÍNEA DE TIEMPO 63
FIGURA 40: CANASTILLO LABERÍNTICO 67

1. INTRODUCCION

A principio de los años 50 el personal de mantenimiento se dedicaba solo a realizar mantenimiento correctivo, donde la consigna para el personal de mantenimiento era cambiar el elemento defectuoso de la máquina donde se había detectado la falla y entregar lo más prontamente posible la máquina a la línea de producción. En ese entonces todas las felicitaciones de la gerencia a sus subalternos se basaban en minimizar los tiempos de reparación.

En la actualidad yo no basta con realizar este tipo de mantenimiento, la consigna cambió a eliminar de raíz la causa de la falla. No basta con cambiar el elemento que falló, si no que plantearse interrogantes que apunten a descubrir por qué falló.

El hecho de realizar Análisis Causa Raíz trae como beneficio erradicar la falla y beneficios económicos a largo plazo.

En la literatura se habla mucho del método Análisis Causa Raíz (ACR), pero no se habla de los secretos para llegar a obtener un análisis de calidad, conceptos como trabajo en equipo, liderazgo, motivación, análisis de tendencias, etc., toman fuerza para lograr un resultado óptimo. La implementación de este análisis requiere de experiencia y conocer en profundidad el funcionamiento de los diferentes componentes, además de contar con un equipo multidisciplinario que permita analizar desde distintos ángulos la información disponible.

Las personas que se enfrentan a este tipo de análisis sienten la necesidad natural de gestionar los ACR, pero las herramientas de gestión son escazas y poco desarrolladas. Es por este motivo que en esta memoria se presentan dos ejemplos reales donde se presentan herramientas para la gestión de ACR utilizando el software EXCEL.

A modo de ejemplo se presenta la aplicación de dos ACR reales aplicados a una planta termoeléctrica actualmente en funcionamiento, poniendo en evidencia el gran impacto que representa esta forma de gestionar algunos elementos críticos en el funcionamiento de la planta. Estos ejemplos son Falla alta vibración cojinetes alta presión turbina a vapor y Falla en válvula de agua de alimentación domo de media presión caldera.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Colbún S.A. tiene por objeto producir, transportar, distribuir y suministrar energía eléctrica, pudiendo para tales efectos obtener, adquirir y explotar concesiones y servirse de las mercedes o derechos que obtenga. Asimismo, está facultada para transportar, distribuir, suministrar y comercializar gas natural para su venta a grandes procesos industriales o de generación. Adicionalmente, la compañía está facultada para prestar asesorías en el campo de la ingeniería, tanto en el país como en el extranjero.

El mercado en el que participa Colbún S.A. está compuesto por clientes regulados, para los cuales el precio es fijado semestralmente mediante decreto del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción (precios de nudo), y por clientes libres. Los clientes libres son aquellos con consumos con una potencia conectada superior a 2.000 kW, los cuales deben convenir libremente sus precios con sus proveedores. La ley N° 19.940, publicada el 13 de marzo de 2004, con el objetivo de ampliar el mercado de los clientes libres, facultó a los usuarios de potencia conectada entre 500 kW y 2000 kW, antes sólo sujetos a precios fijados, a continuar con su régimen de tarifa regulada u optar por precios libres, con un período mínimo de cuatro años de permanencia en cada régimen.

La empresa transa su energía y potencia en el mercado spot formado por los generadores del SIC, a costo marginal y precio nudo respectivamente. La zona en que Colbún S.A. actúa comercialmente corresponde a la que abarca el Sistema Interconectado Central (SIC), desde Taltal por el norte hasta la Isla Grande de Chiloé por el sur.

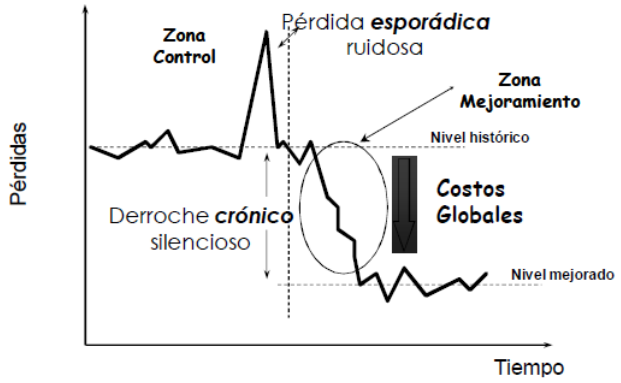
Colbún S.A. comercializa su energía y potencia en el Sistema Interconectado Central (SIC) conforme a las disposiciones de la Ley Eléctrica (DFL Nº 1/82 de Minería) y su Reglamento. El desarrollo más reciente de este marco regulatorio lo constituye la Ley N° 20.018, denominada Ley Corta II, publicada en el Diario Oficial del 19 de mayo de 2005, que junto con la Ley Corta I, constituyen las bases para lograr un desarrollo armónico del sector generación de electricidad.

A Continuación se dan a conocer las centrales termoeléctricas de Complejo Nehuenco que pertenecen a Colbún S.A.

- Nehuenco 1: Ciclo Combinado, potencia instalada 360 MW
- Nehuenco 2: Ciclo Combinado, potencia instalada 385 MW
- Nehuenco 3: Ciclo abierto de 108 MW

Los costos asociados a una mala gestión de mantención se deben a problemas tantos esporádicos como crónicos. Se habla de problema esporádico cuando ocurre un cambio adverso repentino en el proceso, que requiere un remedio mediante la restauración del mismo. A su vez, un problema crónico es una situación adversa constante (tan estable que incluso puede pasar "desapercibida"), que requiere remedio mediante el cambio del proceso (Arata & Furlanetto, 2005).

Figura 1: Descomposición de Costos Globales.
(Fuente: Arata & Furlanetto, 2005)



El complejo termoeléctrico Nehuenco, no está ajeno a esta realidad, sus altos costos asociados a pérdidas esporádicas, sumados a una inexisten gestión en el ámbito de la mejora continua hacen necesario investigar y desarrollar metodologías que contribuyan a mejorar los costos globales.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Generar una mejora continua y la disminución de costos globales a través de la aplicación de la metodología de Análisis Causa Raíz a dos fallas reales ocurridas en el complejo Termoeléctrico Nehuenco.

3.2. Objetivos Específicos

- Confeccionar un sistema de gestión que permita llevar un control de costos y HH de reuniones del ACR.
- Eliminar, a través de la metodología de ACR, las pérdidas esporádicas ruidosas que suceden a lo largo del ciclo de vida de la planta.
- Mostrar como el Análisis Causa Raíz contribuye a bajar los niveles de derroche económicos crónicos.
- Demostrar, a través de análisis de costo, la conveniencia de realizar Análisis Causa Raíz.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Antecedentes de la Investigación

Para poder visualizar cual es el verdadero aporte del Análisis Causa Raíz, es necesario calcular los costos de ineficiencia ocurrido en un periodo de tiempo determinado, este periodo de tiempo será el 2015.

El costo de ineficiencia está dado por el costo asociado a la indisponibilidad de la instalación durante el periodo de evaluación (Arata & Furlanetto, 2005).

El costo de ineficiencia se calcula de la siguiente forma:

$$CI = Ci * H_{Ind.} * P \tag{4-1}$$

Donde:

CI: Costo de Ineficiencia

Ci: Costo de ineficiencia horario

$H_{Ind.}$: Horas indisponibles atribuibles a fallas que ocasionan detención de máquina.

P: Potencia instalada en cada Ciclo Combinado.

<u>Calculo del costo de ineficiencia horario (Ci)</u>

El cálculo del costo de ineficiencia horario está dado por:

$$Ci = C_{mg}(t) - C_{mg\ planta} \tag{4-2}$$

El costo marginal ($C_{mg}(t)$) es el precio a utilizar en la valorización de transferencias de energía entre empresas generadoras. Su unidad de cálculo es en dólares por Mega Watt por hora (USD/MWh).

El costo marginal de planta (($C_{mg\ planta}$), significa el costo de producir por la planta 1 MWh, el principal componente de este costo es el costo del combustible. La tabla 1 muestra los costos marginales asociados a cada planta.

Tabla 1: Costo marginal de planta por tipo de combustible
(Fuente: www.cdec-sic.cl)

Planta	Cmg Petróleo (USD/MWh)	Cmg GNL (USD/MWh)
Nehuenco 1	133,7	81,3
Nehuenco 2	133,5	74,4
Nehuenco 3	251,3	-

El 2015 las máquinas del complejo Nehuenco estuvieron en operación con combustible GNL.

Para dimensionar los efectos adversos en los ingresos operacionales de Colbún S.A., es necesario realizar el siguiente cálculo.

Supuesto: Falla de CC Nehuenco 1, 2 horas de indisponibilidad, fecha 28/05/2015, Ciclo Combinado a plena carga.

Ci = Cmg (t) – Cmg planta

Ci = 187,5 (28 mayo 2015) – 81,3

Ci = 106,5 [USD/MWh]

CI = Ci * Hdisp. * P

CI = 106,5 * 2 * 360

CI = 76680 USD

Las pérdidas por una falla que indispone la planta 2 horas, ascienden a 76.680 USD, es por este motivo que se necesita constar con una metodología que asegure que las fallas no vuelvan a ocurrir.

La figura 2 y figura 3 muestran los costos de ineficiencia promedios diarios por hora.

Figura 2: Costos de Ineficiencia Nehuenco 1.
(Fuente: Elaboración propia, fuente de datos www.cdec-sic.cl)

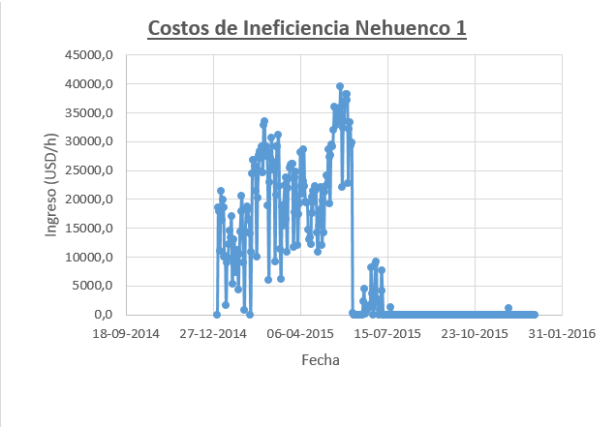
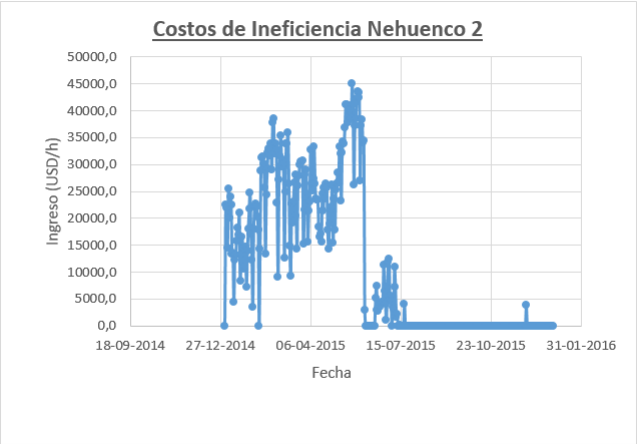


Figura 3: Costos de Ineficiencia Nehuenco 2.
(Fuente: Elaboración propia, fuente de datos www.cdec-sic.cl)



Se puede visualizar que existen periodos de tiempos más críticos que otros, donde las pérdidas por alguna falla determinada podrían llegar a ser cuantiosas. Además existen otras variables que perjudican aún más los ingresos, estos son:

- Contratos por suministros de GNL llamados “take or pay” que son tipos de contrato donde el suministro de GNL se paga independiente si se consumen o no.
- Contrato de suministros con clientes no regulados, son empresa que tienen un consumo mayor a 1 MW.

- Cobertura de costos fijo.

4.2. Análisis Causa Raíz (ACR)

Encontrar la causa real del problema que tiende a ocurrir de forma repetida y tratar con ella en lugar de simplemente seguir para hacer frente a los síntomas se llama Análisis Causa Raíz. El ACR es un método paso a paso utilizado para analizar los fallos y problemas a su causa raíz. Cada fallo del equipo pasa por una serie de razones. Hay una progresión definitiva de las acciones y consecuencias que conducen a un fracaso. Una investigación ACR une la causa y el efecto final con el fin de determinar lo que sucedió, por qué sucedió y lo más importante averiguar qué hacer para reducir la probabilidad de que vuelva a suceder (Ben-Daya & Duffuaa, 2009).
Existen 3 etapas previas que se deben cumplir para empezar a trabajar en un ACR, estas son:

- Tener una estructura organizacional de ACR
- Confeccionar un sistema de gestión de ACR
- Realizar el análisis de criticidad de fallas

Una vez cumplidas las etapas anteriores, se da inicio a la investigación de ACR, Las 4 etapas que conforman un ACR son las siguientes:

- Actividades preliminares
- Recolección de datos e informaciones (hallazgos)
- Análisis de datos y determinación de Causa Raíz
- Elección de acciones correctivas
- Verificación de la efectividad
- Comunicación

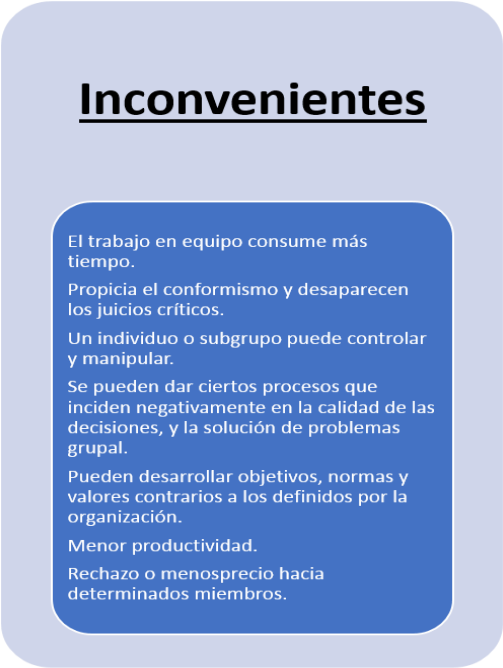
4.2.1. *Estructura organizacional de ACR*

Son múltiples las investigaciones que se han desarrollado para analizar las consecuencias para las organizaciones, y para los individuos, de la implementación de los sistemas de trabajo en equipo. Por ejemplo, se ha comprobado que la participación conjunta de superiores y colaboradores en el planteamiento de los objetivos y en la interpretación y análisis de resultado, hace que las decisiones sean mejor comprendidas, aceptadas y llevadas a la práctica. Por otro lado, cuando las personas se comprometen a actuar de una manera determinada, su decisión se ve fortalecida por el conocimiento de que los demás están comprometidos de una manera similar. Una de las más poderosas fuerzas motivadoras de los individuos, es sentirse respetados y apoyados por los integrantes del grupo al que consideran importante pertenecer y mantener su posición dentro de él. Este aspecto es uno de los más importantes a la hora de explicar la superioridad de la acción del grupo sobre la individual, mostrándose más productivo y creativo que cuando sus miembros trabajan de forma aislada; es decir es superior a la suma de las contribuciones de sus componentes (Palomo Vadillo, 2013). La figura 4 muestra las ventajas del trabajo en equipo tanto para la organización y para el individuo.

Sin embargo, los grupos también pueden plantear problemas, que todo coordinador debe conocer para poder prevenirlos o en su caso afrontarlos eficazmente. La figura 5 muestra los principales inconvenientes del trabajo en equipo.

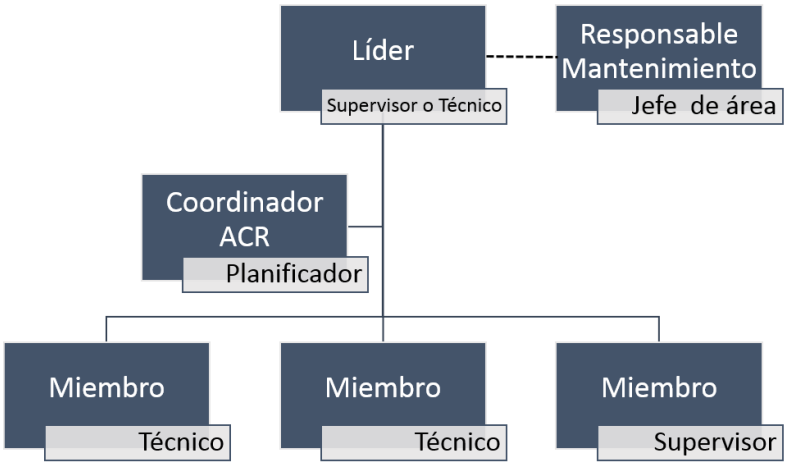
Figura 4: Ventajas del trabajo en equipo.
(Fuente: Palomo Vadillo, 2013)

Figura 5: Desventajas del trabajo en equipo.
(Fuente: Palomo Vadillo, 2013)



Una parte fundamental de los análisis causa raíz es el trabajo en equipo, el equipo de trabajo funciona como una célula independiente de la organización. Es fundamental que se entienda esto, ya que muchas veces los miembros del grupo son personas con mayor jerarquía en la organización pero no necesariamente son los líderes de los ACR's. La figura 6 muestra el organigrama típico de un equipo ACR.

Figura 6: Organigrama ACR.
(Fuente: Elaboración propia)



Las responsabilidades de los integrantes del equipo son las siguientes:

<u>Responsable de Mantenimiento:</u>

- Definir la aplicación de un ACR a alguna de las fallas reportadas, aplicando la matriz de criticidad. Además debe justificar por qué no es necesario realizar un ACR.
- Debe realizar un seguimiento a las recomendaciones sobre el mantenimiento incluidas en el informe final del ACR.

<u>Coordinador de ACR:</u>

- Designar al líder de ACR, debe actuar como facilitador en un análisis.
- Conformar el grupo ACR.
- Debe gestionar los recursos (internos o externos) para la realización del ACR.
- Monitorear la evolución del equipo.

- Gestionar con el responsable de mantenimiento la aprobación de las acciones propuestas por el grupo.
- Realizar el seguimiento de las acciones y asegurar su implementación.
- Realizar la comunicación y difusión del proceso de ACR.

Líder:

- Una vez conformado el equipo de ACR, deberá convocar a la brevedad a los integrantes para el inicio del ACR.
- Asegurar el cumplimiento de los tiempos y acciones programadas.
- Realizar el informe de cierre.
- Liderar la investigación proponiendo tareas, asignado responsables y coordinar fechas de entrega de tareas.
- Moderar las discusiones que se puedan originar al momento de analizar las evidencias.

Miembro:

- Participar activamente en las reuniones de ACR.
- Proponer acciones y mejoras.
- Analizar las evidencias encontradas e inferir posibles modos de fallo.
- Realizar algún tipo de análisis que aporte al descubrimiento de la falla (tendencias, análisis estadístico, toma de datos operacionales, etc.)

4.2.2. *Sistema de gestión de ACR*

El Análisis Causa Raíz debe ser registrado y documentado en una base de datos creada para tal efecto, la base de datos puede ser un sistema sofisticado (ejemplo: ORACLE) o un sistema sencillo (ejemplo: planillas Excel). La idea es llevar un control de la cantidad de ACR que se están investigando, el estado de estos, y cualquier indicador que sirva para la gestión de los ACR, la figura 7 muestra un ejemplo de una planilla básica donde se lleva información tal como:

Figura 7: Planilla control de gestión de ACR.
(Fuente: Elaboración propia)

A	B	C	D	E	F	G	H	I
SISTEMA DE GESTIÓN DE ACR AREA CALIDAD Y MANTENIMIENTO TAREAS ANÁLISIS CAUSA RAÍZ								
INDICADORES GENERALES DEL ÁREA								
DEFINICIONES					ESTADO DE ACR´s			
CONCLUIDO: ACR terminado, plan de acción concluido.					**ACR CONCLUIDOS:**			6
PRIMERA FASE TERMINADA: ACR terminado, plan de acción en ejecución.					**ACR PRIMERA FASE TERMINADA:**			7
EN EJECUCION: ACR en etapa de desarrollo, sin plan de acción.					**ACR EN EJECUCIÓN:**			9
PENDIENTE: ACR sin empezar					**ACR PENDIENTE:**			6
					TOTAL:			**28**
Número	**Nombre de ACR**	**Unidad**	**Condición**	**Impacto Disponibilidad**	**Gravedad**	**Probabilidad**	**Criticidad**	**Aviso de falla**

Estado de ACR: Indica las distintas fases en que está el análisis de un ACR determinado, sirve para llevar KPI por el estado de los avances.

Número: Número correlativo de ACR.

Nombre de ACR: Indicación de la falla.

Unidad: Complejo termoeléctrico al cual pertenece el ACR.

Condición: Es el estado del ACR.

Impacto disponibilidad: Significa si la falla ocasionó una salida intempestiva de la unidad.

Gravedad: índice que indica el nivel de impacto de indisponibilidad.

Probabilidad: es la probabilidad de ocurrencia de la falla.

Criticidad: índice de nivel de criticidad.

Cuando se realiza una investigación de ACR, se generan tareas que deben tener una persona responsable y un plazo de ejecución. Esto implica que se debe generar una planilla de control de tareas. Es responsabilidad del coordinador de ACR velar por el cumplimiento de estas tareas, que se cumplan los plazos de ejecución, que se carguen las evidencias en las rutas designadas para la investigación, etc.

La figura 8 muestra un ejemplo de lo descrito.

Figura 8: Planilla control de tareas.
(Fuente: Elaboración propia)

SISTEMA DE GESTIÓN DE ACR
AREA CALIDAD Y MANTENIMIENTO
TAREAS ANÁLISIS CAUSA RAÍZ

COLABORADOR: Fabián Rodríguez
CARGO: Supervisor P&C

Estado			Condición Operacional		Condición		
Pendiente	1	50,0%	En Servicio	2	Atrasadas	1	50,0%
En Progreso	0		Fuera de Servicio	0	OK	1	50,0%
Concluido	1	50,0%	Mantenimiento	0	Total	2	100,0%
Total	2	100,0%	Total	2			

ACR Número	Tarea	Observación	Link a Tarea	Fecha Termino	Condición	Estado	Condición Oper.
10026399	Estandarizar en SAP sistema hidráulico y sistema de lubricación	Realizar levantamiento de equipos en terreno y cargar en SAP. Mejorar estrategia de mantenimiento	Link a Tarea	31-07-2015	OK	Concluido	ES
10029070	Revisar plan de mantenimiento	Revisar plan de mantenimiento, ya que el actual presenta deficiencias y ambiguo. Además se deben homologar las tareas al sistema de excitación TG.	Link a Tarea	30-09-2015	Atrasada	Pendiente	ES

ACR Número: Número de ACR correlativo.

Tarea: Nombre de la tarea asignada al miembro del equipo.

Observación: Campo donde se describe detalladamente los requerimientos de la tarea.

Link Tarea: Dirección donde queda almacenada la tarea y donde quedan guardadas las evidencias o documentos de la tarea.

Fecha de Término: Fecha acordada para terminar tarea.

Condición: Cálculo para determina si tarea se encuentra atrasada.

Estado: Describe si la tarea está concluida o pendiente.

Condición operacional: Necesidad del ejecutor de la tarea para llevarla a cabo con máquina detenida o no.

Existen algunos indicadores como ESTADO, CONDICIÓN OPERACIONAL y CONDICIÓN que sirven para llevar un control de la gestión de las tareas por parte del ejecutor.

Es muy importante que el coordinador de ACR almacene estas planillas en una ruta acordada con el responsable de mantenimiento (PC o Servidor corporativo). La idea es contar con sistema de almacenamiento donde puedan acceder todos los miembros de la organización y puedan chequear el estado de las investigaciones, los resultados de los ACR, las acciones correctivas tomadas, las tareas de mejora continua, etc.

4.2.3. *Análisis del grado criticidad de fallas*

Antes de analizar el grado de criticidad de las fallas, éstas se deben clasificar para poder evocar los esfuerzos en determinado grupo de fallas. La clasificación es la siguiente:

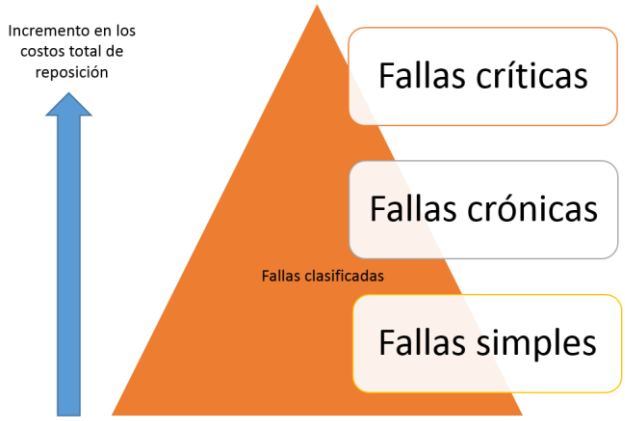
Fallas simples: Son un grupo de fallas que afectan las instalaciones, pero que no afectan la disponibilidad y confiabilidad. Ejemplo: falla de un equipo de alumbrado.

Fallas crónicas: Fallas que tienen una alta frecuencia de ocurrencia pero con un bajo impacto. Ejemplo: falla de sellos en bomba en configuración paralela.

Fallas críticas: Falla que genera pérdida de la función de una instalación afectando de forma inmediata o potencial la producción. Ejemplo: falla de turbina a gas.

La figura 9 representa la distribución de las falla dependiendo del costo total de reposición (costos de reparación, pérdidas de producción, multas, etc.)

Figura 9: Diagrama de distribución de fallas.
(Fuente: Elaboración propia)



El indicador de grado criticidad (que debe atribuirse a la forma de fallo) nos permite definir los criterios de prioridad de intervención; las señales débiles proporcionan indicaciones para activar los planes de inspección, las razones para el fracaso sugieren la intervención de mejora (Fedele, 2011).

Se debe tener en cuenta que los ACR tiene un costo, ya que al reunir el equipo de trabajo se dejan de lado actividades del mantenimiento. Es por esta razón que es necesario fabricar un índice de grado criticidad que nos guiará para enfocar nuestros esfuerzos en analizar las fallas críticas que tengan una mayor ponderación. Es muy importante tener en cuenta que no se deben analizar fallas cuya solución sea menos

costosa (ponderación baja) que lo que cuesta reunir el grupo de trabajo (HH según cargo) y las tareas de mantenimiento que se dejan de realizar.

El índice de criticidad se calcula de la siguiente forma:

Índice de Criticidad = Gravedad x Probabilidad

Donde la gravedad está definida por la tabla 2.

Tabla 2: Índice de gravedad
(Fuente: elaboración propia)

Índice de Gravedad	***Gravedad del problema***
5	Muy grave
4	Grave
3	Medianamente grave
2	Leve
1	Muy leve

Cabe destacar que cada usuario debe dar una ponderación a la gravedad del problema. Ejemplo: Muy grave, falla catastrófica, pérdidas por USD mayores a 100.000, etc.

Donde la probabilidad está definida por la tabla 3.

Tabla 3: Índice de probabilidad
(Fuente: elaboración propia)

Índice de Probabilidad	***Probabilidad de reincidencia***
5	Casi certeza
4	Probable

3	Moderado
2	Improbable
1	Muy improbable

Cabe destacar que existen muchas formas de calcular este índice, pero como recomendación se puede realizar de dos formas.

- Cuantificar la frecuencia de falla utilizando los software de gestión del mantenimiento que se disponga (SAP, MAXIMO, etc.)
- Consultar a personal que tenga una antigüedad considerable en planta.

Al multiplicar el índice de gravedad y probabilidad se obtiene como resultado la matriz de criticidad, ver figura 10. El índice de criticidad se lleva como indicador en la planilla control de gestión de ACR (figura 4).

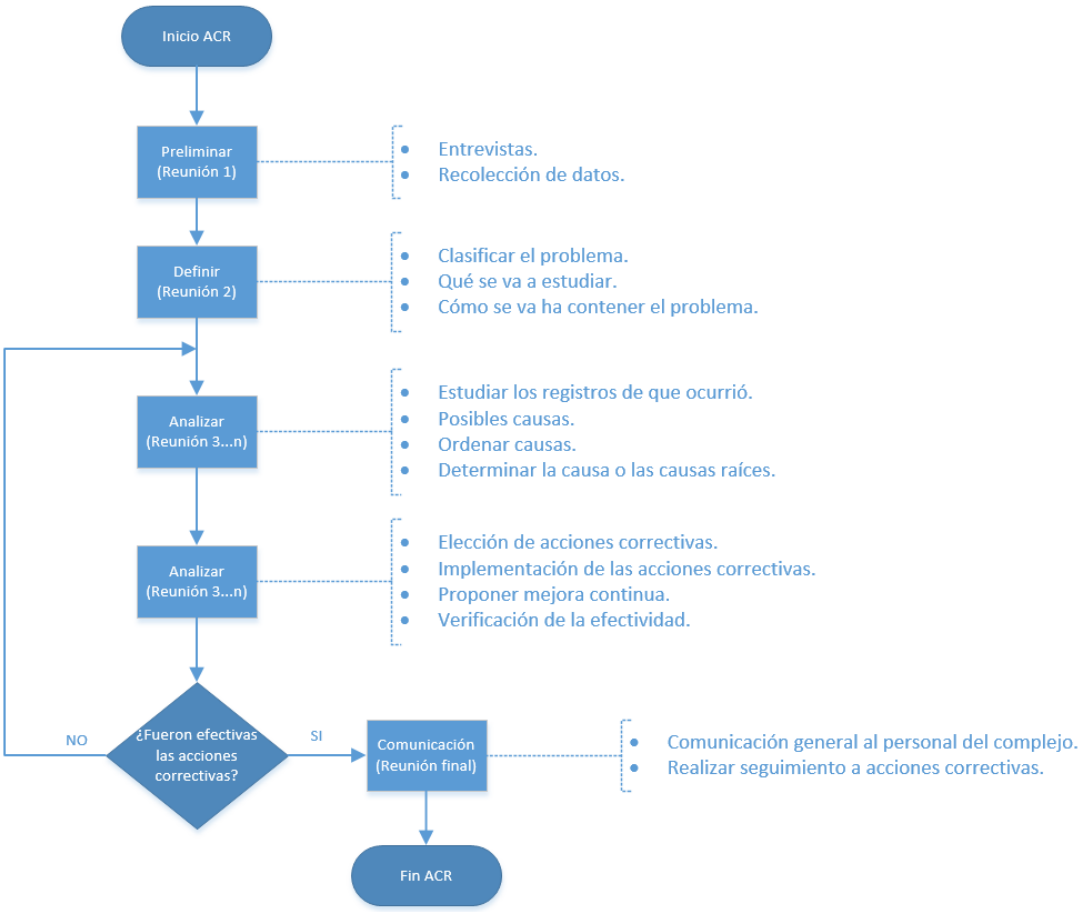
Figura 10: Matriz de criticidad.
(Fuente: Elaboración propia)

4.2.4. *Actividades preliminares*

Al realizar el ranking de falla ordenadas por criticidad, elegida la falla que tiene mayor impacto y conformado el equipo que realizará el ACR, se puede dar inicio al ACR.

El coordinador de ACR debe llevar la gestión del proceso. La figura 11 muestra un diagrama de flujo que sirve como ayuda para gestionar el ACR, saber cuáles son las etapas (reuniones) de la investigación y el proceso que se realizará en cada reunión.

Figura 11: Diagrama de flujo de ACR.
(Fuente: Elaboración propia)



Es necesario crear una planilla Excel para llevar la gestión de toda la información, acuerdos, tareas, evidencias que nacerán producto de la investigación.

El coordinador de ACR debe crear el grupo de investigación, a su vez debe designar un líder de ACR. Las tareas que deberá realizar el líder son las siguientes:

- Convocar al grupo de ACR a la brevedad para dar inicio al ACR (reunión 1)
- Verificar la expertis de los miembros, si existe alguna duda con algún integrante, el líder de ACR debe comunicar al coordinar la posibilidad de cambio.
- Liderar la reunión, llegar a consensos en el grupo.
- Moderar las discusiones que se susciten en todas las fases de la investigación.
- Asignar las diferentes tareas de investigación en coordinación con jefaturas de los miembros del ACR, asegurar los tiempos y acciones programadas.
- Coordinar los recursos externos para llevar a cabo alguna tarea específica.
- Realizar el informe de cierre y comunicar.

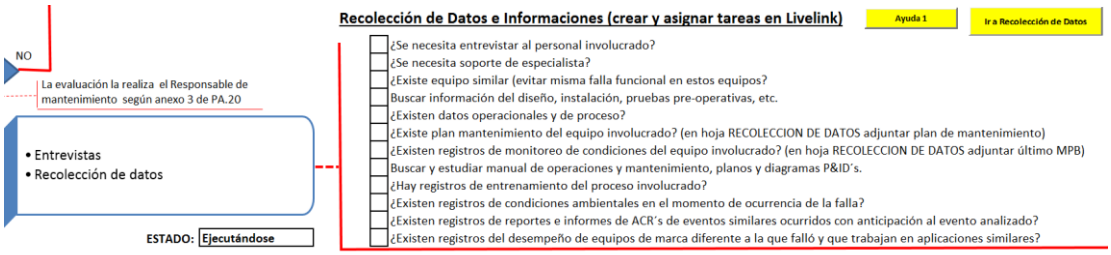
4.2.5. *Recolección de datos e informaciones (evidencias)*

Esta etapa está orientada a conseguir información detallada de las circunstancias contextuales de cómo se presentó la falla, información de los equipos involucrados y todo otro dato que se considere relevante, con la finalidad de utilizar esta información para la etapa de análisis de ACR.

Gestión de Evidencias

La figura 12 representa un extracto de la planilla de gestión de ACR, donde se visualizan las diferentes preguntas que se deben realizar al grupo, la idea es orientar la búsqueda de información relevante y que sea un aporte a la investigación.

Figura 12: Set de preguntar para orientar la busque de evidencia
(Fuente: Elaboración propia)



Al seleccionar una de las preguntas de recolección de datos (el grupo debe afirmar que se necesitan esos datos), automáticamente el coordinador de ACR lista las tareas, asigna responsable y acuerda fecha de entrega de información asociadas a esa pregunta en otra hoja de la planilla de gestión de ACR, ver figura 13.

Figura 13: Asignación de tareas
(Fuente: Elaboración propia)

ACR: _____

Tareas Recolección de Datos e Informaciones						
ITEM	Tarea	Descripción	Responsable	Cargo	Plazo de ejecución	HH ejecución tarea
1						
2						
3						

En lo posible se debe tratar de calzar el plazo de ejecución con la fecha acordada para la segunda reunión.

Uno de los puntos más delicados en la búsqueda de información es la entrevista al personal involucrado. Se debe contar inicialmente con un formato de entrevistas, tener claro cuáles son las preguntas que se deben realizar y por sobre todo dejar claro que la entrevista no está orientada a buscar eventuales fallas del personal “culpables”. Las entrevistas pueden ser tanto individuales como grupales.

En esta reunión debe quedar clara las o la medida de contención (si la hubiese).

Tendencias

En todo sistema de control existen sistemas computarizados que realizan tendencias de las variables de proceso más relevantes o que forma parte del control de proceso relacionado a una variable física (nivel, presión, flujo, etc.). Además pueden ser almacenadas en bases de datos especializadas para análisis futuros. Esto es muy relevante ya que se puede acotar la investigación e inferir si la falla corresponde a una falla en el proceso o corresponde a una falla en la instrumentación de medida.

Por lo general las fallas en el proceso obedecen a cambios graduales en las variables de proceso.

Se puede inferir que existe una falla de instrumentación cuando existe un cambio abrupto en la variable de proceso u oscilaciones en dichas variables.

Las técnicas de predicción permiten analizar las fallas en el proceso, no es aplicable a fallas en instrumentación

Técnicas de Predicción

Las técnicas de predicción son muy útiles para esta etapa, se clasifican en 2 tipos principales: cualitativas y cuantitativas.

Las cualitativas son técnicas que se utilizan de forma natural en la ausencia de los datos históricos (ejemplo, nuevos productos o máquinas) y que se basan en juicio personal o experto.

Las cuantitativas (objetivo) son técnicas que se ocupan con datos numéricos existentes, se basan en métodos matemáticos y existentes.

Para elegir una técnica de pronóstico los principales criterios son:

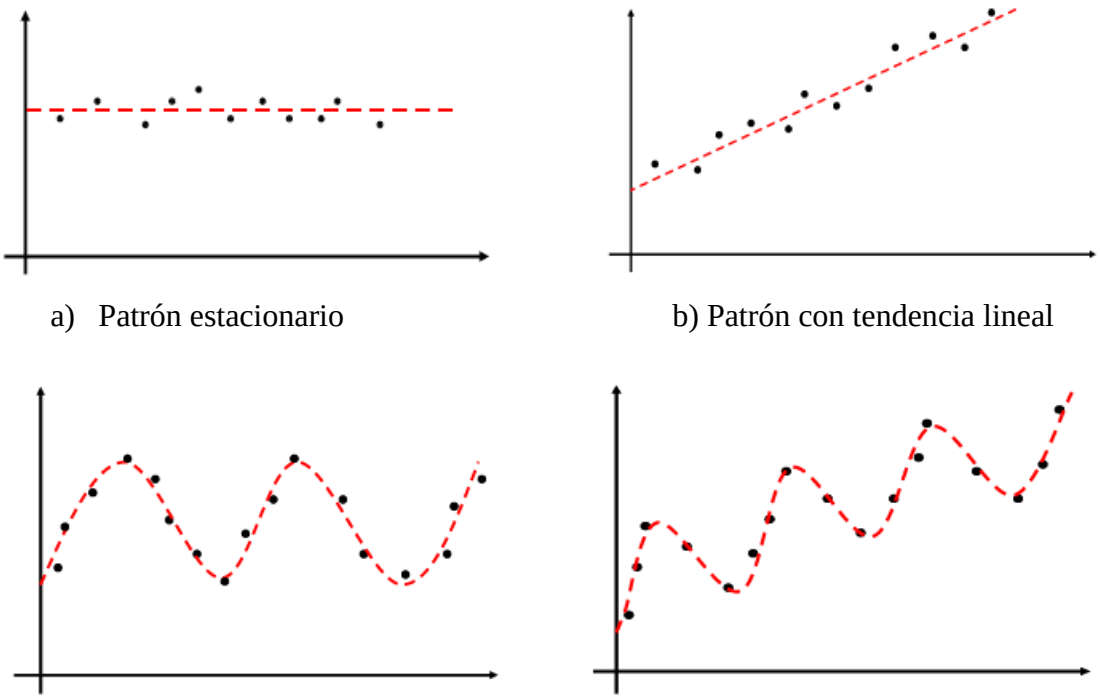
- El objetivo de la tendencia.
- Horizonte temporal para el pronóstico.
- Disponibilidad de datos.

Con el fin de desarrollar un buen pronóstico, se deben seguir los siguientes pasos:

a) Definir la variable a predecir e identificar la posible causa-efecto, las relaciones y las variables de predicción asociadas.
b) Recoger y validar los datos disponibles.
c) Representar gráficamente los datos en el tiempo y buscar patrones en el tiempo, incluyendo estacionalidad y tendencia.
d) Proponer varios modelos de predicción, y determinar los parámetros y las previsiones de cada modelo.
e) Perfeccionar el modelo seleccionado.

Las técnicas de predicción cuantitativa se clasifican en series temporales y modelos causales. Su objetivo es identificar, a partir de los valores pasados, los principales patrones que continuarán en el futuro. Los patrones más frecuentes se representan en la figura 14.

Figura 14: Patrones más comunes en técnicas de predicción
(Fuente: Ben-Daya & Duffuaa, 2009*)*



a) Patrón estacionario

b) Patrón con tendencia lineal

c) Patrón con estacionalidad

d) Patrón con estacionalidad y tendencia

Las técnicas de predicción pueden ser aplicadas a cualquier medida de proceso que se tenga historial (base de datos).

Monitoreo de Condición

El monitoreo por condición o mantenimiento predictivo es la revisión del "estado de salud" del equipo a través de la medición de una variable física, que se considera representativa del mismo, y su respectiva comparación con valores estándar o una norma que nos permita diagnosticar el estado del mismo.
La finalidad es hacer gestión temprana de la falla para evitar costos mayores asociados a detenciones no programadas, además es una fuente primaria de datos para inferir modos de fallo del equipo.
A continuación se listan algunas técnicas de monitoreo de variables:

- Monitoreo de vibraciones.
- Termografía.
- Tribología (análisis de aceites-particulado).
- Inspección visual.
- Ultrasonido.
- Pruebas eléctricas (Resistencia de aislación, descargas parciales, etc.).
- Tintas penetrantes.
- Partículas magnéticas.

Estrategias de Mantenimiento

Existen 4 estrategias de mantenimiento que son:

- Mantenimiento reactivo.
- Mantenimiento preventivo.
- Mantenimiento predictivo.
- Mantenimiento proactivo.

Mantenimiento reactivo: Este es uno de los enfoques más antiguos del mantenimiento, la consigna es “que funcione hasta que falle”. Algunos inconvenientes de este enfoque son los altos costos por tiempo muerto, mayores costos de mantenimiento y peligro para la seguridad de las personas.

Mantenimiento preventivo: Este mantenimiento está basado en tiempo o planeado, el servicio y reemplazo de parte se programan a intervalos de tiempo definidos aunque no se necesiten.

Mantenimiento predictivo: En el mantenimiento predictivo lo que determina la necesidad de intervenir un equipo es la condición del equipo en lugar de los intervalos de tiempo. Este enfoque puede ahorrar tiempo y dinero debido a que permite corregir el problema antes de que el equipo realmente falle.

Mantenimiento proactivo: El mantenimiento proactivo ocupa la información generada por el mantenimiento predictivo para identificar los problemas y aislar la fuente de la falla.

En el análisis causa raíz es importante saber cuál es la estrategia de mantenimiento que tiene el equipo que se está analizando, ya que la información que se puede obtener es muy relevante y podría haber observaciones que aporten hallazgos relevantes.

Medida de Contención

Las medidas de contención son acciones que se toman para eliminar o mitigar la falla, la idea de esta medida es ganar tiempo para que el grupo de investigación pueda determinar la causa raíz, mitigar las pérdidas de producción, eliminar el avance progresivo de la condición que está originando la falla, disminuir la probabilidad de ocurrencia de accidente, etc.

Algunas medidas de contención son:

- Cambiar el equipo dañado.
- Contener derrames de productos nocivos para la salud.
- Cambiar condiciones operacionales de máquina.

- Disminuir fugas.
- Cambiar lógicas de control de proceso.
- Delimitar zonas de riesgo.
- Etc.

Algunas veces las medidas de contención se pueden convertir en la acción correctiva que eliminará la causa raíz, pero esto lo determinará el resultado de la investigación.

4.2.6. *Análisis de datos y determinación de Causa Raíz*

Los datos recopilados en la etapa anterior se deben analizar para empezar a inferir modos de fallos.

Se debe clasificar el evento que ocurrió con el fin de acercarse al problema y así comprender la naturaleza del mismo, por lo tanto la primero medida es enfocar el problema con todo detalle, definiendo los límites del mismo, además entender si el problema ha ocurrido en más de una oportunidad.

Luego de enfocar el problema y definir cuál es la problemática a estudiar, el grupo debe analizar la evidencia y realizar inferencia en posibles modos de fallo. La técnica más ocupada es la "tormenta de ideas", se deben listar los aportes de cada integrante, en esta etapa no existen ideas "tontas", el grupo en la siguiente fase se encargará de dejar fuera las ideas que no aporten a la explicación de la falla. Debe existir un ambiente de respeto, tener en cuenta que todas las ideas son buenas.

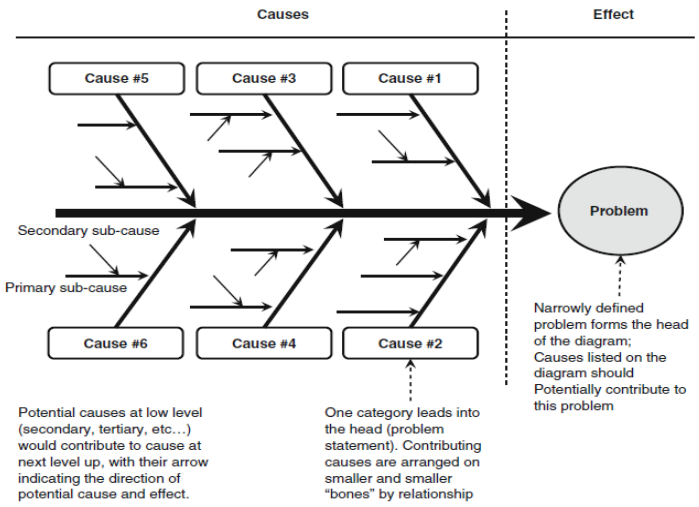
Una vez listada todas las posibles causas de falla y cuando el grupo se sienta convencido que está todo abarcado, se deben unir las causas con los efectos, las técnicas más ocupadas son las siguientes:

- Diagrama ISHIKAWA.
- Diagramas de Causa y Efectos.

Diagrama ISHIKAWA

El diagrama de causa-efecto de Ishikawa que se muestra en la figura 15 es un diagrama causal que muestra las causas de un evento específico. Fue diseñado para solucionar las posibles causas de un problema, organizando éstas en causas relacionadas. El profesor Kaoru Ishikawa desarrolló esta herramienta en 1943 para explicar a un grupo de ingenieros de Kawasaki Steel como diferentes factores pueden ser ordenados e interrelacionados (Van Aartsengel & Kurtoglu, 2013)

Figura 15: Diagrama Causa-Efecto
(Fuente: Van Aartsengel & Kurtoglu, 2013)



Causa #1 Personas: Esto se refiere a los recursos humanos y la intervención que es necesaria para un proceso que se completa con éxito, esta categoría aclara las funciones y responsabilidades de cada persona involucrada en el proceso (ejemplo: Procedimiento de soldadura aplicado incorrectamente).

Causa #2 Equipo: En esta rama se debe hacer referencia a los posibles equipos o componentes que podrían haber fallado, con sus respectivos modos de fallo (ejemplo: transmisor de presión descalibrado (EMERSON, 2002)).

Causa #3 Método: Hace referencia a procedimientos, permisos de trabajo, documentos, etc. O cualquier tipo de documento (existente o no) que esté involucrado en la causa de la falla (ejemplo: no existe procedimiento de soldadura)

Causa #4 Medio: Son variable exógenas que puede aportar al modo de fallo (ejemplo: temperatura ambiente, polvo en suspensión, etc.)

Causa #5 Materiales: Hace referencia a tipos de materiales que se ocupan en la confección o construcción de algún elemento (ejemplo: soldadura inadecuada, acero con porosidades, etc.)

4.2.7. *Elección de acciones correctivas*

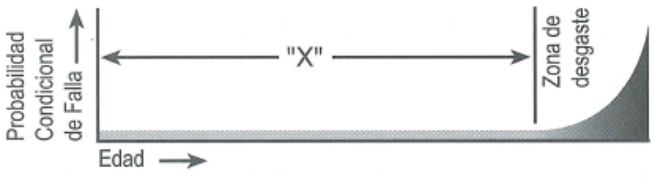
Para elegir la acción correctiva que asegurará que lo sucedido no volverá a ocurrir, se debe tener en claro dos cosas:

- Saber cuál es la causa o causas raíces que provocaron la falla (esto se deduce del diagrama causa y efecto).
- Reconocer cuál es el patrón de falla de la causa raíz (cada patrón de falla tiene asociada una acción correctiva en particular).

Patrones de Falla

La figura 16 se basa en la presunción que la mayoría de los equipos operan confiablemente en un periodo "X", y luego se desgastan. El pensamiento clásico sugiere que los registros extensivos acerca de las fallas nos permiten determinar y planear acciones preventivas tiempo antes de que ellas ocurran.

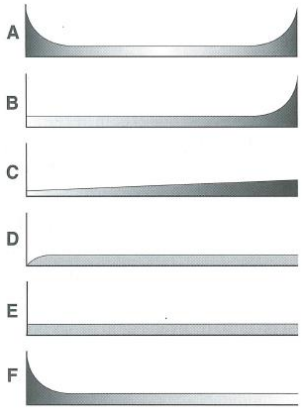
Figura16: Perspectiva tradicional de falla
(Fuente: Moubray, 1991)



Este patrón es cierto para algunos tipos de equipos simples, y para algunos ítems complejos con modos de fallas dominante. En particular las características de desgaste se encuentran a menudo en caso en los que el equipo tiene contacto directo con el producto. Las fallas relacionadas con la edad frecuentemente van asociada a la fatiga, corrosión, abrasión y evaporación (Moubray, 1991).

Los equipos en general son mucho más complejos de lo que eran hace 20 años atrás. Esto ha traído sorprendentes cambios en los patrones de falla, como lo muestra la figura 17. La figura muestra la probabilidad condicional de falla con relación a la edad operacional para una variedad de elementos mecánicos y eléctricos.

Figura 17: Seis patrones de falla
(Fuente: Moubray, 1991)



El patrón A es la curva de la bañera. Comienza con una gran incidencia de fallas (llamada mortalidad infantil), seguida por un incremento gradual o constante de la probabilidad condicional de falla, y por último una zona de desgaste.

El patrón B muestra una probabilidad condicional de falla constante o de lento incremento, y que termina en una zona de desgaste.

El patrón C muestra una probabilidad condicional de falla que crece lentamente, pero no tiene una edad de desgaste claramente identificable.

El patrón D muestra una baja probabilidad condicional de falla cuando el equipo es nuevo o recién salido de la fábrica y luego un veloz incremento a un nivel constante.

El patrón E muestra una probabilidad condicional de falla constante a todas las edades por igual (falla al azar).

El patrón F comienza con una alta mortalidad infantil que finalmente cae a una probabilidad de falla constante o que asciende muy lentamente.

Estudios realizados en aeronaves comerciales demostraron que un 4% de los elementos correspondía al patrón A, un 2% al patrón B, un 5% al patrón C, un 7% al D, un 14% al E, y un 68% al patrón F. El número de veces que estos patrones ocurren en aeronaves no es necesariamente el mismo que en la industria, pero no cabe duda de que a medida que los elementos se hacen más complejos, encontramos cada vez más patrones E y F (Moubray, 1991).

Fallas relacionadas con la edad

Los patrones A, B y C son patrones relacionados con la edad, donde al término de la vida útil del elemento empieza a aumentar la probabilidad de ocurrencia de falla. En general, los patrones de falla relacionados con la edad se aplican a componentes muy simples, o a componentes complejos que sufren de un modo de falla dominante. En la práctica, comúnmente se les encuentra bajo condiciones de desgaste directo. También se les asocias con fatiga, corrosión, oxidación y evaporación.

Bajo ciertas circunstancias, se dispone de dos opciones preventivas para reducir la incidencia de estos modos de fallo, estas son las tareas de reacondicionamiento cíclico y las tareas de sustitución cíclica.

Tareas de reacondicionamiento cíclico: El reacondicionamiento cíclico consiste en reacondicionar la capacidad de un elemento o componente antes o en el límite de edad definido, algunas tareas de reacondicionamiento cíclico son:

- Cambio de filtros a intervalos de tiempo constantes.
- Lubricación a intervalos de tiempo contantes.
- Pintado.
- Etc.

Tareas de sustitución cíclica: Las tareas de sustitución cíclica consiste en descartar un elemento o componente antes, o en el límite de edad definida, independiente de su condición en ese momento, algunas tareas de sustitución cíclica son:

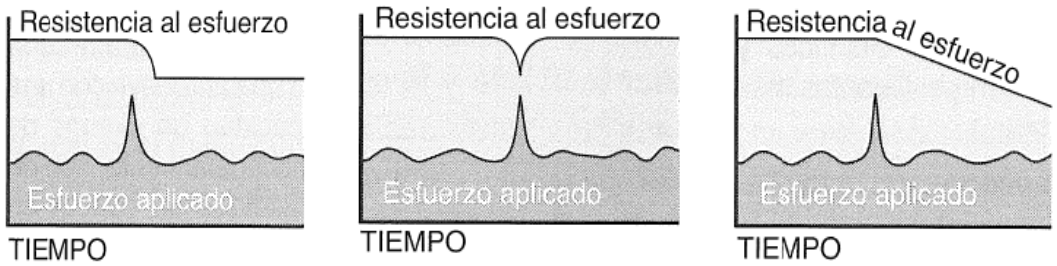
- Cambio de rodamientos de motores a intervalos de tiempo contantes.
- Cambio de fusibles
- Cambio de o-rines
- Etc.

Fallas no asociadas con la edad

Uno de los desarrollos más desafiantes de la administración del mantenimiento moderno ha sido el descubrimiento de que en realidad muy pocos modos de fallo se ajustan a los patrones A, B y C, esto se debe principalmente a una combinación de variaciones en el esfuerzo aplicado y la complejidad creciente de los equipos y sistemas (Moubray, 1991).

Esfuerzo variable: Contrariamente a las creencias, el deterioro no siempre es proporcional al esfuerzo aplicado, y el esfuerzo no siempre es aplicado consistentemente. La figura 18 representa la respuesta de la resistencia al esfuerzo aplicando un esfuerzo puntual.

Figura 18: Tipos de resistencia al esfuerzo
(Fuente: Moubray, 1991)



Idealmente, “prevenir” fallas de este tipo es una cuestión de prevenir cualquier causa de incremento en los niveles de esfuerzo, más que una cuestión de hacer algo en el activo físico.
Algunos ejemplos de incremento en esfuerzo aplicado:

- Se arranca una máquina muy rápido.
- Una máquina se pone en reversa cuando anda hacia adelante.
- Se alimenta el proceso con materia prima muy rápido.
- Se ajusta demasiado un perno.
- Fisura en una estructura luego de un terremoto.
- Rodamiento mal alineado.
- Cojinete se cae al suelo en el almacén de repuesto.
- Etc.

Complejidad: Los elementos se hacen más complejos para mejorar el funcionamiento (al incorporar tecnología nueva o adicional, o automatizando). En otras palabras, se logró un mejor desempeño y una mayor seguridad al costo de una mayor complejidad. Algunos ejemplo de sistemas complejos:

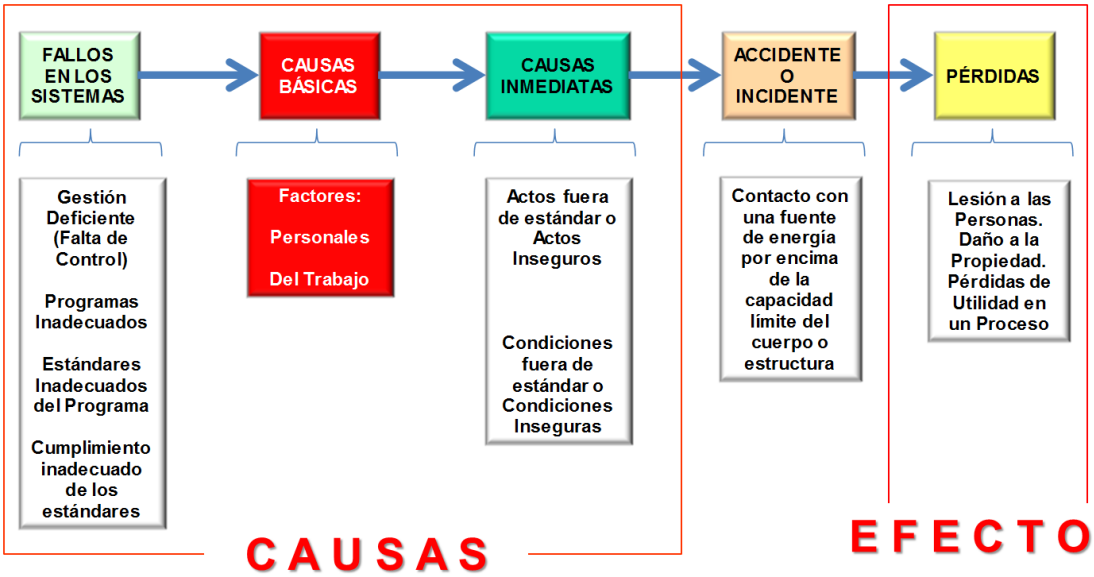
- Computadores.
- Sistemas DCS.
- Comunicaciones de datos.
- Transmisores de proceso.
- Etc.

La combinación de esfuerzo variable y respuesta errática a los esfuerzos, en conjunto con una complejidad creciente, significa que en la práctica, cada vez más modos de falla se ajustan a los patrones D, E y F.

Secuencia causal

Una vez realizado el diagrama Ishikawa y catalogada la falla en algún patrón determinado, se puede analizar y determinar la causa raíz, para evitar las pedidas, deben tomarse medidas que rompan la secuencia de eventos o cadena causal, que origina la falla, actuando sobre las causas básicas o causas raíces, ver figura 19.

Figura 19: Secuencia causal
(Fuente: elaboración propia)



Las causas básicas se dividen en factores personales y factores del trabajo

La tabla 4 muestra alguno de los factores de causas básicas.

Tabla 4: Factores de causas básicas
(Fuente: elaboración propia)

Factores Personales	Factores del trabajo
Capacidad física inadecuada	Liderazgo y supervisión deficiente
Tensión física	Ingeniería inadecuada
Tensión mental	Malas especificaciones
Falta de conocimiento	Deficiencia en las adquisiciones
Falta de habilidad	Planificación/programación deficiente

Motivación deficiente	Mantenimiento inadecuado
	Normas inadecuadas
	Herramientas y equipos inadecuados
	Estándares de trabajo deficiente
	Uso y desgaste

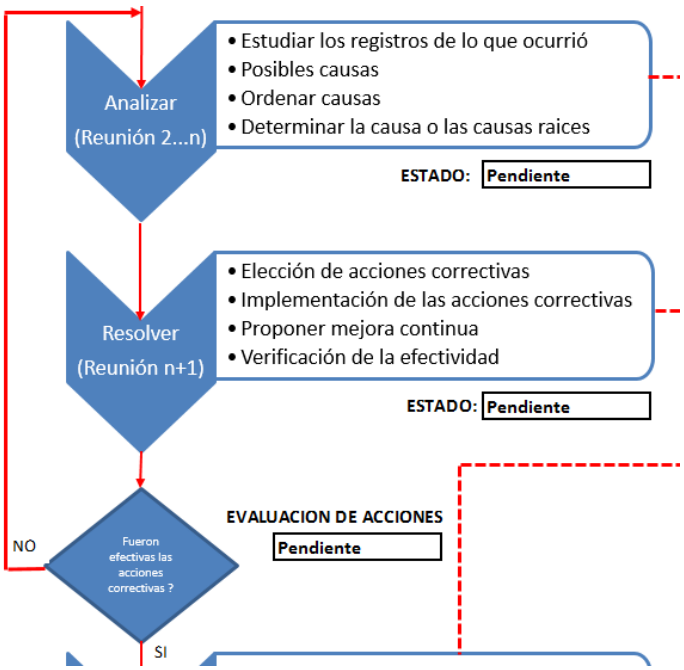
4.2.8. *Verificación de la efectividad*

Una vez ejecutada la acción correctiva se debe verificar la efectividad de ésta, si el problema persiste podría deberse a 2 factores:

- Que la acción correctiva elegida no fue la adecuada.
- Es otra la causa raíz del problema.

En cualquiera de los dos casos se debe volver al proceso de análisis, volver a analizar los nuevos datos y volver a inferir una nueva causa raíz con su nueva acción correctiva. Cabe destacar que muchas veces toma tiempo verificar si la acción correctiva fue la adecuada, es responsabilidad del líder decidir (a través de datos objetivos) cuando cerrar el ACR y pasar al proceso de comunicación. La figura 20 muestra el diagrama de decisión donde se representa lo descrito.

Figura 20: Diagrama de decisiones de efectividad de acción correctiva
(Fuente: Elaboración propia)



4.2.9. *Comunicación*

La etapa de comunicación es muy importante, ya que aquí se plasman los resultados de la investigación del análisis causa raíz, lo ideal es realizar una exposición con los resultados a todos los miembros de la organización, a continuación de presentan los puntos básicos que debe llevar dicha presentación:

- Descripción general, es un breve resumen de la presentación.
- Descripción del proceso.
- Línea de tiempo, cronograma de los sucesos antes y después de la falla.
- Hallazgos, gráficos y datos relevantes.
- Diagrama Ishikawa.
- Elección de la causa raíz.
- Acciones correctivas con fecha de ejecutable y responsable.
- Acciones de mejora continua con fecha de ejecutable y responsable.

5. ESTUDIO DE CASOS REALES

5.1. Alta Vibración Cojinetes Alta Presión Turbina a Vapor Nehuenco 2

Los cojines radiales son elementos donde descansa el rotor de la turbina a vapor, suelen ser de un material blando, y recubiertos de una capa de lubricante que disminuya la fricción. Son elementos de desgaste, que deben ser sustituidos periódicamente, bien con una frecuencia establecida si su coste es bajo con respecto a su producción, o bien por observación de su superficie y cambio cuando se encuentren en un estado deficiente. El sistema de control se monitorea tanto la temperatura como la vibración que se produce en el cojinete. La figura 21 y 22 muestra el HMI de la turbina a vapor con sus correspondientes cojinetes.

Figura 21: Temperaturas cojinetes turbina a vapor.
(Fuente: DCS Alspa P320 Alstom)

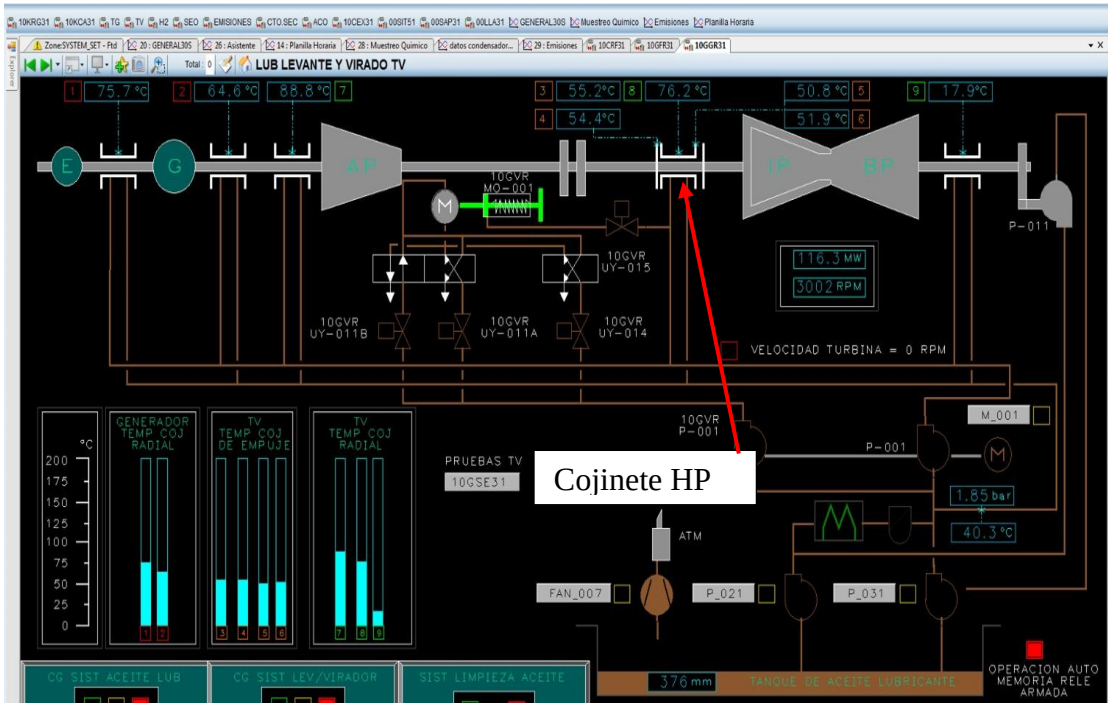
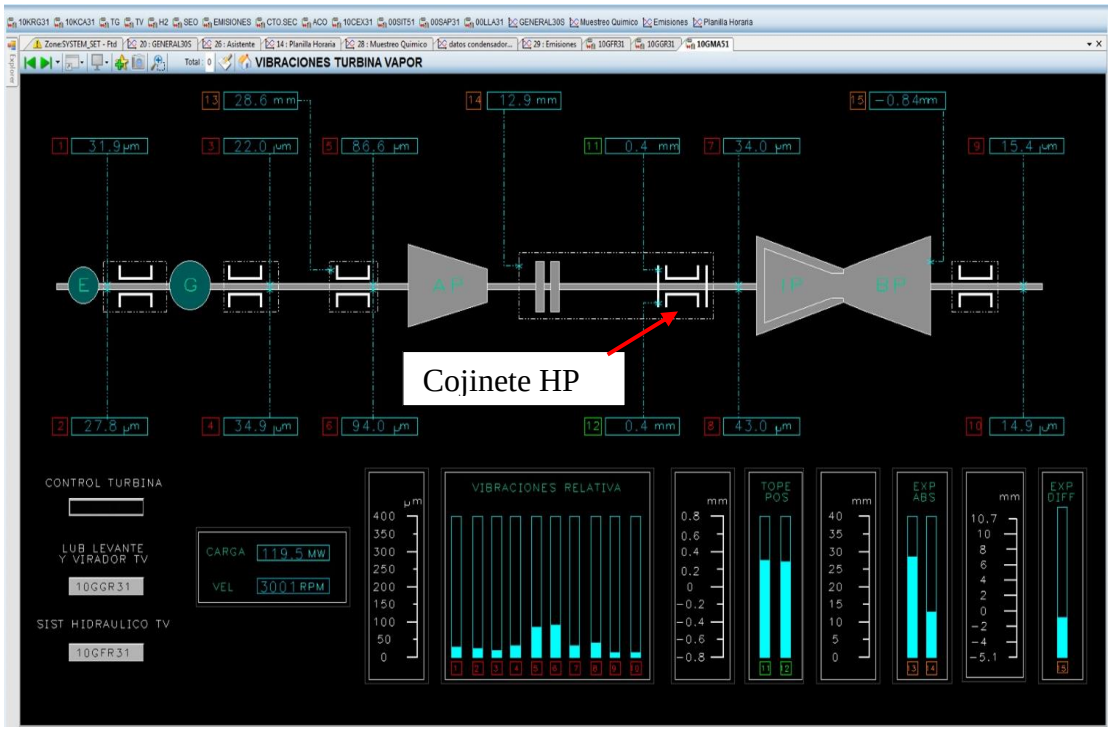


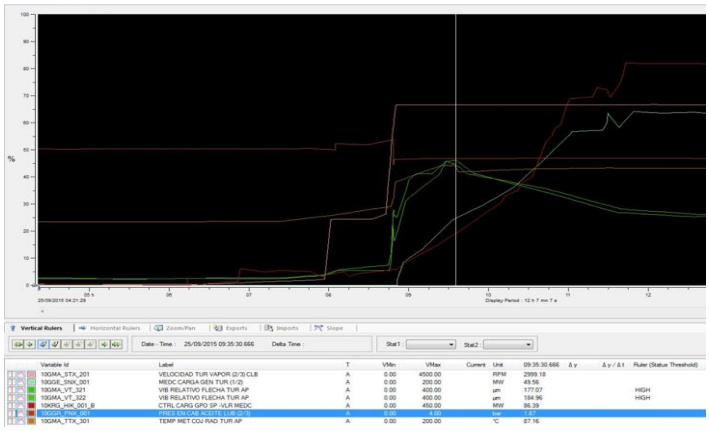
Figura 22: Vibraciones cojinetes turbina a vapor.
(Fuente: DCS Alspa P320 Alstom)



5.1.1. *Descripción del problema*

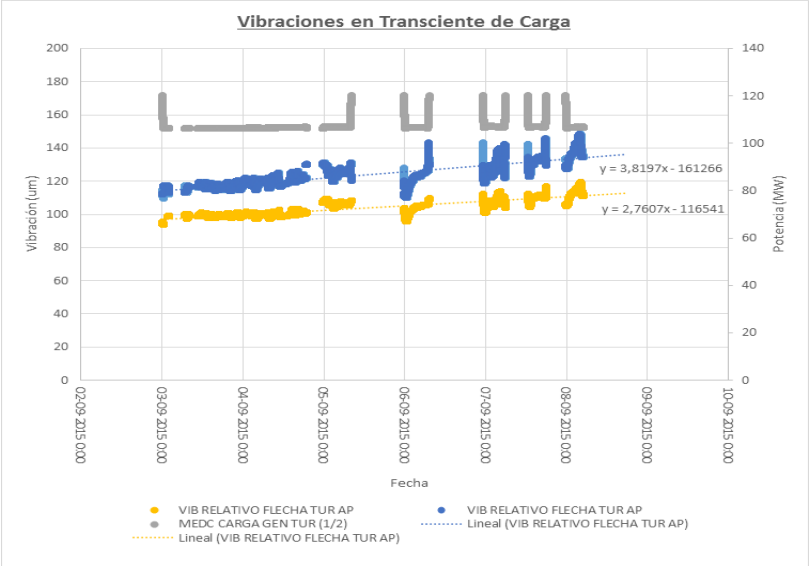
El día 25 de septiembre a las 08:35 opera alarma por alta vibración cojinete de alta presión Turbina a Vapor Nehuenco 2, llegando a valores de 184 micrómetros, además acompañada de un alza de la temperatura en el descanso, ver figura 23.

Figura 23: Alarma por alta vibración cojinete HP.
(Fuente: Gráfico DCS Alspa P320 Alstom)



Se notifica a personal de mantenimiento el cual realiza un análisis de tendencia para descartar si el problema es real o existe un problema en la instrumentación, para realizar el análisis de tendencia se filtra la medida de vibraciones en tres modos de potencia de máquina, los cuales son: modo carga base, mínimo técnico y transciente entre mínimo técnico y carga base, el resultado más significativo se produce en el transciente de carga, el cual se aprecia en la figura 24.

Figura 24: Tendencia de vibraciones en cojinete HP.
(Fuente: Elaboración propia)



Cuando se producen los transcientes de carga, se empieza a notar un incremento en la medida de vibraciones, el cual el 25 de septiembre llega a valores de alarma.
Las ecuaciones de tendencias que se visualizan en el gráfico proyectan la operación del trip de la unidad (220 micrómetros) para el día 15 de octubre aproximadamente.

5.1.2. *Análisis del grado de criticidad del problema*

Una vez determinada que la alarma es real (alta vibración cojinete HP), el responsable de mantenimiento evalúa el nivel de criticidad de la falla, para determinar si es necesario realizar un ACR y además contar con un índice de priorización.

Para definir el nivel de gravedad, se trabaja bajo los niveles de ponderación que se muestran en tabla 5:

Tabla 5: Índice de gravedad
(Fuente: elaboración propia)

Índice de Gravedad	***Gravedad del problema***
5	Falla catastrófica
4	Trip con carga, arranque fallido
3	Pérdidas de potencia / potencial trip
2	Arranque fallido
1	Sin trip / sin pérdida de generación

Se asigna nivel de gravedad 5, producto de tener antecedentes de fallas que presentan este mismo modo de fallo, se presentará este caso (falla catastrófica central Blanco) para evaluar los costos asociados a una falla catastrófica.

De la tabla 3 se define el nivel de índice de probabilidad de 4, ya se cuenta con antecedentes de ocurrencia en otras plantas.

Al multiplicar los índices de gravedad y probabilidad se obtiene como resultado un índice de criticidad de 20, lo cual al evaluar en la matriz de criticidad corresponde a un valor EXTREMO, se toma la decisión de realizar ACR de forma urgente.

5.1.3. *Recolección de evidencias*

En la primera reunión se define la medida de contención a tomar, además se definen las tareas de recolección de evidencias para ser analizadas en la reunión número dos, estas tareas son las siguientes:

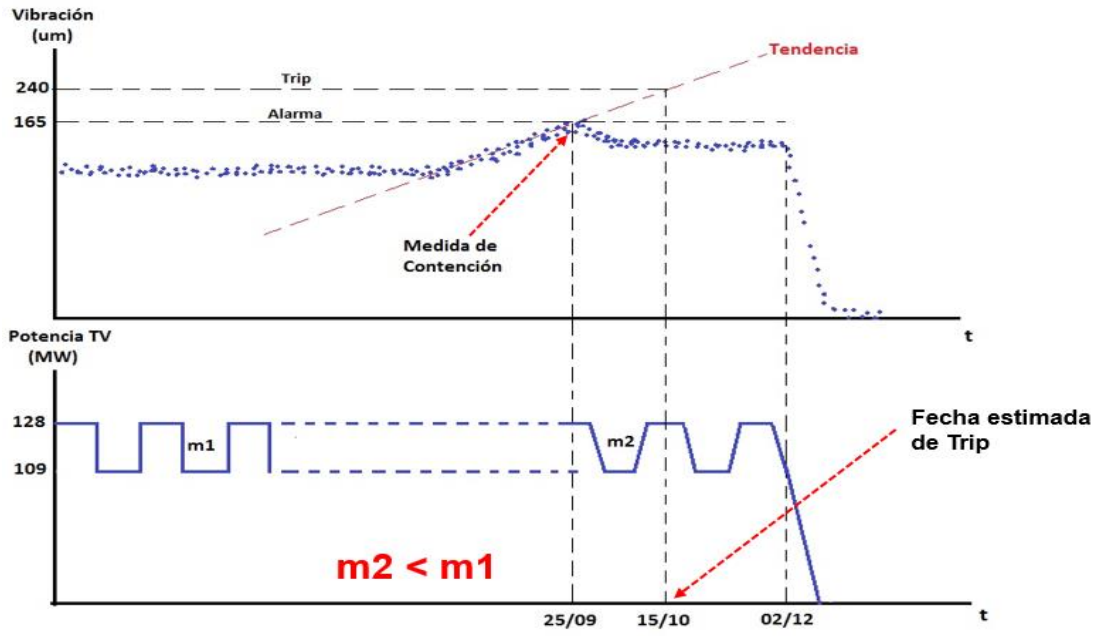
a) Enviar antecedentes operacionales a ALSTOM y pedir asistencia técnica.
b) Contactar como medida inicial a empresa IMC, para diagnóstico de vibraciones de unidad.
c) Se necesita información para analizar los ajustes de lubricación, presiones de vacío, etc.
d) Levantamiento de datos operacionales de condición de vapor y lubricación.
e) Verificar en terreno datos de presión de vacío del cojinete para comparar datos con manuales.
f) Analizar plan de mantenimiento para detectar posible desviaciones.
g) Extraer información de sistema de monitoreo de vibraciones.
h) Buscar y analizar informe análisis de calidad de aceite.

Estas tareas se cargan en la planilla de gestión de ACR con sus respectivos responsables y fechas de entrega.

5.1.4. *Medida de contención*

Producto del análisis de tendencia, en la reunión 1 se decide variar la tasa de toma de carga de la turbina a vapor, la idea es disminuir el stress térmico a que está sometida la máquina para bajar los niveles de vibraciones e intentar que no opere la alarma por alta vibración, la figura 25 muestra el efecto de la medida de contención.

Figura 25: Efectos del cambio de consigna de toma de carga.
(Fuente: Elaboración propia)



La pendiente m1 es igual a 1 MW/min, dicha pendiente fue modificada a un valor m2 de 0,1 MW/min, esta medida bastó para detener la tendencia al alza y no alcanzar niveles de alarma. Además se gana tiempo para gestionar recursos para el trabajo de inspección del cojinete para la detención del día 02-12-2015.

5.1.5. *Causa Raíz*

Para determinar la causa raíz se debe analizar la evidencia recolectada en el punto 5.1.3, se responderán cada una de las tareas que se encomendaron a los diferentes integrantes del grupo de análisis.

a) Enviar antecedentes operacionales a ALSTOM y pedir asistencia técnica.

Se envía información a ALSTOM (datos de proceso, datos recolectados de sistemas de vibraciones) para su análisis y poder inferir modos de fallos que podrían estar ocasionando el alza en las vibraciones del cojinete.
ALSTOM informa que las posibles causas son:

- Roce en cojinete
- Suciedad en anillos de sello.

Además recomienda una inspección para poder visualizar cojinete y posibles daños en turbina.

b) Contactar como medida inicial a empresa IMC, para diagnóstico de vibraciones de unidad.

IMC empresa líder en el análisis de vibraciones en máquinas rotatorias, tras un análisis espectral y de orbitas, llega a las misma conclusiones que ALSTOM.

c) Se necesita información para analizar los ajustes de lubricación, presiones de vacío, etc.

Los ajustes de presiones de lubricación, presiones de vacío y demás parámetros operacionales se encuentran normales.

d) Levantamiento de datos operacionales de condición de vapor y lubricación.

Ídem punto c.

e) Verificar en terreno datos de presión de vacío del cojinete para comparar datos con manuales.

Ídem punto c.

f) Analizar plan de mantenimiento para detectar posible desviaciones.

No existe plan de mantenimiento asociado a los cojinetes, estos se tratan a la falla, pero si se tiene aceite en buen estado y parámetros operacionales estables, no debiesen fallar. Además en cada inspección no existen procedimientos de montaje, se corre el riesgo de tener una falla prematura.

g) Extraer información de sistema de monitoreo de vibraciones.

Se extrae información y se envía a ALSTOM para su análisis.

h) Buscar y analizar informe análisis de calidad de aceite.

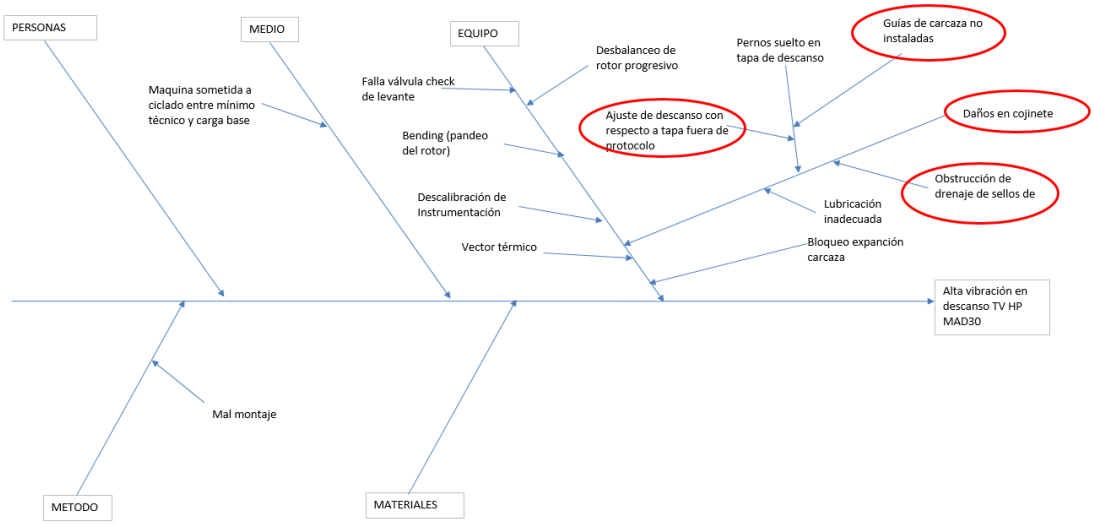
Los análisis de aceite indican un buen estado del mismo, lo que abre un nuevo punto de debate, ya que se debe evaluar si se están realizando correctamente las tomas de muestra de aceite o si el periodo entre muestra es el correcto.

Una vez revisada, analizada y enviada toda la información recolectada, se coordina para inspeccionar el cojinete en una detención de planta.
La figura 26 muestra los hallazgos encontrados en el cojinete de HP

Figura 26: Hallazgos encontrados en cojinetes.
(Fuente: Informe de inspección Colbún)

Luego de realizar la inspección del cojinete y encontrar los daños que se muestran en la figura 25, se decide investigar la causa raíz del daño, el diagrama Ishikawa que se muestra en la figura 27 representa el árbol causa y efecto que representa la falla.

Figura 27: Diagrama causa-efecto.
(Fuente: Elaboración propia)



El personal mecánico detecta varias anomalías al momento de realizar la inspección del cojinete, el cual da indicios de cuál es la causa raíz del problema.
Las anomalías encontradas son las siguientes:

- Holguras fuera de protocolo de 0,03 mm entre el cojinete y la carcasa del descanso.
- Falta de pernos guías en carcaza de descanso, lo que le da mayor grado de libertad al movimiento de la carcasa del descanso.
- Se encuentran los sellos laberinticos o deflectores de aceite obstruidos y sucios.

La causa raíz de la falla del cojinete de HP es la falta de rigurosidad al aplicar el procedimiento de montaje y ajuste de la carcasa del cojinete de HP, sumado a un descuido o falta de control de calidad a la hora de entregar el trabajo, esto ocasionó el olvido de la instalación de los pernos guías de carcasa, el cual ocasiona un mayor grado de libertad del eje dentro del cojinete.

5.1.6. *Acciones correctivas propuestas*

La tabla 6 muestra las acciones correctivas propuestas

Tabla 6: Acciones correctivas propuestas.
(Fuente: Elaboración propia)

Acción correctiva	Responsable	Plazo	Status
Reemplazar cojinetes dañados	J. Salgado	31-01-2016	Ejecutado
Ajustar cojinete de acuerdo a protocolo HTGD 457993	J. Salgado	31-01-2016	Ejecutado
Instalación de guías de carcaza	J. Salgado	31-01-2016	Ejecutado
Limpieza y ajuste de sellos de aceite	J. Salgado	31-01-2016	Ejecutado

5.1.7. *Acciones de mejora continua*

La tabla 7 muestra las acciones de mejora continua propuestas para erradicar este modo de fallo y asegurar que no vuelva a ocurrir en un futuro.

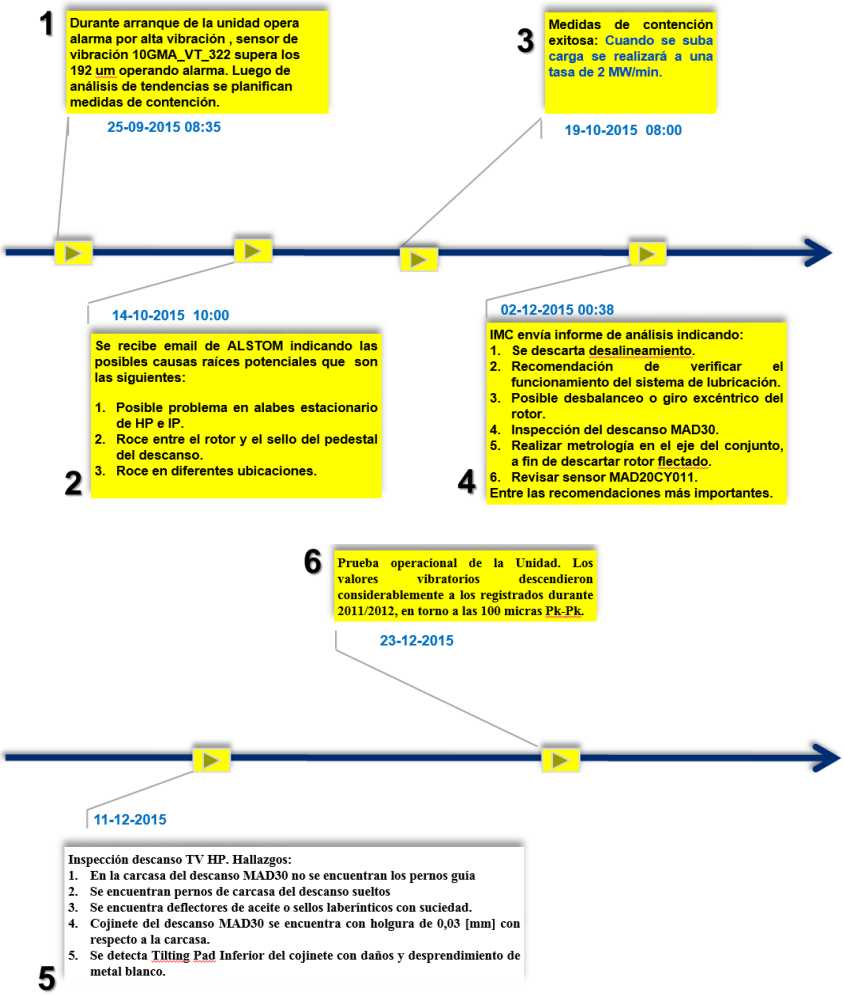
Tabla 7: Acciones de mejora continua.
(Fuente: Elaboración propia)

Mejora	Responsable	Plazo	Status
Destinar equipo para verificar claros y holguras con Ing. ALSTOM	C. Torres	Sept-2016	Pendiente
Pedir repuestos de cojinete y reparar cojinetes dañados	P. Orellana	Marzo-2016	Pendiente
Enviar a ALSTOM cojinetes 1 - 4 y 5	P. Orellana	Marzo-2016	Pendiente
Establecer línea base y seguimiento de comportamiento vibratorios de las unidades	R. Mieres	Junio-2016	Pendiente

5.1.8. *Resumen línea de tiempo*

La línea de tiempo nos ayuda a comprender cuál fue el orden cronológico de los eventos que gatillaron la falla del cojinete de HP y los eventos posteriores a la reparación. Esta forma de representar lo sucedido es de gran utilidad a la hora de realizar una presentación a la alta gerencia, ver figura 28.

Figura 28: línea de tiempo.
(Fuente: Elaboración propia)



5.1.9. *Análisis de costos*

Falla catastrófica unidad Blanco

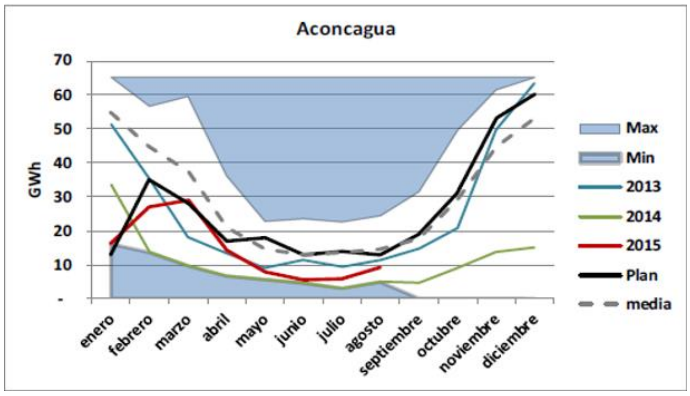
Se presenta como caso base la falla catastrófica ocurrida en central hidráulica Blanco donde no se contaba con un sistema de monitoreo de vibraciones. Esto provoca que no se cuente con un sistema de alarma temprana para realizar un ACR y tomar alguna medida de contención. La figura 29 muestra un registro fotográfico de los daños ocurridos en los álabes de la turbina y sistemas auxiliares.

Figura 29: Registro de daños en Unidad Blanco.
(Fuente: Informe de falla Colbún)

La falla ocurrió en enero del 2014 y la unidad estuvo indisponible 360 días. Para calcular las pérdidas por generación, el supuesto principal es proyectar la condición hidrológica del 2013 al 2014, esto para proyectar la supuesta generación de la unidad con falla el 2014.

La figura 30 muestra la generación anual del complejo de Aconcagua.

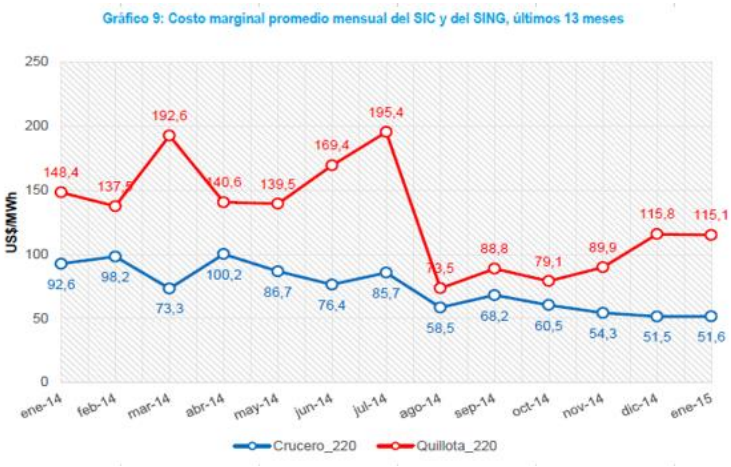
Figura 30: Generación anual.
(Fuente: Informe de gestión 2015 Colbún)



Cabe destacar que el complejo Aconcagua está conformado por dos centrales, central Blanco y Juncal. Para calcular la pérdida de generación de central Blanco de debe restar la curva del 2013 con la del 2014.

Otra variable que se debe considerar es la evolución del costo marginal en la barra Quillota. La figura 31 muestra dicha evolución del 2014.

Figura 31: Evolución costo marginal barra Quillota.
(Fuente: Informe mensual Generadora Chile)



La tabla 8 muestra la pérdida por lucro cesante asociada a la falla catastrófica de unidad Blanco.

Tabla 8: Perdidas por lucro cesante unidad Blanco.
(Fuente: www.cdec-sic.cl)

	2013 (GW-h)	2014 (GW-h)	Generación Proyectada Blanco (GW-h)	Perdidas Producción Blanco (MW-h)	Costo marginal 2014 ($/MW-h)	Perdida
Enero	51	33	18	18000	148,4	USD 2.671.200
Febrero	35	15	20	20000	137,5	USD 2.750.000
Marzo	18	10	8	8000	192,6	USD 1.540.800
Abril	15	6	9	9000	140,6	USD 1.265.400
Mayo	10	5	5	5000	139,5	USD 697.500
Junio	12	4	8	8000	169,4	USD 1.355.200
Julio	10	3	7	7000	195,4	USD 1.367.800
Agosto	13	4	9	9000	73,5	USD 661.500
Septiembre	15	4	11	11000	88,8	USD 976.800
Octubre	20	10	10	10000	79,1	USD 791.000
Noviembre	50	14	36	36000	89,9	USD 3.236.400
Diciembre	63	16	47	47000	115,8	USD 5.442.600
Enero	51	33	18	18000	115,1	USD 2.071.800
					Total Perdida	**USD 24.828.000**

El costo de reparación de la unidad Blanco ascendió a **USD 40.000.000**

La tabla 9 muestra el costo final que incluye el costo por pérdidas de generación y el costo de reparación.

Tabla 9: Tabla resumen reconstrucción Unidad Blanco.
(Fuente: Elaboración propia)

Tabla Resumen Perdida por Reconstrucción Unidad Blanco	
Perdidas por Generación	USD 24.828.000
Reconstrucción	USD 40.000.000
Total	**USD 64.828.000**
Tiempo Indisponible	**390 Días Aprox.**

<u>Costos falla alta vibración descanso HP</u>

Los costos asociados a la falla del cojinete de alta presión se dividen en:

- Costos asociados a los repuestos.
- Costos asociados a la mano de obra.
- Costos asociados a la HH ocupada para realizar el ACR.

Cabe destacar que no existen costo por pérdidas de generación, ya que gracias a la medida de contención tomada y siendo ésta exitosa, se logra llegar con la máquina en servicio hasta una detención programada con anterioridad.

El costo del cojinete engloba todos los costos de los repuestos, ya que los demás componentes (pernos, lainas, tuercas, etc.) son marginales. El costo del cojinete cambiado asciende a **USD 84.000.**

La tabla 10 muestra los costos asociados a la mano de obra que se dedicó a realizar la reparación.

Tabla 10: Costos asociados a mano de obra.
(Fuente: SAP módulo PM)

Tabla costo HH cambio cojinete HP			
Valor HH personal externo	CLP 13.500		
Valor HH personal interno	CLP 30.000		
Tarea	**HH externa**	**HH interna**	**Costos (USD)**
Apoyo a cambio cojinete HP	60	30	USD 2.471
Apoyo personal de ALSTOM			USD 48.980
Medición de vibraciones empresa IMC			USD 11.260
		Total	**USD 62.711**

Realizar un ACR tiene un costo, ya que las personas que conforman el equipo de trabajo dejan de hacer sus tareas diarias por conformar dicho equipo. Cada reunión y cada tarea de búsqueda de evidencia deben ser cuantificadas. La tabla11 representa el cuadro de costos por HH de cada integrante del equipo.

Tabla 11: Cuadro de costo por cargo.
(Fuente: SAP PM)

Tabla de Costos Unitario			
Item	**Cargo**	**Costo Unitario**	**Unidad**
1	Jefe de Area	$ 18.000	[$/HH]
2	Supervisor	$ 15.000	[$/HH]
3	Jefe de Turno	$ 15.000	[$/HH]
4	Especialista	$ 10.000	[$/HH]
5	Técnico	$ 7.000	[$/HH]

La tabla 12 representa las HH que cada integrante ocupa para realizar la tarea encomendada, estas HH deben ser cuantificadas por el mismo integrante del equipo.

Tabla 12: Horas-hombres destinadas a recolectar evidencia.
(Fuente: Elaboración propia)

HH Destinadas a Recolección de Datos e Información			
Item	**Tarea**	**Cargo**	**HH**
1	Contactar a ALSTOM	Supervisor	1,0
2	Contactar a especialista en vibraciones	Especialista	1,0
3	Levantar información (manuales) de sistema de lubrica	Especialista	3,0
4	Recuperación de datos operativos de unidad	Especialista	4,0
5	Levantamiento de datos de presión de vacío del cojinet	Supervisor	2,0
6	Buscar plan de mantenimiento	Técnico	1,0
7	Levantamiento de datos de system one	Especialista	3,0
8	Buscar informe de análisis de calidad de aceite	Especialista	1,0

La tabla 13 muestra la cantidad de horas por reunión y la cantidad de reuniones que se realizaron para llegar a determinar la causa raíz de la falla.

Tabla 13: Cantidad de horas y reunión realizadas.
(Fuente: Elaboración propia)

Horas de Reuniones								
Item	**Integrantes**	**Cargo**	**Reunión 1**	**Reunión 2**	**Reunión 3**	**Reunión 4**	**Reunión 5**	**Total Horas**
1	Carlos Torres	Jefe de Area	2	4	0			6
2	Aldo Morales	Supervisor	2	4	5			11
3	Mitchell Zúñiga	Especialista	2	4	3			9
4	Rodrigo Mieres	Especialista	2	3	5			10
5	Fabián Rodríguez	Supervisor	2	4	3			9
6	Sergio Sepulveda	Supervisor	2	4	5			11

La tabla 14 muestra el costo total que tiene la investigación del ACR, que implica el costo por búsqueda de evidencias y reuniones.

Tabla 14: Costo total reuniones y búsqueda de evidencias para ACR.
(Fuente: Elaboración propia)

Costo de ACR	Calcular
Costos de Reuniones	CLP 763.000
Costos de Recolección de Datos	CLP 172.000
Costos de Acciones Correctivas	
Costos de Mejora Continua	
TOTAL	USD 1.355

El costo final de la falla del cojinete de HP se muestra en la tabla 15.

Tabla 15: Resumen pérdida por falla cojinete de HP.
(Fuente: Elaboración propia)

Tabla Resumen Pérdida por Alta Vibración Descanso HP TV Nehuenco 2			
Perdidas por Generación			USD 0
Costo de repuesto			USD 84.000
Costo mano de obra para reparación			USD 62.711
Costo reuniones y búsqueda de evidencias			USD 1.355
Total			**USD 148.066**
Tiempo Indisponible			**0 Días**

Comparación de costos entre falla catastrófica Unidad Blanco y ACR falla cojinete de HP Nehuenco 2

Al realizar la comparación se debe tener en consideración que los procesos donde se manifestaron las fallas son completamente diferentes, sin embargo lo que se pretende comparar es la aplicación o no de la metodología ACR por parte de personal de planta. Los costos asociados a la reconstrucción de la unidad Blanco y la reparación de la TV de Nehuenco 2 representan cuán importante es la toma de decisión acertada a la hora de aplicar la metodología, cuan arraigado están los conceptos de mejora continua en el personal, cuales son las capacidades técnicas del personal de planta a la hora de analizar una falla y proponer medidas de contención, la visión para proponer sistemas predictivos que detecten fallas en sus orígenes, etc.

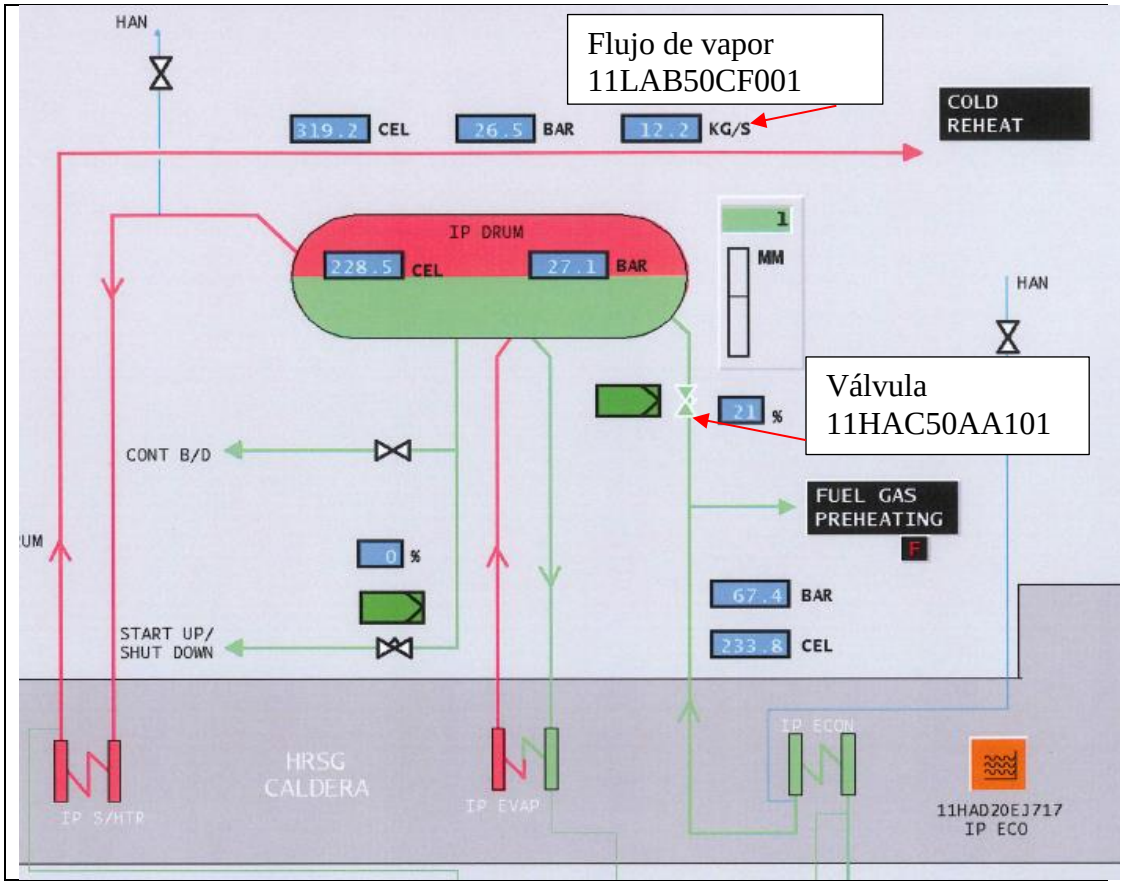
El costo total por la reconstrucción de la Unidad Blanco asciende a **USD 64.828.000** (ver tabla 7) y el costo por reparar el cojinete de HP Nehuenco 2 asciende a **USD 148.066** (ver tabla 13).Lo importante es la forma como el personal de mantenimiento del complejo Nehuenco resuelve el problema aplicando la metodología.

5.2. Falla Válvula Control de Nivel Domo Media Presión Nehuenco 1

Los domos son equipos de caldera que son los encargados de recolectar el vapor producido en los intercambiadores de calor, es aquí donde se produce la interfaz agua-vapor. Cuando existe flujo de vapor hacia la Turbina de Vapor el nivel de agua empieza a disminuir producto del consumo, para mantener el nivel de agua constante en una consigna determinada existe una válvula encargada de suministrar agua de reposición y mantener dicho nivel (control de lazo cerrado nivel de domo).

En la figura 32 muestra la pantalla del DCS con el proceso asociado al control de nivel del domo de media presión.

Figura 32: Diagrama de proceso domo media presión.
(Fuente: DCS T2000 Siemens)



5.2.1. *Descripción del problema*

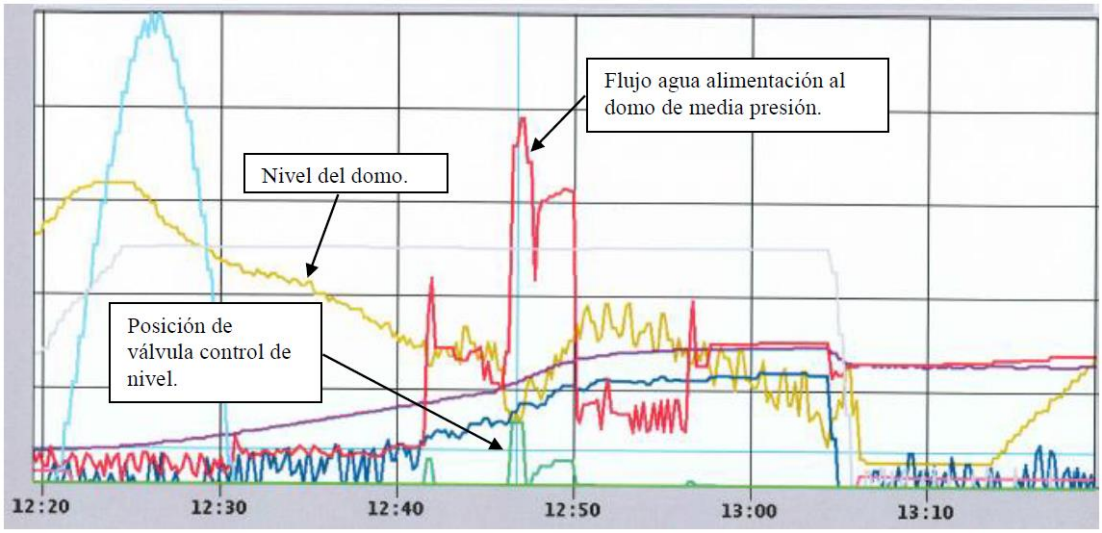
El día miércoles 30 de Diciembre a las 13:06:56 se produce trip de caldera, la alarma que opera en DCS es la siguiente: “11HAY01EZ001 HRSG PROT 1 OF 2”, los eventos previos al trip se muestran en la figura 33.

Figura 33: Eventos de falla.
(Fuente: DCS T2000 Siemens)

13:00:56.172	W	11HAD50CL901	XH20 B	LVL IP DRM 2 OF 3	<-300	MM
13:01:04.362	W	11HAD50CL901	XH20 B	LVL IP DRM 2 OF 3	[<-300]	MM
13:01:18.762	W	11HAD50CL901	XH20 B	LVL IP DRM 2 OF 3	<-300	MM
13:01:40.262	W	11HAD50CL901	XH20 B	LVL IP DRM 2 OF 3	[<-300]	MM
13:01:43.052	W	11QUB11CQ004	XH01 B	SI HP SUH STM	> 20	ppb
13:02:07.872	W	11HAD50CL901	XH20 B	LVL IP DRM 2 OF 3	<-300	MM
13:02:14.972	W	11HAD50CL901	XH20 B	LVL IP DRM 2 OF 3	[<-300]	MM
13:02:32.862	W	11HAD50CL901	XH20 B	LVL IP DRM 2 OF 3	<-300	MM
13:02:48.572	W	11HAD50CL901	XH20 B	LVL IP DRM 2 OF 3	[<-300]	MM
13:03:07.362	W	11HAD50CL901	XH20 B	LVL IP DRM 2 OF 3	<-300	MM
13:03:56.282	A	11HAD50EZ001	XV01 B	IP DRUM LEVEL < MIN 3	<-350	MM
13:03:58.522	A	11HAY01EZ001Z	ZV52 B	HRSG PROT 1 OF 2	TRIP	
13:03:58.622	W	11HAY01EZ001F	ZV51 B	HRSG TRIP BUS	TRIP	
13:03:58.622	W	11HAY01EZ001F	ZV52 B	HRSG TRIP BUS	GT TRIP	

Previo al trip se puede visualizar que operan alarmas de muy bajo nivel del domo de media presión, en la figura 34 se aprecia el control errático del nivel del domo, pequeñas variaciones de apertura de la válvula 11HAC50AA101 producen grandes variaciones de flujo de agua de alimentación al domo de media presión. lo cual al final gatilla el trip de la unidad.

Figura 34: Gráfico control de nivel de domo media presión.
(Fuente: DCS T2000 Siemens)



5.2.2. *Análisis del grado de criticidad del problema*

Según tabla 5 se asigna nivel de gravedad 4, ya que la falla del control de nivel produjo trip de la unidad.

De la tabla 3 se define el nivel de índice de probabilidad de 4, ya se cuenta con antecedentes de ocurrencia de este modo de falla el año 2014.

Al multiplicar los índices de gravedad y probabilidad se obtiene como resultado un índice de criticidad de 20, lo cual al evaluar en la matriz de criticidad corresponde a un valor EXTREMO, se toma la decisión de realizar ACR de forma urgente.

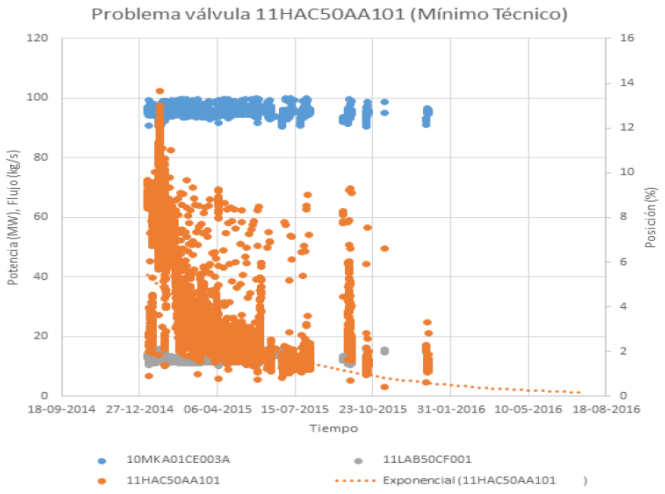
5.2.3. *Recolección de evidencias*

Una de las posibles causas (soportado por el análisis de la figura 34) es la falla interna de la válvula 11HAC50AA101, se plantea la siguiente interrogante:

¿La falla de la válvula 11HAC50AA101 es una falla puntual o existe una degradación en el tiempo?

Para responder la interrogante anterior se realizan gráficos con una ventana de tiempo de 1 año, para ver si existe degradación de la válvula, se confeccionan dos gráfico en modo estacionario, la figura 35 en mínimo técnico y la figura 36 en carga base.

Figura 35: Comportamiento posición de válvula en mínimo técnico.
(Fuente: Elaboración propia)



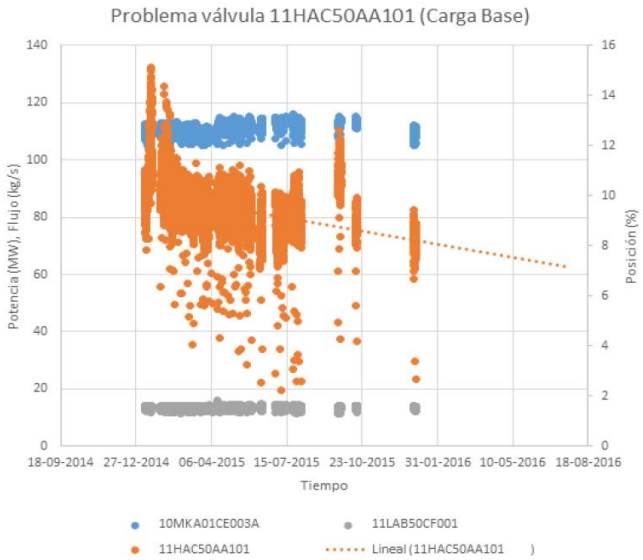
Donde:

10MKA01CE003A: Potencia Turbina a Vapor.

11LAB50CF001: Flujo de vapor hacia Turbina a Vapor.

11HAC50AA101: Posición de válvula agua de alimentación.

Figura 36: Comportamiento posición de válvula en carga base.
(Fuente: Elaboración propia)



De las figuras 35 y 36 se infiere lo siguiente:

- En mínimo técnico la posición de válvula en enero del 2015 estaba en promedio en 7% y en Diciembre del 2015 ya se encontraba con un valor promedio del 2%.
- La alta dispersión de los datos en la figura 35 podría deberse al control errático de la válvula pero que no llegaba a niveles críticos como lo ocurrido el día 30 de Diciembre.
- En carga base, la dispersión de datos es menor y se aprecia claramente una degradación de la válvula.

5.2.4. *Medida de contención*

Al analizar la evidencia se determina como medida de contención realizar una inspección interna de la válvula de agua de alimentación, ya que todo indica que existe un daño interno esto se explica por una disminución de la posición de la válvula a través del tiempo para mantener el nivel del domo, la figura 37 muestra un registros fotográfico de la inspección de la válvula.

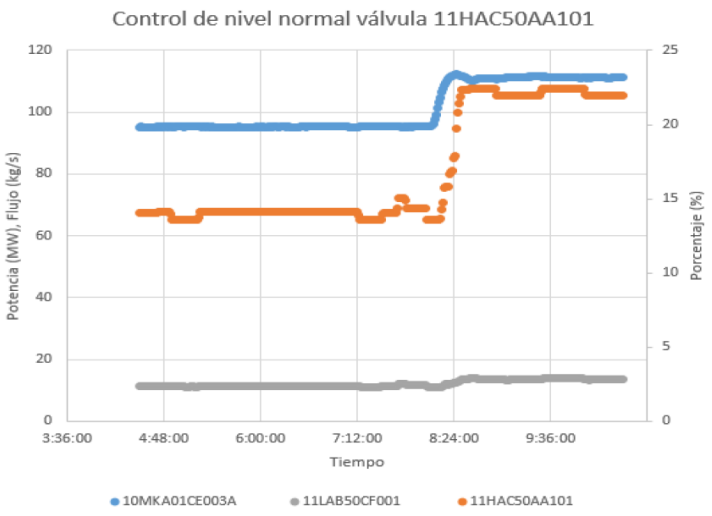
Figura 37: Inspección de canastillo y obturador de válvula agua de alimentación.
(Fuente: Elaboración propia)

El canastillo de la válvula al igual que el obturador evidencia signos de erosión, lo cual explica el aumento de flujo de agua a pequeños incrementos de posición de la válvula de agua de alimentación.

Se procede a cambiar por elementos nuevos.

Luego de la reparación de la válvula, se analizan los datos del arranque del 12 de Enero del 2016, para verificar si la reparación fue exitosa y se retoman valores normales de operación, ver figura 38.

Figura 38: Comportamiento posición de la válvula durante arranque de unidad.
(Fuente: Elaboración propia)



De la figura 38 se deduce lo siguiente:

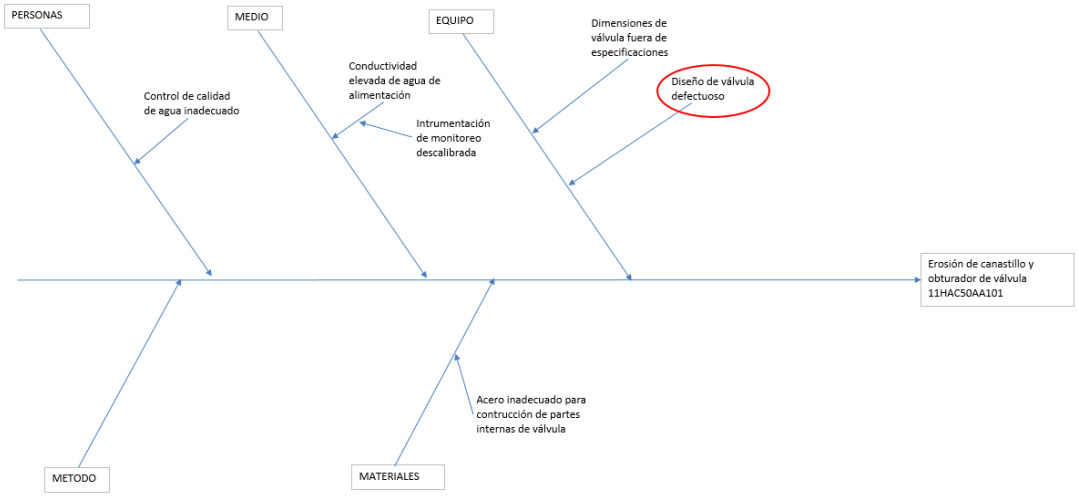
- El valor de posición normal de operación para la válvula 11HAC50AA101 en mínimo técnico es de 14%.
- El valor de posición normal de operación para la válvula 11HAC50AA101 en carga base es de 22%

Comparado con valores históricos, estos representan valores normales de operación.

5.2.5. *Causa Raíz*

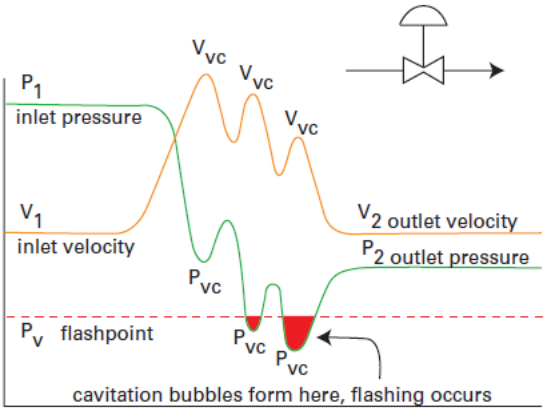
Para llegar a determinar cuál es la causa raíz del problema, se debe partir como base el hallazgo fotográfico de la erosión de las partes internas de la válvula.
La figura 39 muestra el diagrama Ishikawa realizado para determinar cuál es la causa raíz de la falla.

Figura 39: Diagrama Causa-efecto
(Fuente: Elaboración propia)



Se considera como causa raíz condiciones operacionales para la cual la válvula no fue diseñada, la figura 40 explica el fenómeno físico que deteriora progresivamente la válvula.

Figura 40: Erosión por cavitación
(Fuente: CCI DRAG)



Cuando arranca la unidad, la presión que existe en el domo de media presión es 0 bar (aguas abajo de la válvula) y por el otro lado existe la presión de la bomba de agua de alimentación (aguas arriba de la válvula) que son 25 bar, este delta P elevado incrementa la velocidad del fluido el cual al pasar por el obturador y canastillo se sobrepasa el límite de FLAHPOINT (línea segmentada en figura 40) esto produce burbujas de vapor que existen un periodo de tiempo muy pequeño, luego estas burbuja implosan dañando la válvula.

5.2.6. *Acciones correctivas propuestas*

La tabla 16 muestra las acciones correctivas tomadas, cabe destacar que la acción correctiva de reemplazar el canastillo y obturador de la válvula, en este caso, corresponde a la medida de contención.

Tabla 16: Acciones correctivas.
(Fuente: Elaboración propia)

Acción correctiva	Responsable	Plazo	Status
Reemplazar canastillo y obturador dañado.	J. Salgado	31-12-2015	Ejecutado
Gestionar comprar repuestos de partes internas de válvula	J. Salgado	15-01-2016	Ejecutado

Con la compra de repuesto y tener éstos en planta, se asegura disminuir los tiempos de mantenibilidad (tiempo de reparación) y que a la larga el impacto financiero por tener el ciclo combinado fuera de servicio sea menor.

5.2.7. *Acciones de mejora continua*

La tabla 17 muestra las acciones de mejora continua que se van a realizar, se basa en medidas predictivas, ya que en el análisis resultante se pudo apreciar una degradación de la válvula a través del tiempo.

Tabla 17: Acciones de mejora continua.
(Fuente: Elaboración propia)

Mejora	Responsable	Plazo	Status
Realizar un control estadístico de proceso para el seguimiento de variables críticas.	M. Zúñiga	Julio-2016	Pendiente
Instruir a personal de operaciones en el uso de Excel, para realizar gráficos de tendencia.	M. Zúñiga	Agosto-2016	Pendiente
Evaluar técnicamente cambio de tecnología de válvula (nuevo diseño de canastillo y obturador)	P. Orellana	Agosto-2016	Pendiente

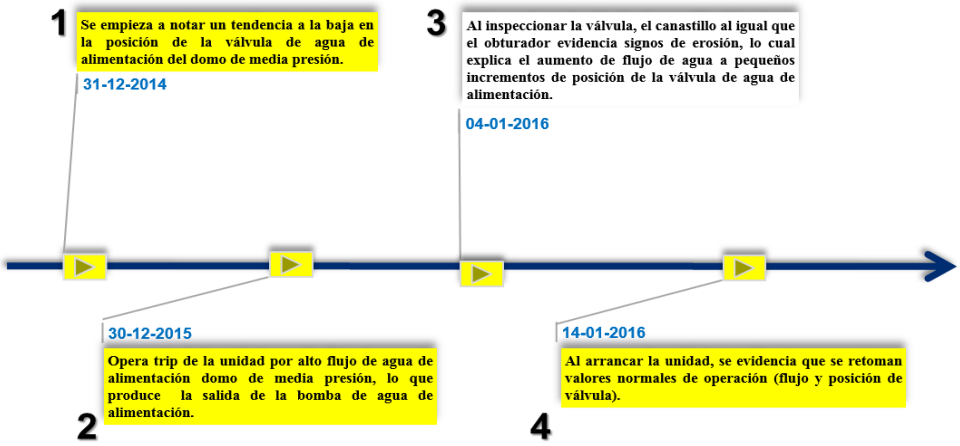
Los síntomas de falla de la válvula de agua de alimentación empiezan a evidenciarse a partir de diciembre del 2014 y luego de un año, producto de un deterioro de sus partes internas, se produce el trip de la unidad en diciembre del 2015, es necesario que personal de operaciones cuente con un método predictivo que pueda detectar alteraciones a largo plazo de los parámetros de funcionamiento normal. Una de las posibles herramientas de análisis que se podrían implementar sería Control Estadístico de Proceso.

El cambio en el diseño interno de la válvula asegura la confiabilidad de ésta.

5.2.8. *Resumen línea de tiempo*

La figura 41 muestra la línea de tiempo de los eventos ocurrido antes y después de la falla de la válvula de agua de alimentación al domo de media presión.

Figura 41: Línea de tiempo
(Fuente: Elaboración propia)



5.2.9. *Análisis de costos*

Los costos asociados a la reparación de la válvula de agua de alimentación se dividen en:

- Costos por indisponibilidad de planta
- Costos asociados a los repuestos.
- Costos asociados a la mano de obra.

<u>Costos por indisponibilidad de planta</u>

Los siguientes datos son necesarios para calcular los costos de indisponibilidad:

Fecha Inicio de avería: 30 de Diciembre 2015 a las 13:00

Fecha fin de avería: 12 de Enero 2016 a las 08:00

Potencia instalada Nehuenco 1: 360 MW

La tabla 18 muestra el cálculo de las pérdidas por indisponibilidad de planta durante los 14 días que estuvo fuera de servicio la unidad.

Tabla 18: Cálculos por pérdida de indisponibilidad de planta.
(Fuente: Elaboración propia)

Fecha	CMrg Barra (USD/MW-h)	CMrg Nehuenco (USD/MW(h)	Margen (USD/MW-h)	Horas Indisponible	P. Nehuenco 1 (MW)	Perdidas (USD)
30-12-2016	41,7	30	11,7	11	360	46332
31-12-2016	41,5	30	11,5	24	360	99360
01-01-2017	30,20833333	30	0,208333333	24	360	1800
02-01-2017	38,36666667	30	8,366666667	24	360	72288
03-01-2017	39,225	30	9,225	24	360	79704
04-01-2017	47,55	30	17,55	24	360	151632
05-01-2017	68,8625	30	38,8625	24	360	335772
06-01-2017	83,625	30	53,625	24	360	463320
07-01-2017	76,0125	30	46,0125	24	360	397548
08-01-2017	62,85833333	30	32,85833333	24	360	283896
09-01-2017	59,25833333	30	29,25833333	24	360	252792
10-01-2017	51,6875	30	21,6875	24	360	187380
11-01-2017	55,35	30	25,35	24	360	219024
12-01-2017	56,7375	30	26,7375	8	360	77004
			Total	**307**		**USD 2.667.852**

Si bien el costo marginal declarado es de 81,3 USD/MW-h (ver tabla 1), existe una modalidad de contrato con los proveedores de combustible que se llama "Take or Pay" donde se contrata una cantidad de m^3 y la empresa está obligada a consumir este combustible, si no se consume igual se debe pagar. Colbún se asegura que se consumirá declarando en el CDEC-SIC la máquina con 0 Cmg (internamente en Colbún se estima un costo marginal que es un dato confidencial, pero se estima en 30 USD/MW-h).

Las pérdidas ascienden a **USD 2.667.852**

Costos asociados a los repuestos

Dado que la reparación de la válvula se basó solo en el cambio del obturador y canastillo (cambio de partes internas), los costos por reparación se asocian a estos elementos, la tabla 19 muestra el costo asociado a la reparación de la válvula.

Tabla 19: Costo reparación de válvula
(Fuente: Elaboración propia)

Costo reparación de válvula		
Costo Canastillo		USD 5.000
Costo Obturador		USD 10.000
Materiales		USD 500
Total		**USD 15.500**

El costo de reparación asciende a **USD 15.500**

Costos asociados a la mano de obra

Si bien el tiempo de indisponibilidad fue de 307 horas, una vez fuera de servicio la unidad es necesario realizar los trabajos que se postergan con máquina fuera de servicio. La reparación de la válvula se estimó en 48 horas, la tabla 20 muestra el cálculo por mano de obra.

Tabla 20: Costo mano de obra (reparación válvula)
(Fuente: Elaboración propia)

Costos de mano de obra				
	Unidades	**$/HH**	**H. reparación**	**USD**
Técnicos	2	7000	48	1000
Especialista	1	10000	5	74
Supervisor	1	15000	2	45
Total				**USD 1.119**

El costo en mano de obra para reparar la válvula asciende a **USD 1.119**

El costo total de indisponibilidad de planta producto de la falla de la válvula de la válvula de agua de alimentación al domo de media presión asciende a **USD 2.684.471**

Una vez determinado los costos de indisponibilidad por la reparación de la válvula se deben determinar los costos por erradicar este modo de fallo llevando a cabo las tareas de mejora continua, los costos se dividen en:

- Costos asociados a la HH ocupada para realizar el ACR.
- Costos por cambio en el diseño de válvula.

Costos asociados a la HH ocupada para realizar el ACR

La tabla 21 representa las HH que cada integrante ocupa para realizar la tarea encomendada, estas HH deben ser cuantificadas por el mismo integrante del equipo.

Tabla 21: Horas-hombres destinadas a recolectar evidencia.
(Fuente: Elaboración propia)

Tareas Recolección de Datos e Informaciones					
ITEM	Tarea	Descripción	Responsable	Cargo	HH ejecución tarea
1	Realizar informe de falla	Se debe realizar informe de falla, para tener un punto de partida para la investigación de la avería.	Marcelo Aspe	Especialista	3,0
2	Levantar datos operacionales	Se necesita realizar un levantamiento de los datos para realizar gráficos de tendencias.	Mitchell Zúñiga	Especialista	3,0
3	Investigar nuevas tecnologías	Investigar nuevas tecnologías para cambiar partes internas de válvula.	Rodrigo Mieres	Especialista	2,0

La tabla 22 muestra la cantidad de horas por reunión y la cantidad de reuniones que se realizaron para llegar a determinar la causa raíz de la falla.

Tabla 22: Cantidad de horas y reunión realizadas.
(Fuente: Elaboración propia)

Horas de Reuniones								
Item	Integrantes	Cargo	Reunión 1	Reunión 2	Reunión 3	Reunión 4	Reunión 5	Total Horas
1	Aldo Morales	Supervisor	2	3				5
2	Mitchell Zúñiga	Especialista	2	3				5
3	Rodrigo Mieres	Especialista	2	3				5
4	Marcelo Aspe	Especialista	2	3				5

La tabla 23 muestra el costo total que tiene la investigación del ACR, que implica el costo por búsqueda de evidencias y reuniones.

Tabla 23: Costo total reuniones y búsqueda de evidencias para ACR.
(Fuente: Elaboración propia)

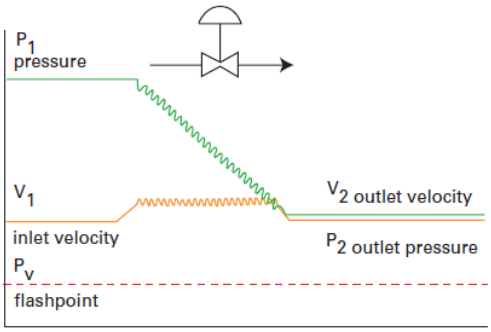
Costo de ACR	Calcular
Costos de Reuniones	USD 119,05
Costos de Recolección de Datos	USD 11,90
Costos de Acciones Correctivas	
Costos de Mejora Continua	
TOTAL	USD 131

El costo asociado a la investigación y busque de la causa raíz de la falla asciende a **USD 131**

<u>Costos por cambio en el diseño de válvula.</u>

Existe en el mercado una válvula con tecnología que elimina el problema descrito en la figura 40, el diseño interno de canastillo es laberíntico esto permite mantener una velocidad de fluido constante a medida que pasa por el interior de la válvula, esto impide que se entre en la zona de FLASHPOINT, ver figura 43.

Figura 42: Canastillo laberíntico
(Fuente: CCI DRAG)



El costo para cambiar la válvula y migrar a tecnología DRAG, asciende a **UDS 38.600**

6. CONCLUSIONES

Los costos asociados a las fallas del caso 1 ascienden a **USD 64.828.000** y el costo asociado a la falla en el caso 2 asciende a **USD 2.684.471,** como son fallas que evolucionan en el tiempo es muy probable que en un futuro se vuelvan a presentar el mismo modo de fallo con sus respectivas consecuencia, la idea de realizar un ACR es erradicar este modo de fallo para que no vuela a ocurrir o se mitiguen los efectos de la falla, es importante que el personal de mantenimiento tome conciencia de los beneficios de esta metodología.

Gestionar los ACR es una parte crítica de la metodología, sirve de historial, y a su vez muestra una forma seria de abordar las problemáticas que se suscitan en la empresa. Una buena gestión deja entrever la calidad de profesionales que está realizando el análisis.

Los inconvenientes que se presentan al momento de buscar evidencias es el desconocimiento de herramientas que potencian los análisis por parte del personal que realiza estos, es necesario formar a especialistas con una alta preparación en manejo de sistemas de información.

La persona que lidera los ACR debe tener una alta capacidad técnicas y habilidades sociales elevadas, ya que en la dinámica de las reuniones se presentan situaciones complejas en el ámbito de relaciones personales, el líder debe ser capaz de resolver estas divergencias, buscar soluciones y acuerdos que convengan a la empresa.

7. REFERENCIAS

Allen, F., Myers, S., & Brealey, R. (2007). *Principio de Finanzas Corporativas.* McGraw-Hill.

Arata, A., & Furlanetto, L. (2005). *Manual de gestión de activos y mantenimiento.* Santiago de Chile: RIL.

Ben-Daya, M., & Duffuaa, S. (2009). *Handbook of Maintenance Management and Engineering.* London: Springer.

EMERSON. (2002). Comprendiendo las Estratégias de Mantenimiento. *Comprendiendo las Estratégias de Mantenimiento*. PlantWeb University.

Fedele, L. (2011). *Methodologies and techniques for advanced maintenance.* London: Springer.

Moubray, J. M. (1991). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.* North Carolina: Aladon.

Palomo Vadillo, M. T. (2013). *Liderazgo y Motivación de Equipos de Trabajo.* Madrid: ESIC.

Van Aartsengel, A., & Kurtoglu, S. (2013). *Handbook on Continuous Improvement Transformation.* London : Springer.