

Método de análisis de fallas aplicado en centrales hidroeléctricas

Fault analysis approach applied
in hydroelectric plants



Método de análisis de fallas aplicado en centrales hidroeléctricas¹

Fault analysis approach applied in hydroelectric plants

Eduardo Vargas Castillo², Nayiver Gladys Caicedo Delgado³, Juan David Ortegón Henao⁴

Artículo recibido en noviembre de 2017; artículo aceptado en septiembre de 2018.

Este artículo puede compartirse bajo la Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional y se referencia usando el siguiente formato: Vargas, C., Caicedo, D. & Ortegón, H. (2019). Método de análisis de fallas aplicado en centrales hidroeléctricas. *I+D Revista de Investigaciones*, 13 (1), 68-84. DOI: <https://doi.org/10.33304/revinv.v13n1-2019006>

Resumen

En este trabajo se describen las diferentes metodologías de análisis de causa raíz (ACR) referenciadas en la literatura y se presentan en detalle cada uno de los pasos de la metodología Proact, utilizada para analizar la falla que se presentó en los álabes móviles de las turbinas Francis en la central hidroeléctrica Alto Anchicayá. Según criterios de la Empresa de Energía del Pacífico - EPSA, este tipo de falla es compleja en una central de generación y requiere un grado de intervención prioritario; por tal razón, esta falla fue analizada utilizando el software Proact Suite V 4 adquirido por esta empresa como herramienta para facilitar, sistematizar y estandarizar los diferentes análisis de falla. Como resultado de esta metodología se determinaron tres elementos de la turbina involucrados en la falla: bujes intermedios, espárragos y empaques; esta identificación permitió establecer medidas correctivas para disminuir su ocurrencia. La causa principal estaba localizada en los bujes intermedios del álabe móvil, y se determinó que el material de los bujes que más se ajusta a las condiciones de trabajo de los álabes son los bujes D-glide.

Palabras clave: álabes móviles, buje, empaques, espárragos, ACRJ.

Abstract

In this paper, the different root cause analysis (ACR) methodologies referenced in the literature were described and each step of the PROACT methodology are presented in detail used to analyze the failure that was presented in the mobile blades of the Francis turbines in the hydroelectric of Alto Anchicaya. According to Empresa de Energía del Pacífico - EPSA criteria, this type of failure, because it is complex in a generation plant, requires a priority level of intervention, for this reason, this failure was analyzed using the Proact Suite V 4 software as a tool to facilitate the follow-up of the steps of the methodology and systematize and standardize the different failure analyzes that have occurred in their different generation plants. As a result of this methodology, three elements of the turbine involved in the fault were determined: Intermediate bushings, Asparagus and Packs, this identification allowed to establish corrective measures to reduce its

1. Artículo de investigación científica de enfoque cualitativo y cuantitativo, resultado de un proyecto de investigación culminado perteneciente al área de Ingeniería, subárea de Ingeniería Eléctrica, desarrollado en el Grupo de Investigación en Alta Tensión - Gralta, financiado por la Universidad del Valle y Empresas de Energía del Pacífico - EPSA, (Cali, Colombia). Dirección: Calle 13 No. 100-00, PBX: +57 2 321 21 00, ext.: 3276. Fecha de inicio: agosto de 2015. Fecha de terminación: febrero de 2017.

2. Ingeniero Electricista, Universidad del Valle (Cali, Colombia). Dirección: Calle 13 No. 100-00, PBX: +57 2 3212100, ext.: 3276. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8917-5744>. Correo institucional: eduardo.vargas@correounivalle.edu.co.

3. Ingeniera Electricista, Universidad del Valle. Doctorado en Ingeniería, Universidad del Valle (Cali, Colombia). Docente- investigadora del Grupo de Investigación en Alta Tensión - Gralta. Universidad del Valle (Cali, Colombia): Dirección: Calle 13 No. 100-00. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8679-7465>. Correo institucional: nayiver.gladys.caicedo@correounivalle.edu.co.

4. Ingeniero Electricista, Universidad del Valle. Maestría en Ingeniería, Universidad del Valle (Cali, Colombia). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1945-581X>. Correo institucional: juan.ortegon@correounivalle.edu.co.

occurrence. The main cause was located in the intermediate bushings of the mobile blade and determined that the material of the bushings that best fits the working conditions of the blades are the D-glide bushings.

Keywords: mobile blades, bushings, seal, screw, ACR.

Introducción

Las centrales hidroeléctricas se componen de muchos elementos, y, por lo tanto, se pueden presentar distintos tipos de fallas que pueden ocasionar deterioro en su funcionamiento y disminución de su vida útil; además, estas fallas tienen consecuencias importantes a nivel productivo y económico, ya que pueden tener un alto costo de reparación y causar pérdidas por lucro cesante. Por esta razón, es importante conocer los diferentes métodos que permiten encontrar el origen de la falla (Pascal & Rodríguez, 2016) con el fin de mejorar la confiabilidad y la seguridad de la central hidroeléctrica.

Aunque existen diversos métodos para encontrar el origen de las fallas, estos no se han implementado específicamente para una central hidráulica. En consecuencia, analizar la causa raíz permitirá identificar oportunidades de mejora en las prácticas de mantenimiento en las centrales hidroeléctricas, y mejorar diseños y material de los equipos disminuyendo la ocurrencia de cualquier tipo de falla.

En este trabajo se presentan las diferentes metodologías utilizadas en el análisis de causa raíz que permiten encontrar el origen de un problema, determinando medidas correctivas para disminuir su ocurrencia. Además, se aplicó la metodología ACR a una falla repetitiva en los álabes móviles de las turbinas Francis en la central hidroeléctrica Alto Anchicayá, consistente en una fuga de agua. Después del análisis se encontraron tres elementos involucrados en el problema: bujes intermedios, espárragos y empaques. Finalmente, se investigaron estos tres elementos y se encontró que el origen del problema está en los bujes.

Metodologías análisis de causa raíz (ACR)

Cada año, en las centrales hidroeléctricas se presenta un determinado número de fallas en las máquinas y equipos que causan pérdidas económicas debido a los tiempos de parada para realizar un mantenimiento. Para mejorar la confiabilidad de las centrales hidroeléctricas se propone un método de estudio llamado análisis de causa raíz (Lárez, 2012).

La importancia de aplicar ACR en las organizaciones es que se pueden lograr beneficios tales como:

- Reducción de la exposición al riesgo (personal, seguridad operacional).

- Mejoramiento en la eficiencia de los procesos, debido a la prevención y eliminación sistemática de fallas.
- Reducción de costos de reparación al ser identificados y corregidos los modos de falla crónicos.
- Desarrollo de un plan de acciones correctivas justificado por costo y riesgo.
- Implementación de un proceso de revisión y supervisión de requerimientos con el fin de prevenir la recurrencia de eventos no deseados.

El análisis de causa raíz es un proceso ordenado que permite identificar las causas que provocaron una situación no deseada, una falla, problema, accidente, incidente, etc. Además, el ACR emplea un conjunto de técnicas y herramientas capaces de identificar los puntos claves donde ocurren los problemas, logrando así resolver el origen del problema en lugar de solo corregir los síntomas (Center Inc., 2008).

Un análisis de causa raíz puede realizarse mediante diferentes metodologías, las cuales están estructuradas por etapas que permiten establecer a fondo las causas de los problemas que se hayan presentado; de esta manera, se desarrollan planteamientos eficaces para obtener soluciones efectivas.

A continuación, se describen las cinco metodologías más usadas en el análisis de causa raíz:

- Proact

El análisis de causa raíz Proact es una metodología desarrollada por Reliability Center Inc. que permite identificar las causas raíz físicas, humanas y latentes de cualquier tipo de falla o evento, facilitando herramientas que permiten documentar y comunicar el análisis del problema, logrando obtener recomendaciones y conclusiones que permiten llevar a cabo las acciones correctivas (Kim, Baek & Yoon, 2008).

A diferencia de metodologías que se preguntan ¿por qué sucedió tal evento?, la metodología Proact ese plantea ¿cómo podría haber sucedido tal evento?, de esta manera les a los investigadores más posibilidades de respuesta de ocurrencia del evento.

El nombre Proact se refiere, por sus siglas en inglés, a las etapas a seguir para el desarrollo de la metodología:

- Preserve: Preservar la información del evento.
- Order: Ordenar el equipo de análisis.
- Analyze: Analizar el evento.

Comunicate: Comunicar los hallazgos y emitir las recomendaciones y conclusiones.

Tracking: Seguimiento de los resultados finales.

• TapRoot

Esta metodología fue desarrollada por Mark Paradies en 1991, después de haber estado en la Marina durante la guerra nuclear, en la cual observó los errores de los operadores y mecánicos aun estando bien entrenados. El análisis de causa raíz TapRoot utiliza procesos y técnicas para investigar, analizar y desarrollar acciones correctivas para buscar las causas fundamentales de fallas, accidentes, incidentes cotidianos, problemas de producción, errores de fabricación, errores humanos, problemas de mantenimiento, etcétera, es decir, en todo tipo de problemas críticos. Una de las ventajas de esta metodología es que se puede utilizar de forma reactiva para prevenir la recurrencia de un evento, o de forma proactiva para encontrar maneras de mejorar el rendimiento ante un accidente grave (Doshi & Trivedi, 2013).

La metodología TapRoot es utilizada en una variedad de industrias tales como la aeroespacial, de telecomunicaciones, química, petroquímica, de construcción, exploración y producción de petróleo, entre otras (Dumphily *et al.*, 2014; Kim, Baek & Yoon, , 2008).

El proceso de análisis de causa raíz TapRoot se lleva a cabo mediante siete etapas, donde en cada una es utilizada una herramienta de investigación establecida por el *software*:

- Plan de investigación.
- Determinación de la secuencia de acontecimientos.
- Definición de los factores causales.
- Análisis de cada factor de causas.
- Análisis de causas genéricas.
- Desarrollo y evaluación de las acciones correctivas.
- Presentación de informes e implementación de acciones correctivas.

• Apollo

El análisis de causa raíz Apollo es una metodología desarrollada por Dean L. Gano en 1987, después de años de experiencia de investigación en la industria nuclear. Apollo es un proceso lógico y práctico que permite identificar las relaciones de causa y efecto de una falla o evento, evitando que el problema se repita (Gano, 2011).

El método ACR Apollo requiere que todas las causas sean verificables con pruebas. Si no hay evidencia para apoyar una causa, esta se debe identificar con un signo de interrogación (?). Un signo de interrogación en una labor de investigación indica la falta de información necesaria

para seguir con el análisis, advirtiendo la necesidad de una búsqueda exhaustiva de más información.

La esencia de esta metodología se basa en la comprensión de cuatro principios de causalidad que permiten entender su lógica:

- Causa y efecto son la misma cosa.
- Cada efecto tiene al menos dos causas en forma de acciones y condiciones.
- Causas y efectos son parte de una serie continua infinita de causas.
- Un efecto solo existe si sus causas existen en el mismo espacio y marco de tiempo.

• Reason

El análisis de causa raíz Reason es una metodología desarrollada por James Reason, que guía al investigador a través de preguntas correctas en el momento adecuado, descubriendo los hechos relevantes, las relaciones causales y las posibles soluciones. La metodología Reason es aplicada a las industrias químicas, del petróleo, manufacturera y aeroespacial entre otras (Lederer, 2004).

Esta metodología cuenta con un *software* que ofrece una perspectiva adicional en la investigación del accidente, incidente o evento. Este *software* ayuda al investigador a encontrar el "por qué", el "cómo" y "cuándo", proporcionando preguntas enfocadas lógicamente por cada hecho que se encuentre. A continuación, se describen las etapas a seguir:

- Identificar relaciones causales.
- Construir un modelo del evento.
- Verificar las relaciones causales.
- Descubrir causas y oportunidades correctivas.
- Comparar opciones de solución.
- Informar los resultados.
- Informar las lecciones aprendidas.
- Difundir el conocimiento.

• DMAIC

El análisis de causa raíz Dmaic es una metodología desarrollada por la empresa Motora en los años 1990 y fue utilizada por General Electric en 1995. Esta metodología estructurada consiste básicamente en cinco etapas que son: definir, medir, analizar, mejorar y controlar (Paradies & Unger, 2000).

- Definir el equipo de investigación, el problema, el alcance, la meta y el plan.
- Medir el desempeño actual del proceso, recolectar datos.
- Analizar los datos e identificar las causas raíz del problema,

identificar oportunidades de mejora y desarrollar un diagrama de flujo.

- Mejorar y generar diferentes soluciones para cada una de las causas raíz, seleccionar la mejor solución y evaluar los modos de falla de la solución.

- Controlar que el objetivo es asegurar que la solución sea sostenible y no permita que ocurra otra vez el problema.

Algunas comparaciones de las metodologías mencionadas anteriormente se basan en los principios de investigación y lógica que se deben cumplir para obtener un proceso de análisis de causas raíz, el cual debe proporcionar una comprensión clara y fácil de entender, con el fin de obtener un análisis efectivo (Ziedelis & Noel, 2011).

Es necesario establecer qué tipo de causas raíz se van a encontrar y presentar una evidencia clara para justificar las relaciones de causa y efectos, con el fin de proporcionar soluciones que logren prevenir la recurrencia de un evento no deseado (Fallis, 2013).

Una de las ventajas de la metodología Proact es que abarca todas las clases de causas existentes, logrando así solucionar el problema de raíz. Las causas físicas tienen su origen, de alguna manera, en la intervención humana, la cual, a su vez, se presenta por algún problema en los sistemas que componen las organizaciones; a estas últimas se les conoce como causas raíz latentes de un evento no deseado y serán las que se reconocerán como las verdaderas causas raíz, ya que al descubrir las causas latentes se podrá prevenir o evitar su recurrencia en el mismo equipo o sistema.

Otra ventaja de la metodología Proact es que no se necesita ser un experto para llevar a cabo un análisis, tan solo con un facilitador que tenga conocimiento en el proceso puede ser capaz de direccionar y llevar a cabo el análisis acompañado de un grupo especializado.

Por esta razón el análisis de causa raíz Proact es la metodología más apropiada para ser desarrollada en una central hidroeléctrica.

Procedimiento de la metodología Proact

Para llevar a cabo un análisis de causa raíz empleando la metodología Proact se deben cumplir ciertos pasos. La implementación de esta metodología ha sido desarrollada a partir de revisiones bibliográficas y de reuniones con los ingenieros de la central hidroeléctrica Alto Anchicayá de EPSA, estableciéndose los siguientes pasos:

Paso 1. Identificación del evento o tipo de falla a analizar

Fallas: Se entiende como una falla la pérdida parcial o total de

la capacidad de un activo para cumplir la función "requerida".

Las fallas se clasificarán en tres grupos:

- **Falla crítica:** Pérdida total de la capacidad de un activo para cumplir la función "requerida". PARADA TOTAL.
- **Falla NO crítica:** Pérdida parcial de la capacidad de un activo para cumplir la función "requerida".
- **Falla potencial:** Se cumple con la función requerida, pero existe una condición no deseada en un activo que, de no ser tratada, provocará el fallo funcional del activo.

Paso 2. Conformación de equipos de análisis de eventos

Los equipos de trabajo deben ser multidisciplinarios, conocedores del tema del evento y del funcionamiento del sistema fallado. Se espera que en el equipo conformado se presenten los siguientes roles:

- **Facilitador:** Es la persona capacitada en la metodología ACR; debe guiar al grupo en el análisis del evento y, por lo tanto, debe tener claridad en los conceptos de la metodología.
- **Líder:** Persona con ascendencia que debe incentivar en el grupo una mentalidad de búsqueda de las verdaderas causas raíz.
- **Personal de operación especializado** (operadores, ingenieros eléctricos, mecánicos, etc.)
- **Personal de mantenimiento especializado** (técnicos eléctricos, mecánicos, instrumentistas)
- **Personal de planeación**
- **Personal externo especializado**, en caso de requerirse.

Paso 3. Recolección de información

La información recopilada debe ser confiable. Se debe recopilar la información de manera organizada y transcribirse en los formatos establecidos.

A. Objetivos en la recolección de la información:

- Reconstruir lo ocurrido antes, durante y después de la falla.
- Comprender el funcionamiento normal de cada uno de los elementos del sistema.
- Comprender el funcionamiento normal de todo el sistema.
- Identificar las variables físicas que evidenciaron el mal funcionamiento del sistema (síntomas).
- Identificar los elementos del sistema que determinaron la pérdida parcial o total de la función del sistema.

B. Recolección de información en formatos:

Para recolectar la información de manera organizada se propone utilizar la teoría de las 5P: (posición, parte, papel, personas y paradigmas).

- Ubicación temporal y espacial de la falla.
- Parte física fallada.
- Personal relacionado con la falla.
- Descripción detallada de la falla.

Paso 4. Documentos de los elementos del sistema fallado para estudiar

Se debe recoger la siguiente información del sistema fallado:

- Diagramas de flujo o flujograma del sistema fallado.
- Planos eléctricos, mecánicos, civiles.
- Manuales del fabricante de los equipos que integran el sistema fallado.
- Manuales de operación normal del sistema fallado.
- Registros históricos de las variables asociadas al sistema, antes, durante y después de la falla.
- Condiciones de operación antes de la falla.
- Bitácora (papel y medio magnético).
- Planes de mantenimiento.
- Órdenes de trabajos.
- Informes técnicos de fallas similares.
- Informe del levantamiento de la falla actual.
- Evidencias físicas de la falla.
- Listado de rarezas encontradas en el sitio de la falla.

Paso 5. Realizar el análisis del funcionamiento de todo el sistema fallado

Se deben realizar reuniones con el personal que opera, mantiene y repara los diferentes elementos del sistema. En estas reuniones se debe:

- Realizar un diagrama de ambiente del sistema que falló. Es decir, construir un esquema donde se representan los elementos que hacen parte del sistema, la interconexión entre ellos y con elementos de otros sistemas y la interrelación

mediante señales de entrada y salida de cada uno de estos elementos con respecto al sistema fallado.

- Realizar una tabla donde se especifiquen las señales de entrada y salida del sistema fallado. Detallar el tipo de señal: dato, variable analógica o señal binaria, especificar si es de entrada o salida del sistema, rangos de operación de las señales y unidades métricas.
- Identificar cada uno de los elementos que componen el sistema fallado.
- Construir un diagrama funcional del sistema fallado. Colocar en el lado izquierdo del diagrama los datos y/o variables de entrada, en el centro, los bloques con cada subfunción o elemento del sistema y su interrelación; finalmente, ubicar en el lado derecho del diagrama los datos y señales de salida del sistema.
- Identificar las condiciones de operación del sistema antes de la falla.
- Realizar un análisis de las señales registradas recopiladas del sistema antes, durante y después de la falla.

Paso 6: Generar el árbol lógico

El árbol lógico es un diagrama como el que muestra la Figura 1, el cual, según Contreras, Lucietto, Santos y Aguillón (2010), es importante para:

- Representar de forma gráfica, sistémica y estructurada la LÓGICA de lo ocurrido.
- Identificar el evento y los modos ocurridos.
- Identificar las hipótesis y verificarlas para descartarlas o convertirlas en causas.
- Identificar los niveles de las fallas de los elementos y/o componentes también llamadas causas directas.
- Identificar los niveles de fallas humanas o causas intermedias de origen de los errores humanos.
- Identificar los niveles de las causas raíz que representan las deficiencias del sistema u organización.

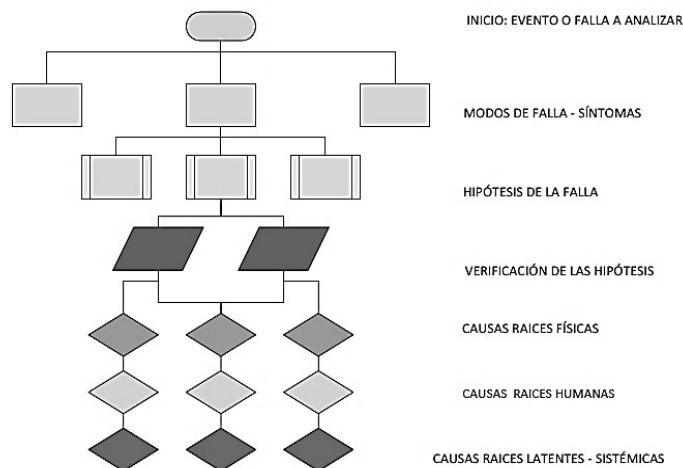


Figura 1. Modelo del diagrama lógico - Análisis de causa raíz. Fuente: Autores.

A. Descripción del evento analizar

El evento es la falla presentada, su descripción debe hacerse de forma sencilla, precisa y explícita. Esta descripción no incluye qué fallo y por qué, pues es una descripción sencilla que permite comprender la falla presentada. A continuación, se describen los eventos a los cuales se justifica realizar ACR:

Eventos esporádicos:

- Generalmente, son acontecimientos dramáticos.
- Demandan atención urgente.
- Ocurren con poca frecuencia y son de alto impacto.
- Consumen mucho tiempo para ser restaurados.
- Son eventos únicos que tienen un alto impacto.
- Normalmente, conllevan grandes pérdidas.

B. Establecer los modos de falla (síntomas)

El modo de falla es el efecto a través del cual se observa que un activo ha fallado. Los modos de falla se deben entender como el síntoma, es decir, la manera a través de la cual se detecta que un equipo está en estado de falla, en cualquiera de sus tipos (falla crítica, falla parcial y falla potencial).

En esta etapa del proceso el equipo de trabajo debe establecer todos los posibles modos de fallas que hayan dado lugar al evento en estudio; estos modos de fallas alimentan la segunda línea del árbol lógico. Estos modos de falla no son hipótesis ni causas, y se debe tener claridad sobre su definición.

Se pueden asignar porcentajes a los modos de falla, los cuales indican el impacto total causado por cada uno de ellos (frecuencia x consecuencias).

C. Definir las hipótesis y verificarlas

Las hipótesis son la tercera etapa de la metodología Proact y se pretende dar respuesta a la pregunta ¿cómo puede ser?

Cada posible causa representa una hipótesis, la cual debe ser validada o descartada por el equipo de trabajo por medio de la información obtenida. Si con esta información no es posible tomar una decisión sobre las hipótesis, pueden aplicarse las siguientes herramientas:

- Análisis de falla: utilizar técnicas complementarias (diagrama de Pareto, espina de pescado, esquema de relaciones).
- Realizar pruebas en sitio: aislamiento, análisis fisicoquímico, pruebas eléctricas o mecánicas, etc.
- Verificación de datos estadísticos y mantenimiento.
- Verificación de registros de equipos (relés y software de control).

- Realizar nuevas entrevistas con operadores e ingenieros de la central.
- Realizar consultas a expertos.

Todas las hipótesis deben ser analizadas para ser validadas o rechazadas. En caso de ser rechazadas, se descartan, pero no se eliminan del árbol lógico.

D. Determinar las causas físicas de la falla y verificarlas

Una vez verificadas las hipótesis deben encontrarse las causas raíz físicas. Estas causas suelen ser evidentes, pues están constituidas por los elementos o componentes que hacen parte del sistema y que están averiados físicamente. De esta manera, si se reemplazan dichos elementos se elimina de forma temporal el problema.

E. Determinar las causas humanas y verificarlas

Son aquellas causas en las que interviene el ser humano. Esta intervención de las personas pueden ser la causa directa o indirecta de los eventos analizados, los cuales, típicamente, están asociados al error humano.

En este punto del análisis es importante tener cuidado de no tomar represalias con las personas que cometieron el error. El cambio de personal NO elimina el problema de fondo, solo refiere un movimiento a nivel táctico, ya que esta no es la causa raíz.

F. Determinar las causas raíz latentes

Son aquellas causas raíz donde el sistema o la organización permiten que existan fallas humanas y que, a su vez, estas generan fallas en los componentes. Típicamente, estas causas raíz están asociadas a las deficiencias latentes de la organización. Se conocen también como causas raíz sistémicas.

Paso 7. Determinación de medidas correctivas y preventivas

El grupo de trabajo debe establecer un plan de acción claro, según los parámetros de la compañía. El plan de acción para un evento debe buscar una manera de solucionar todos los tipos de causas raíz encontradas para evitar que vuelva a presentarse la falla. Además, se debe compartir información para no tener esta falla en otras centrales de generación.

Luego, se debe verificar la eficacia de las acciones presentando evidencia de que las recomendaciones del plan de acción fueron implementadas en la central.

Descripción del sistema en falla

El sistema de generación de energía en la central Alto Anchicayá está conformado por tres turbinas Francis acopladas a generadores eléctricos sincrónicos.

Las turbinas Francis están constituidas principalmente por el distribuidor, que está formado por álabes fijos y álabes móviles; el rodete, que es el encargado de realizar la conversión de energía hidráulica a energía mecánica rotacional, y la cámara espiral, que distribuye el agua uniformemente por todo el contorno de la entrada al rodete (Tobergte & Curtis, 2013; Domínguez, 2012).

El distribuidor fue inventado en Alemania en 1860, y consta de una serie de partes mecánicas que permiten

regular el caudal que va hacia el rodete. Para realizar esta función, el distribuidor dispone de álabes móviles que giran paralelos al eje de la máquina, haciendo movimientos de apertura y cierre con el fin de orientar y acelerar el flujo de agua, variando constantemente el caudal dependiendo de la carga demandada (Florez, 2005). El movimiento de los álabes se logra al accionar los servomotores que, simultáneamente, mueven el anillo de operación que está acoplado a las palancas y al eje del álabe, permitiendo un rendimiento elevado incluso con cargas reducidas.

En la Figura 2 se observan las partes internas del distribuidor; el círculo del medio indica el lugar donde se presentó la falla identificada como una fuga de agua en el buje intermedio del eje del álabe.

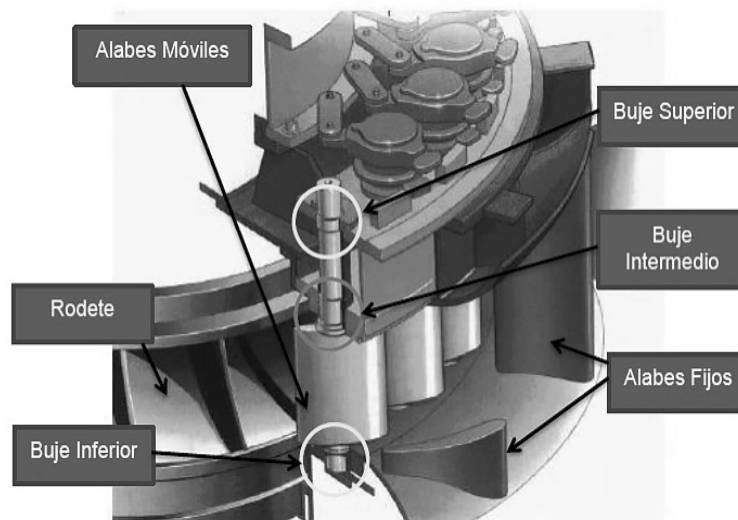


Figura 2. Corte transversal de una turbina Francis. Fuente: Autores.

Cada turbina de la Central Alto Anchicayá cuenta con diez álabes fijos y veinte álabes móviles, cuya función es direccionar y acelerar el flujo hidráulico que va hacia el rodete. El álabe móvil está compuesto por un eje acoplado a tres bujes: superior, intermedio e inferior. La fuga de agua ocurre en el buje intermedio, que se encuentra cubierto por una tapa y dos espárragos que ejercen una presión para que el buje no se salga por la fuerza del agua.

La falla se evidencia principalmente como una fuga de agua que puede convertirse en una pérdida significativa en la eficiencia de la turbina. En algunas ocasiones, la falla se puede detectar fácilmente con una inspección visual o con el sonido que crea la excesiva presión que ejerce la fuga de agua, como se observa en la Figura 3.



Figura 3. Fuga de agua por los muñones de los álabes. Fuente: Foto tomada en central hidroeléctrica Alto Anchicayá. Autores.

Para enfrentar el problema se han instalado, en cada unidad generadora, sistemas de bombas que absorben el agua hasta un desagüe en común con el fin de prevenir una inundación en el cojinete guía, como se ilustra en la Figura 4.



Figura 4. Motobombas que extraen el exceso de agua. Fuente: Tomada en central hidroeléctrica Alto Anchicayá. Autores.

El muñón de los álabes está compuesto por tres elementos críticos que son: bujes, espárragos y empaques. Estos tres elementos evidencian daños y desgastes al momento de la falla, y es por esta razón que el análisis de causa raíz se centra en estos tres elementos.

Desde el 2015 se empezó a recopilar información acerca de la falla, encontrándose que en la Unidad 1 se presentaron 14 fallas en los álabes número 1, 7, 8, 14, 15, 16 y 17; en algunos casos, la falla se repite en el mismo álabe. El 8 de octubre del 2015, pocos días después de cambiar los espárragos en el álabe 8, esta falla vuelve a presentarse, ocasionando inundación en el cojinete guía debido a la excesiva fuga de agua.

En la unidad 2 se presentaron dos fallas en el álabe número 6, que fueron detectados mediante una inspección visual

Tabla 1
Cambio de bujes en cada unidad

Unidad generadora \ Bujes	Bujes en once	Similar a originales fabricación nacional	Bujes en acero con camisa	fabricación nacional bujes de teflón	Bujes Thordon	Tiempo de operación últimos bujes
Unidad 1	1974	NA	Septiembre de 1997	NA	NA	19 años
Unidad 2	1974	NA	Julio de 1996	2004	NA	12 años
Unidad 3	1974	1994	NA	NA	Octubre de 2011	5 años

Fuente: Autores.

que evidenció que un espárrago no tenía su tuerca. En la unidad 3 se presentó una falla en el álabe número 15, que se manifestó con los espárragos partidos (ver Figura 5).

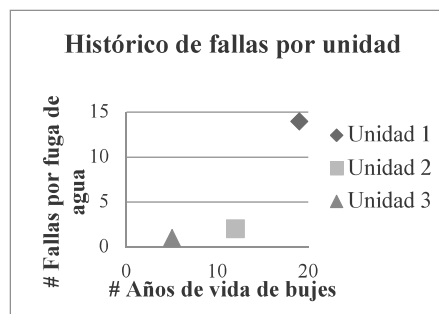


Figura 5. Histórico en cada unidad de generación. Fuente: Autores.

Hasta 1974 las máquinas utilizaban bujes hechos en bronce lubricados en aceite, pero, debido a políticas ambientales, se estableció utilizar bujes autolubricados con agua, a fin de no contaminar el afluente del río.

En 1997, en la Unidad 1 se cambiaron los bujes en bronce por acero, los cuales –hasta la fecha de terminación de este artículo (2017)– registran un tiempo de operación aproximado de diecinueve años. Posteriormente, en julio de 1996 y en el 2004 se hicieron cambios en la Unidad 2, en este caso los bujes fueron cambiados por otros de teflón, de elaboración nacional, que tienen ya un tiempo de operación aproximado de doce años.

Luego, en 1994 y en 2011, en la Unidad 3 los bujes se cambiaron por otros termoplásticos de marca Thordon, que llevan un tiempo de operación de cinco años y registran un índice de fallas menor que en las otras dos unidades.

En la Tabla 1 se muestran los cambios de bujes que se han realizado en cada unidad generadora desde 1974 hasta la fecha.

Discusión y resultados de la metodología ACR

El evento al que se le aplicará el ACR en la central hidroeléctrica ocurre con una frecuencia superior o igual a dos veces al mes y, además, según el criterio de un experto es necesario analizarlo a fondo. De otra parte, se trata de un evento cuya causa es desconocida, por lo tanto, de acuerdo con los criterios, es necesario aplicar esta metodología. Como se explicó anteriormente, cuando ocurre la falla se tienen tres elementos involucrados que son: bujes, empaques y espárragos.

Para realizar la parte más importante de la investigación fue necesario conformar un equipo multidisciplinario de ingenieros, operarios y técnicos capaces de aportar ideas al equipo y dar soluciones a las medidas determinadas, logrando así desarrollar el ACR siguiendo la metodología Proact.

Se obtuvo información de cada una de las partes en falla, imágenes, planos, datos históricos de la falla y fabricantes, y se elaboró un diagrama funcional del sistema, como se muestra en la Figura 6.

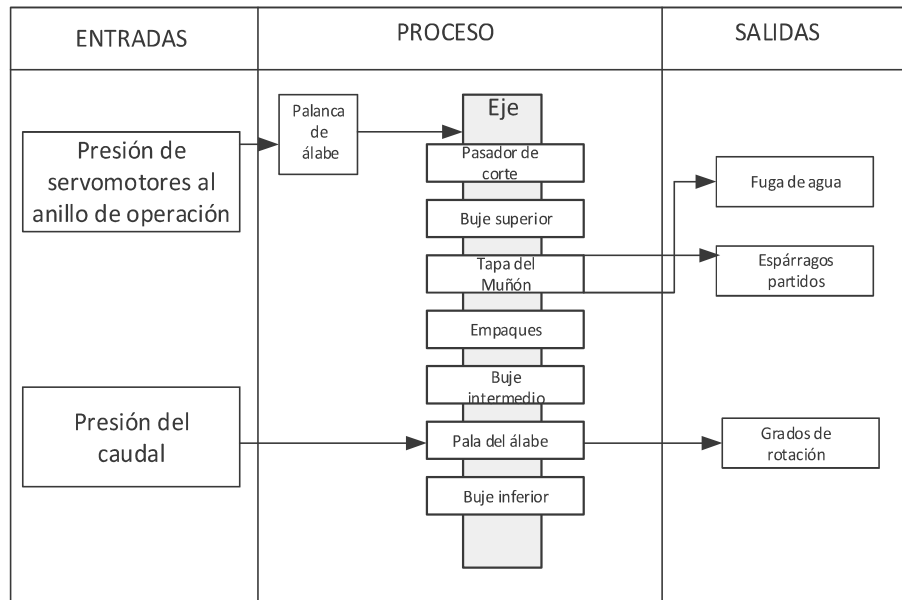


Figura 6. Diagrama funcional del sistema de los álabes móviles. Fuente: Autores.

La presión ejercida por los servomotores acciona el anillo de operación, el cual está conectado a la palanca del álabe, permitiendo el giro de la pala del álabe.

La presión del caudal golpea la pala del álabe pasando por el buje intermedio hasta la tapa del muñón; si ocurre

la falla, se presenta una fuga de agua y los espárragos se encuentran partidos.

En la Figura 7 se realizó el árbol lógico, mediante el cual se identifican los modos de falla para establecer hipótesis que permitan encontrar indicios sobre cuál es la causa que origina el problema.

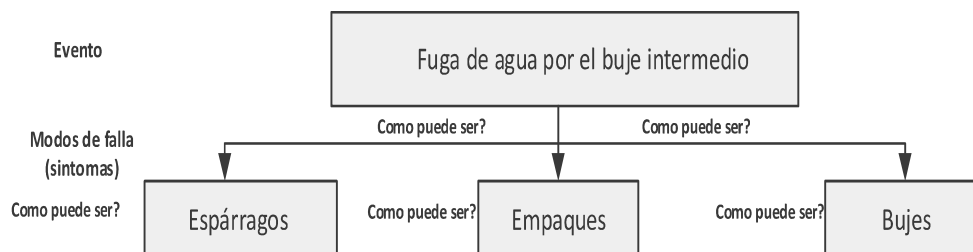


Figura 7. Diagrama de los modos de falla. Fuente: Autores - Proact SUITE V 4.

Luego, se deben generar hipótesis por cada modo de falla con el fin de encontrar o descartar indicios de la o las

causas del problema. Este evento se clasifica como una falla crítica debido a que si bien se cumple con la función

requerida existe una condición no deseada, que de no ser tratada provocará el fallo funcional del activo.

El primer modo de falla por estudiar son los espárragos o tornillos que están ubicados en la tapa de los muñones

de los álabes. Estas turbinas tienen veinte álabes de los cuales cada álabe posee una tapa donde se introducen los espárragos, sujetando la tapa contra el muñón que contiene el buje y los empaques. En la Figura 8 se presenta el diagrama para cada una de las hipótesis.

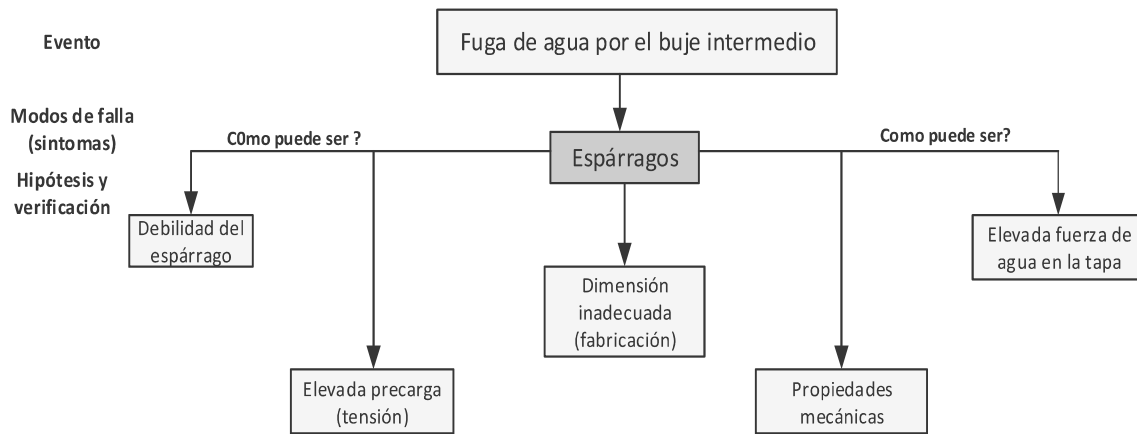


Figura 8. Diagrama de verificación de hipótesis sobre el daño del espárrago de la tapa del porta buje. Fuente: Autores - Proact SUITE V 4.

A continuación, se verifican cada una de las hipótesis planteadas sobre cómo puede ser que los espárragos ocasionen una fuga de agua por el buje intermedio.

- Elevada fuerza del agua en la tapa

Seguidamente se presenta el cálculo de la fuerza ejercida por el agua sobre la tapa. Si la holgura entre muñón y buje aumenta, se incrementa la fuerza por presión en la tapa, la cual se transmite al espárrago.

Cálculo de la fuerza del agua ejercida sobre la tapa a una caída de 400m:

$$\text{Presión} = \rho * G * H, \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \text{ o } 1 \text{ Pascal} \right] \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde,

$$\rho = \text{Densidad del agua} = 1000 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$G = \text{Gravedad} = 9,8 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

$$H = \text{Altura de caída} = 400 \text{ [m]}$$

$$P = 1000 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] * 9,8 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] * 400 \text{ [m]} = 3,92 * 10^6 \text{ [Pa]}$$

Cálculo del área máxima entre el muñón y la tapa:

$$\text{Área máxima de empuje} = A * B, [\text{mm}^2] \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde,

$$\text{Diámetro del muñón [m]} = 0,016 \text{ [m]}$$

$$\text{Diámetro de la tapa [m]} = 0,17 \text{ [m]}$$

$$\text{Área máxima de empuje} = 0,016 * 0,17 = 0,002754 \text{ m}^2$$

Cálculo de la fuerza ejercida sobre la tapa

$$F = P * A, [\text{N}] \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde,

$$A = \text{Área máxima de empuje [m}^2]$$

$$P = \text{Presión de caída [Pa]}$$

$$\text{Fuerza} = 3,92 * 10^6 \text{ [Pa]} * 0,002754 \text{ m}^2 = 10795,68 \text{ [N]}$$

Donde,

$$A = \text{Área máxima de empuje [m}^2]$$

$$P = \text{Presión de caída [Pa]}$$

$$\text{Fuerza} = 3,92 * 10^6 \text{ [Pa]} * 0,002754 \text{ m}^2 = 10795,68 \text{ [N]}$$

Al analizar la fuerza con holgura de 1 cm entre el muñón y el buje, la resistencia del espárrago sigue siendo teóricamente adecuada. Además, se enviaron algunos espárragos al

laboratorio de aplicación de técnicas experimentales para determinación de fallas y se halló lo siguiente:

Concepto análisis de falla tornillo

Sobre los espárragos se encontró una amplia zona de marcas de playa, característica de una zona de propagación de fisuras por fatiga y una pequeña zona de fractura final. La amplia zona de propagación indica una condición de bajo esfuerzo (o alto ciclaje), lo que quiere decir que los esfuerzos son relativamente bajos pero suficientes para producir fatiga. Ya que la condición de falla corresponde a fatiga de bajo esfuerzo, se recomienda solucionar este problema aumentando la resistencia de los pernos.

Si hay desgaste del buje, el empaque asume las cargas del movimiento del álabe incrementando la velocidad de desgaste del empaque. Cuando falla el empaque aumenta el flujo de agua y, por lo tanto, se elevan las vibraciones del eje. Estas vibraciones aumentan la fuerza axial de la tapa y por lo tanto disminuyen la vida útil del esparrago.

Solución: Para esto se recomienda utilizar pernos grado 8, con buen acabado superficial en las roscas.

- Propiedades mecánicas inadecuadas de los espárragos.

En marzo del 2015 se montaron en la Unidad 1 algunos espárragos en material SAE 4140, galvanizados en frío, pero presentaron falla acelerada, lo cual generó falla en el cojinete (inundación del cojinete).

Los espárragos fallados se cambiaron por tipo petroleros grado B7. Luego, se realizó la prueba de tensión a los espárragos fabricados localmente en SAE 4140, los cuales fallaron a 40 libras-pie; los espárragos petroleros fallaron a 190 libras-pie; con base a lo anterior se continúa con el reemplazo por espárragos petroleros.

Al comparar el torque de falla del espárrago petrolero 190 libras-pie con el torque de la precarga-tensión de 60 libras-pie, se determina que este espárrago cumple en cuanto a propiedades mecánicas.

Solución: Utilizar tonillos inoxidables AISI 420 o tipo petroleros zincromatizados y realizar pruebas de tensión aleatoria a los nuevos espárragos adquiridos.

- Dimensiones inadecuadas del espárrago (fabricación)

Tras revisarse la geometría del espárrago no se obtuvieron indicios de fallas por dimensiones inadecuadas, por ello se descarta que sea un problema causado por dimensiones inadecuadas.

- Elevada precarga (tensión)

No se está aplicando torque a los espárragos con torquímetro (60 libras-pie), por lo cual es posible que en algunos casos se exceda la precarga y se ocasione la falla prematura. Sin embargo, la falla no es aleatoria; hay unos álabes con mayor frecuencia de falla.

Solución: Aplicar precarga con torquímetro (60 libras-pie) y realizar pruebas de ruptura por tensión a los espárragos que se adquieran (grado 5 en adelante).

- Fatiga del espárrago (tiempo de operación)

Los álabes de mayor frecuencia de fallas en la Unidad 1 son el 8 y 14; estos álabes también fallaron con espárragos petroleros con pocas horas de operación; se descarta que sea un problema solo de material del espárrago o de fatiga.

El segundo modo de falla a estudiar son los empaques, que suelen ser de nitrilo, cuya función es restringir las fugas de agua en la superficie de los bujes (ver Figura 9).

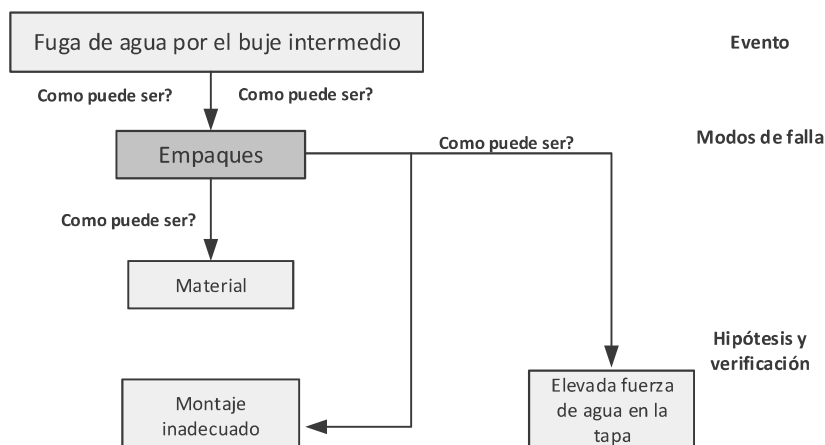


Figura 9. Diagrama sobre verificación de hipótesis sobre los empaques. Fuente: Autores - Proact SUITE V 4.

Posteriormente, se verifican las hipótesis planteadas sobre cómo puede ser que los empaques ocasionaron una fuga de agua.

- Montaje inadecuado del empaque

El corte de los empaques debe quedar a 120° uno con respecto al otro. El pegante utilizado para sellar los empaques, Loctite 495, no es apropiado para caucho, puesto que causa cristalización del empaque; para evitarlo, se debe utilizar pegante para caucho Loctite 410.

Solución: Usar Loctite 410 y montar a 120° las juntas de los empaques.

- Dureza inadecuada del material del empaque

Al verificar esta hipótesis se observa desgarre en un tramo del empaque.

Solución: Realizar pruebas de verificación de dureza aleatoria a los nuevos pedidos de empaques.

- Elevada fuerza del agua en la tapa

Si hay desgaste del buje, entonces el empaque asume las cargas del movimiento del álabe y se incrementa la velocidad de desgaste del empaque (que está diseñado para sellar y no para recibir cargas).

Solución: Realizar cambio de los bujes.

El tercer modo de falla a estudiar son los bujes o cojinetes, los cuales cumplen dos funciones:

permitir el giro del eje para abrir y cerrar los álabes, y reducir las vibraciones del eje del álabe. Las superficies de rozamiento de los bujes están hechas de acero, bronce y termoplástico (ver Figura 10).

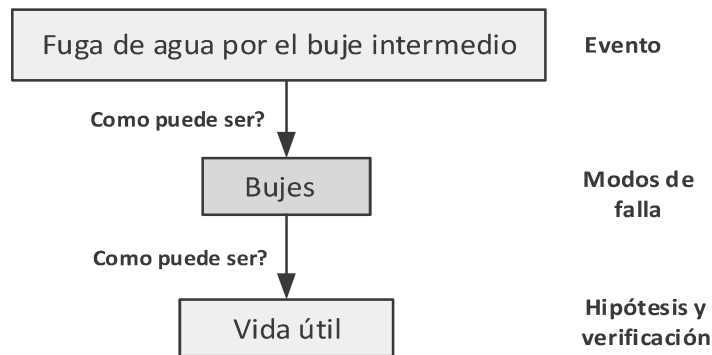


Figura 10. Diagrama sobre verificación de hipótesis sobre los bujes. Fuente: Autores - Proact SUITE V 4.

A continuación, se verifica la hipótesis sobre cómo puede ser que los bujes ocasionan una fuga de agua.

- Vida útil

En 2004, tras evidenciarse desgarre del material –que tenía doce años de operación– en la Unidad 2 se cambiaron los bujes de acero por bujes de teflón de fabricación nacional. En 1997, en la Unidad 1 se cambiaron los bujes de bronce –cuyo tiempo de operación era de diecinueve años– en los que se evidenciaba pérdida del material, por otros de acero. Cabe anotar que los ciclos de apertura y cierre sumados a las condiciones de material, aceleran el deterioro de los bujes.

Solución: Cambiar bujes que presentan desgaste.

Luego de verificar las hipótesis se debe encontrar la causa raíz principal del problema.

Determinación de causas raíz

Después de haber aplicado la metodología ACR se encontró que el problema principal está en los bujes y la causa raíz es el desgaste del material, generado por su elevado tiempo de operación. También se observa que la causa del desgaste del buje se repite en los tres modos de falla, afirmándose como la causa principal del problema.

Debido al elevado tiempo de operación en algunos álabes se evidencia desgarro del material del buje, determinándose como una causa raíz física el desgaste.

A continuación, se realiza el cálculo con el cual se determina la presión que ejerce el sistema en los bujes.

• Cálculo de carga que soportan los bujes en el momento de trabajo

Información utilizada para el cálculo

Tipo de turbina: Francis – vertical
Potencia: 157811 HP
Caída de agua: 400 m
Flujo: 43.3 m³/s
Velocidad del rotor: 450 RPM
Presión del servomotor: 24.6 Kg/cm²
Peso del rodete: 196.4 ton

A. Cálculo de presión por caída de agua

$$\text{Área del álabe (A)} = A * B, [mm^2]$$

Donde,

$$H = \text{Altura del álabe} [mm] = 250 [mm]$$

$$B = \text{Ancho del álabe} [mm] = 562 [mm]$$

$$\text{Área del álabe} = 250 * 562 = 140500 \text{ mm}^2$$

• Cálculo de la presión que corresponde a una altura de caída de 400 m.

$$\text{Presión} = \rho * G * H, \left[\frac{Kkg}{m * s^2} \text{ o } 1 \text{ Pascal} \right]$$

Donde,

$$\rho = \text{Densidad del agua} = 1000 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$G = \text{Gravedad} = 9.8 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

$$H = \text{Altura de caída} = 400 [m]$$

$$P = 1000 \left[\frac{kg}{m^3} \right] * 9.8 \left[\frac{m}{s^2} \right] * 400 [m]$$

$$= 3.92 * 10^6 [Pa] = 3.92 \frac{N}{mm^2}$$

• La fuerza que actúa en los álaves

$$F = P * A, [N]$$

Donde,

$$A = \text{Área del álabe} [mm^2]$$

$$P = \text{Presión que actúa en el álabe} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

$$\text{Fuerza} = 3.92 \left[\frac{N}{mm^2} \right] * 140500 [mm^2]$$

$$= 550.76 [kN]$$

B. Cálculo de presión basado en la presión de los servomotores

Presión de trabajo de los servomotores 24.6 kg/cm² al área de los álaves, como son dos servomotores se tienen las siguientes áreas:

- Área servomotor 1 : 1842.5 [cm²]
- Área servomotor 2 : 2024.5 [cm²]
- Área total servomotores: 3867 [cm²]

Basado en la fuerza total combinadas de **1483.65 kN**, actuando en los álaves, la reacción **R** en los bujes es:

C. La fuerza estimada en los bujes es:

- Buje superior: $R_A = 0.5 * F [kN] \dots \text{Ec (4)}$
- Buje intermedio: $R_B = 0.85 * F [kN] \dots \text{Ec (5)}$
- Buje inferior: $R_C = 0.5 * F [kN] \dots \text{Ec (6)}$

$$R_A = 0.5 * 1483.65 [kN] = 741.825 [kN]$$

$$R_B = 0.85 * 1483.65 [kN] = 1261.1 [kN]$$

$$R_C = 0.5 * 1483.65 [kN] = 741.825 [kN]$$

D. Cálculo de la relación del buje intermedio

La relación ejercida en el álabe intermedio es mayor como se observa en la ecuación (5). A continuación, se calcula la proporción:

La fuerza ejercida en cada buje inferior y superior es 0.5*F[kN] y la del buje intermedio es 0.85*F[kN], por lo tanto:

$$\frac{0.85 * 1}{0.5} = 1.7 \text{ veces}$$

La fuerza que se ejerce sobre los bujes intermedios es 1.7 veces mayor que sobre los demás.

E. La presión de trabajo correspondiente a cada uno de los bujes está dada por la siguiente fórmula:

$$P = \frac{R}{d * l} [MPa] \quad \text{Ec (7)}$$

Donde,

$$R = \text{Fuerza de reacción} = 1261.1 [kN]$$

$$d = \text{Diámetro de eje} = 146.05 [mm]$$

$$l = \text{Largo del buje} = 254 [mm]$$

Fuerza total de los servomotores que actúa en los álaves:

$$F = P * A, [N]$$

$$F = 24.6 \left[\frac{kg}{cm^2} \right] * 3867 [cm^2] = 95128.2 [kN]$$

$$= 932.889 [kN]$$

Carga total actuando en los álaves:

- Carga debido a la caída de agua: **550.76kN**
- Carga debido a los servomotores: **932.889kN**

Carga total: **1483.65 kN**

Ahora se calcula la nueva presión de trabajo actuando en los bujes del álabe. Se hace el cálculo del buje intermedio.

$$P_B = \frac{1261.1 [kN]}{146.05 [mm] * 254 [mm]} = 33.99 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

$$= 33.99 [Mpa]$$

El contratista de los bujes debe garantizar una presión de diseño mayor a la calculada teóricamente; además, el buje deberá ser de un material que sea autolubricado por agua y no por grasera.

La causa raíz humana del problema es la hipótesis 1, montaje inadecuado del buje. Esta se puede corregir implementando mejoras en la iluminación y la climatización en el momento de hacer los cambios de los bujes y realizando pausas activas de seguridad industrial para descansar los músculos de la espalda.

La causa raíz latente del problema es la NO programación de los cambios de los bujes con una mayor frecuencia. Se entiende que para realizar cambio de los bujes se necesitan 120 días calendario y que esto afecta fuertemente los ingresos de la compañía, pero se está incurriendo en un

riesgo de posible inundación de la central. Se recomienda evaluar la frecuencia de cambio de bujes y realizar una evaluación financiera para definir una política.

Para terminar el análisis causa raíz el equipo debe establecer un plan de acción buscando dar solución a cada una de las causas raíz del problema, esto con el objetivo de que este tipo de falla no vuelva a presentarse en la central. Además, se debe compartir esta información para no tener esta falla en otras centrales de generación. Para cada una de las causas raíz se ha propuesto una recomendación.

Para la causa raíz física, que es el desgaste de los bujes por el tiempo de operación, se propone que los encargados de la compra de los bujes verifiquen el cálculo teórico de presión que deben soportar estos para garantizar que los comprados cumplan con esta especificación.

Para la causa raíz humana, que es montaje inadecuado del buje, se propone mejorar las condiciones del espacio de trabajo para realizar este montaje, como la iluminación del espacio y su climatización; adicionalmente, se propone que el personal de montaje realice pausas activas durante el proceso (ver Figura 11).

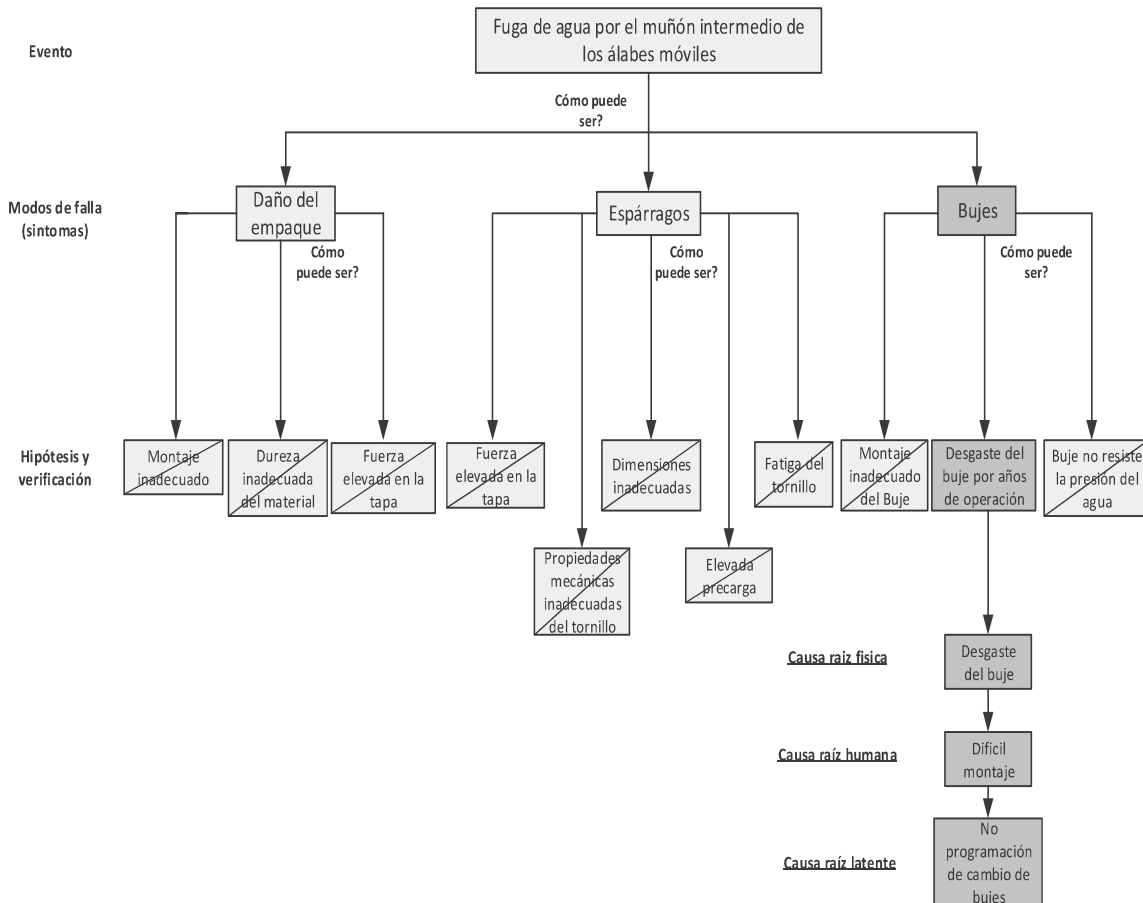


Figura 11. Análisis de causa raíz finalizado. Fuente: Autores - Proact SUITE V 4.

Para la causa raíz latente, que es la NO programación del cambio de los bujes, se propone a la gerencia realizar una evaluación financiera para así determinar una política de cambio para todas las centrales.

Dentro de seis meses se debe verificar la eficacia de las acciones planteadas por el equipo de trabajo, presentando evidencia de que las recomendaciones del plan de acción fueron implementadas en su totalidad en la central o están próximas a implementarse.

Luego de encontrar la causa raíz es necesario determinar las medidas correctivas.

Determinación de medidas correctivas

- Usar Loctite 410 y realizar montaje de las juntas de los empaques a 120°.



- Aplicar precarga con torquímetro a 60 libras-pie a los espárragos.
- Realizar pruebas aleatorias de ruptura por tensión a nuevos espárragos (Grado 8).
- Realizar pruebas de verificación de dureza aleatoria a los nuevos empaques.
- Aumentar la longitud de los espárragos de 2¼ a 3 pulgadas.
- Utilizar espárrago inoxidable AISI 420 o tipo petroleros sincromatizado.
- Realizar cambio de los bujes autolubricados cada quince años.
- Instalar sensores de medición en línea para la fuga de agua.

Conclusiones

Las fallas que se producen en una central de generación tienen consecuencias importantes a nivel productivo y económico, por ello, es indispensable que se adopten medidas para evitar que las fallas se produzcan de manera sistemática. En el presente trabajo se ha consolidado una metodología de análisis de causa raíz específica para el análisis de fallas en centrales hidroeléctricas de EPSA. La propuesta incluye formatos diseñados de manera específica para cada una de las etapas del análisis y un paso a paso para su realización.

La metodología ACR es muy acertada para el análisis de sistemas complejos; bajo este parámetro, EPSA ha definido los criterios específicos para seleccionar los casos de falla a los cuales es necesario aplicar la metodología, dada la complejidad y la multiplicidad de sistemas interconectados que conforman cada una de sus centrales de generación; tener claridad en estos criterios permite

diferenciar fallas de poca complejidad que no requieren tal grado de intervención.

Actualmente, las empresas soportan sus análisis con herramientas de sistemas; este tipo de *software* resulta muy útil, sobre todo en la organización y estandarización de los procesos y en el almacenamiento de la información. Siendo el ACR un método de análisis tan complejo, que examina causas tanto humanas como físicas y latentes, el uso del *software Proact SUITE V 4* resulta ser muy acertado en una compañía tan grande como EPSA.

La correcta utilización del *software* permitirá a la empresa soportar análisis muy detallados de sistemas de alta complejidad con una estricta organización de la información y de realización de procesos. Este *software* permite también hacer recomendaciones a problemas asociados a las causas raíz vinculadas a cada evento, y hacer, por medio de recordatorios, un seguimiento y/o verificación de los procedimientos por realizar.

El caso analizado corresponde a una falla que es muy frecuente en la central Alto Anchicayá. Para este caso, la metodología desarrollada facilitó la detección de tres causas raíz del problema, las cuales son: desgaste del buje por los años de operación, como la causa raíz física; el montaje inadecuado del buje, como la causa raíz humana, y la NO programación para el cambio de los bujes como la causa raíz latente o sistémica. Estas tres causas raíz se obtuvieron de la aplicación de la metodología de análisis causa raíz Proact explicada y desarrollada en este documento. Se propone una recomendación para cada una de las causas raíz encontradas y se espera que al ser implementadas en acciones concretas de la compañía se produzca una disminución evidente en la frecuencia de aparición de la falla.

Se presume que debido a la estrechez del sitio para realizar el mantenimiento no se realiza una adecuada instalación de las piezas internas, lo que puede generar desajuste mecánico. Por esto es necesario realizar cada paso del mantenimiento cumpliendo las medidas establecidas. Si el buje se desgasta debido a esfuerzos mecánicos, el área entre el buje y el eje del álabe aumenta, lo cual implica que la presión ejercida por el agua que golpea en la tapa se incrementa, generando vibraciones que repercuten en el empaque y el espárrago.

También se encontró que el buje intermedio del álabe móvil recibe 1.7 veces más la fuerza ejercida por el sistema, lo cual conlleva un apresurado desgaste en el buje; además, se debe garantizar una presión de diseño mayor de 33Mpa.

De acuerdo a la presión ejercida por el sistema se recomienda cambiar los bujes usados, de marca Thordon, por D-glide, los cuales tienen mayor resistencia.

Agradecimientos

Este artículo fue desarrollado gracias al apoyo de los ingenieros de generación de la central hidroeléctrica Alto Anchicayá y a la gerencia de Generación de la Empresa de Energía del Pacífico EPSA-CELSIA; igualmente, a la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle.

Referencias

Center Inc., R. (2008). *Problem Solving Methods*. Project management & maintenance.

Contreras, L., Lucietto, D., Santos, J. & Aguillón, O. (2010). *Análisis causa raíz de un sistema de generación de vapor*. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/143328511/Analisis-Causa-Raiz-Vapor>

Domínguez, U. (2012). *Máquinas Hidráulicas*. (E. C. Universitario, Ed.).

Doshi, J. C. & Trivedi, B. (2013). Decision support system using DMAIC for academic scheduling: ICT in education support activities. *Proceedings - 2013 IEEE 5th International Conference on Technology for Education, T4E 2013*, 73–75. <https://doi.org/10.1109/T4E.2013.26>

Duphily, R. J., Harder, H., Morehead, R., Haman, J., Gjerde, H., Dubois, S. & Loman, J. (2014). *Root Cause Investigation Best Practices Guide*. Aerospace Corp. *El Segundo Ca.*

Fallis, A. (2013). Estrategias para eliminación de defectos como elementos básicos del gerenciamiento de la confiabilidad. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.

Florez, R. O. (2005). *Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*. (Emma Ariza Herrera, Ed.).

Gano, D. L. (2011). *Seven Steps To Effective Problem-Solving And Strategies For Personal Success*.

Kim, D. S., Baek, D. H. & Yoon, W. C. (2008). Developing a Computer-Aided System for Analyzing Human Error in Railway Operations. In *2008 World Congress on Railway Research*. Seoul, Korea, *World Congress on Railway Research*.

Lárez, A. (2012). *Análisis causa raíz para la resolución de problemas*. Programa Business, Your International Sc, Ing M.

Lederer, J. F. (2004). *Air Safety Through Investigation*. *Jerome F. Lederer in a Photo by Bruce Stotesbury, Victoria Times Colonist (Victoria, British Columbia, Canada) Taken during ISASI 2001 and Used in a Feature Article Titled From the Wright Brothers to the First Man on the*

Moon, (June).

Paradies, M. & Unger, L. (2000). Using the TapRoot System for Process Safety Incident Investigation and Root Cause Analysis. *Copyright 2000 by System Improvements, Inc., Knoxville, Tennessee*.

Pascal, Á. C. & Rodríguez, J. P. (2016). Determinación de las características hidrodinámicas de dos sedimentadores sedhelcon para el tratamiento de aguas residuales. *I+D Revista De Investigaciones*, 7(1), 116–124. <https://doi.org/10.33304/revinv.v07n1-2016012>

Tobergte, D. R. & Curtis, S. (2013). Caracterización de una turbina del tipo Francis utilizada por una empresa local de generación de energía. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Ziedelis, S. & Noel, M. (2011). Comparative analysis of nuclear event investigation methods, tools and techniques. *European Commission, Joint Research Center (EC/JRC), EUR, 24757*.