

“Investigación sobre las posibles causas del deterioro frecuente de las membranas del sistema de inyección de agua de refrigeración de emergencia de la Central Nuclear Atucha II”

**CARRERA: ESPECIALIZACIÓN EN REACTORES NUCLEARES
Y SU CICLO DE COMBUSTIBLE**

Alumna: Ing. FERREYRA, Stella Maris

Directora: Ing. PEREZ, Silvia

Noviembre 2017



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

ÍNDICE

Abstract.....	3
Resumen.....	3
Agradecimientos.....	3
CAPÍTULO 1: “Presentación del trabajo de investigación”	4
1.1. Introducción	4
1.2. Objetivos	5
1.2.1. Objetivo principal.....	5
1.2.2. Objetivos secundarios	5
1.3. Glosario.....	5
1.4. Lista de abreviaturas.....	6
1.5. Alcance.....	6
CAPÍTULO 2: “Resumen de documentación relacionada con el evento”	7
2.1. Descripción del sistema de inyección de agua de refrigeración de emergencia	7
2.1.1. Subsistema de inyección de agua de refrigeración desde el acumulador	8
2.1.2. Subsistema de inyección de agua de refrigeración desde el sumidero	9
2.2. Descripción de las membranas y puntos de muestreo	11
2.3. Antecedentes.....	13
2.3.1. Enumeración de los eventos	13
2.3.2. Análisis del evento realizado por NASA	14

CAPÍTULO 3: “ Buenas prácticas de la experiencia operativa aplicables al evento”	18
3.1. Fundamentos del análisis sistemático.....	18
3.2. Técnicas de evaluación recomendadas internacionalmente.....	20
CAPÍTULO 4: “ Aplicación de las técnicas de evaluación”	27
4.1. Alcance	27
4.2. Diagrama de Factores Causales	27
4.3. Análisis de Barreras.....	28
4.4. Diagrama de espina de pescado	29
4.5. Causas potenciales y causa raíz	31
4.6. Acciones correctivas necesarias y recomendaciones.....	32
5. Conclusiones.....	32
6. Referencias	34
ANEXOS	35
ANEXO I: “Diagrama de factores causales”	37
ANEXO II: “Análisis de Barreras”	39
ANEXO III: “Diagrama de espina de pescado”	41
ANEXO IV: “Historial de correcciones”	43

Abstract

This work gathers the existing information from the start-up of the Nuclear Power Plant Atucha II until June 2017 on the frequent deterioration of the membranes of the emergency cooling water injection system and analyzes the possible root cause of the problem using internationally recommended evaluation techniques. After the analysis, it was concluded that there were weaknesses in the design of the membranes and that there is an opportunity for improvement in the analysis of the events related to the use of the tools proposed in the mentioned guides.

Resumen

El presente trabajo reúne la información existente desde la puesta a crítico de la Central Nuclear Atucha II hasta junio de 2017 sobre el deterioro frecuente de las membranas del sistema inyección de agua de refrigeración de emergencia y analiza mediante técnicas de evaluación recomendadas en guías internacionales la posible causa raíz del problema. Luego del análisis se llega a la conclusión de que hubo debilidades en el diseño del componente y que existe una oportunidad de mejora en el análisis de los eventos relacionada con el uso de las herramientas propuestas en las mencionadas guías.

Agradecimientos

Quiero agradecer a la Ing. Silvia Perez, directora de este trabajo final por sus valiosos aportes. Es un orgullo para mí contar con su colaboración, debido a que es una persona que trabajó más de 30 años en el área nuclear, que ha realizado capacitaciones nacionales e internacionales relacionadas con la experiencia operativa en centrales de potencia. En la actualidad es asesora del Departamento de experiencia operativa dependiente de la Subgerencia documentación regulatoria y evaluación de Experiencia Operativa y Desempeño, en la Autoridad Regulatoria Nuclear. Además de ser la Coordinadora Nacional IRS (Incident Reporting System for Operating Experience Feedback) de IAEA.

Asimismo quiero agradecer a la Sra. Ana María Lerner, Secretaria académica del Instituto, quien me ha brindado su apoyo para la realización de la presentación del presente trabajo.

CAPÍTULO 1: “Presentación del trabajo de investigación”

1.1. Introducción

En el marco de la licencia de operación que le fue otorgada a la Central Nuclear Atucha II, la Autoridad Regulatoria Nuclear exige la presentación de cierta documentación de carácter mandatorio a la entidad responsable (Nucleoeléctrica de Argentina SA). La documentación a destacar en este caso es el Programa de Manejo de la Experiencia Operativa, el que incluye la entrega periódica de un informe trimestral conteniendo todos los eventos relacionados con la seguridad radiológica y nuclear producidos en dicha planta.

Luego de recibido este informe por parte de la ARN, se seleccionan los eventos que se consideran de relevancia para el análisis, comenzando con la investigación de la causa raíz y el seguimiento de dicho evento hasta que se implementen las acciones correctivas necesarias y se establezcan las lecciones aprendidas para cada caso.

Normalmente se realiza una evaluación técnica de los eventos que se consideran relevantes desde el punto de vista de la seguridad nuclear y de aquellos que por su frecuencia requieren un tratamiento adicional tendiente a disminuir su ocurrencia.

En el presente trabajo no se evaluará un evento en particular, sino que se investigará la falla frecuente de un componente de un sistema de seguridad en particular, de la Central Nuclear Atucha II debido a que se ha notado que este componente perturba el funcionamiento de la central generando distintos eventos en el transcurso de su operación desde su puesta en marcha. Se tratará sobre el deterioro frecuente de las membranas del sistema de inyección de agua de refrigeración de emergencia.

Para el análisis de las causas se utilizan diferentes técnicas de evaluación “Diagrama de espina de pescado”, “Análisis de Barreras” y “Diagrama de Factores Causales”. Estas técnicas son algunas de las recomendadas por las guías de IAEA (Agencia Internacional de Energía Atómica).

Si bien actualmente no se realiza por parte de ARN un seguimiento de este tema, este trabajo permite aplicar los conocimientos obtenidos en la especialización a un caso real y puede generar alguna recomendación para la central o bien sumar lecciones aprendidas a la base de datos de experiencia operativa. El hecho de que no se realice un seguimiento por parte de ARN radica en que no se ve comprometida la seguridad nuclear, ya que en caso de deterioro en este tipo de membranas es posible detener el funcionamiento del reactor de manera segura.

Para la realización de este trabajo se utilizaron como inicio datos de variadas fuentes como por ejemplo el informe trimestral de eventos de la central, información obtenida a través de visitas a planta, informes emitidos por Nucleoeléctrica de Argentina SA sobre aspectos relacionados al mantenimiento de las membranas, guías internacionales de IAEA.

En el anexo IV pueden observarse las correcciones al presente trabajo aportadas por la directora y el jurado evaluador.

1.2. Objetivos

Los objetivos de este trabajo pueden enunciarse como un objetivo principal y un conjunto de objetivos secundarios que se desprenden del primero.

1.2.1. Objetivo principal

- Aplicar los conocimientos obtenidos en la especialización en reactores nucleares y su ciclo de combustible, a un caso real de planta.

1.2.2. Objetivos secundarios

- Encontrar la causa raíz del deterioro frecuente de las membranas.
- Establecer las acciones correctivas necesarias para disminuir la frecuencia de ocurrencia.
- Realizar recomendaciones a la central o bien incorporar lecciones aprendidas a la base de datos de experiencia operativa dependiendo de la naturaleza de la causa encontrada.

1.3. Glosario

Evento: acontecimiento anormal (desviación, incidente o accidente) ocurrido en una instalación o práctica regulada por ARN.

Evento relevante: es un evento en el cual las consecuencias reales o potenciales no son despreciables desde el punto de vista de la protección radiológica y seguridad nuclear.

Evento interno: es un evento ocurrido en una central nuclear argentina y que fue considerado como no relevante por el responsable primario de la instalación.

Responsable primario: es la persona que asume la responsabilidad directa por la seguridad radiológica de la central.

Causa raíz: podría existir más de una y se define como, aquella/s causa/s que si son corregidas a tiempo, pueden prevenir la existencia del evento.

Factor Causal: una condición, acción o situación que propicia la aparición o desarrollo de un evento.

Factor contribuyente: causa que por sí misma no propicia el evento, pero es suficientemente importante como para reconocer que requiere una acción correctiva, necesaria para fortalecer las barreras que impiden el evento.

Acción Correctiva: acción que se realiza para prevenir la recurrencia de un evento o para corregir la desviación del comportamiento normal de un sistema.

1.4. Lista de Abreviaturas

ARN: Autoridad Regulatoria Nuclear de Argentina.

NASA: Nucleoeléctrica de Argentina SA

CNA II: Central Nuclear Atucha II.

SAP: Subsistema de Alta Presión o subsistema de inyección de agua de refrigeración de emergencia desde el acumulador.

SBP: Subsistema de Baja Presión o Subsistema de inyección de agua de refrigeración de emergencia desde el sumidero.

LOCA: Loss of coolant accident. Accidente con pérdida de refrigerante.

IAEA: Agencia Internacional de Energía Atómica

1.5. Alcance

El sistema de planta elegido para el presente trabajo es el sistema de inyección de agua de refrigeración de emergencia de CNA II, limitando el análisis a las membranas de dicho sistema. La investigación incluirá visitas a la central, entrevistas con personal encargado del sistema y una evaluación técnica conceptual aportada por la autora del presente trabajo con apoyo de guías de IAEA e informes realizados por diferentes sectores de NASA que si bien no son específicos del tema pueden contribuir al conocimiento de la causa raíz.

El período de análisis de limita desde la entrada en operación de la planta hasta junio de 2017, ya que es la información disponible al momento de la realización de este trabajo y se considera suficiente a los efectos del análisis.

CAPÍTULO 2: “Resumen de documentación relacionada con el evento”

2.1. Descripción del sistema de inyección de agua de refrigeración de emergencia

La función del sistema de inyección de seguridad es limitar los daños causado por un accidente con pérdida de refrigerante por medio de inyección de agua liviana para inundar el núcleo, a fin de evitar la liberación no permisible de actividad al medio ambiente.

En caso de pérdida de refrigerante en el sistema primario, los siguientes aspectos le son requeridos al sistema de inyección de seguridad:

- Inundación del núcleo
- Compensación de pérdidas
- Refrigeración de emergencia del núcleo
- Refrigeración de emergencia de la máquina de recambio de elementos combustibles
- Extracción del calor de decaimiento a corto y largo plazo

Todos estos requerimientos son el resultado de un LOCA postulado en el sistema de refrigerante del reactor y el sistema moderador. Estos requisitos son esencialmente influenciados por el tamaño y la ubicación de la pérdida. En consecuencia las contramedidas son diferenciadas. Además, el sistema está diseñado para cumplir con estos requisitos, incluso si partes del sistema no están disponibles.

Para cumplir con sus requerimientos el sistema está subdividido en dos subsistemas:

- a) Inyección de agua de refrigeración desde el acumulador, llamado también subsistema de alta presión.
- b) Inyección de agua de refrigeración desde el sumidero, llamado también subsistema de baja presión.

2.1.1. Subsistema de inyección de agua de refrigeración desde el acumulador

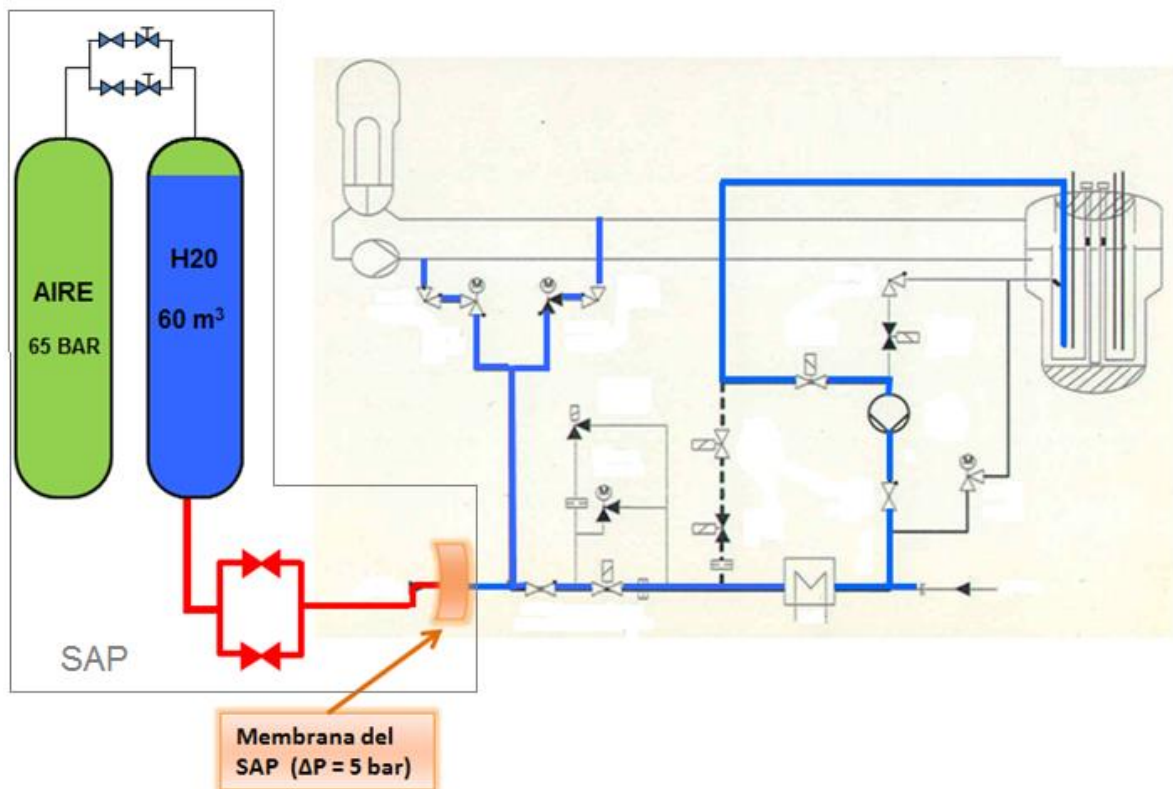
Este subsistema tiene que suministrar una rápida compensación de pérdidas y el anegamiento del núcleo. Consiste de acumuladores neumáticos (20 m³, 65 bar) y tanques de agua liviana (60 m³) que se encuentran despresurizados durante operación normal. El subsistema está conectado a las líneas de inyección por medio de dos membranas (discos de ruptura), que abren el paso a una presión diferencial de 5 bar. Esto asegura la inundación del núcleo en el evento de una pérdida media en el sistema primario, por ejemplo una rotura del 10% de la sección de la cañería del refrigerante principal. En el caso de rotura media en el sistema primario, por ejemplo, rotura de la línea de conexión más grande se requiere el anegamiento del núcleo.

Este subsistema está instalado en el interior de la contención. Consta de 4 circuitos en total, cada uno consiste esencialmente de un tanque acumulador, un tanque de gas y una válvula de aislamiento operada por pistón que lo conecta con el moderador.

El sistema se aísla del sistema moderador/refrigerante por medio de una membrana (disco de ruptura), el cual se rompe en el caso de accidente con pérdida de refrigerante, debido a la diferencia de presión aplicado al mismo en estos casos. Como una segunda barrera contra la presión del refrigerante del reactor existe una válvula de retención en la línea de inyección.

Durante el funcionamiento normal de la planta, sólo el acumulador de gas y la línea de inyección de gas estarán a presión elevada. El resto del sistema se despresuriza o está a una presión estática mínima.

A continuación se muestra un esquema de uno de los 4 circuitos del subsistema, a modo de simplificación ya que poseen características similares, la cañería a la izquierda de la membrana pertenece al circuito del SAP y la cañería a la derecha de la membrana muestra el circuito del moderador en situación de LOCA:



2.1.2. Subsistema de inyección de agua desde el sumidero

Este subsistema posee 4 circuitos, cada uno contiene esencialmente un tanque de almacenamiento de agua liviana y un sistema de bombas. En caso de emergencia, el tanque de almacenamiento se vacía en el sumidero, es decir, cuando se alcanzan los criterios de enfriamiento de emergencia y el nivel de agua de refrigeración está cayendo o se alcanzó el valor límite menor que mínimo en el presurizador. Además de actuar como anegador del núcleo, la inyección de agua desde el sumidero actúa como un sistema de emergencia a largo plazo.

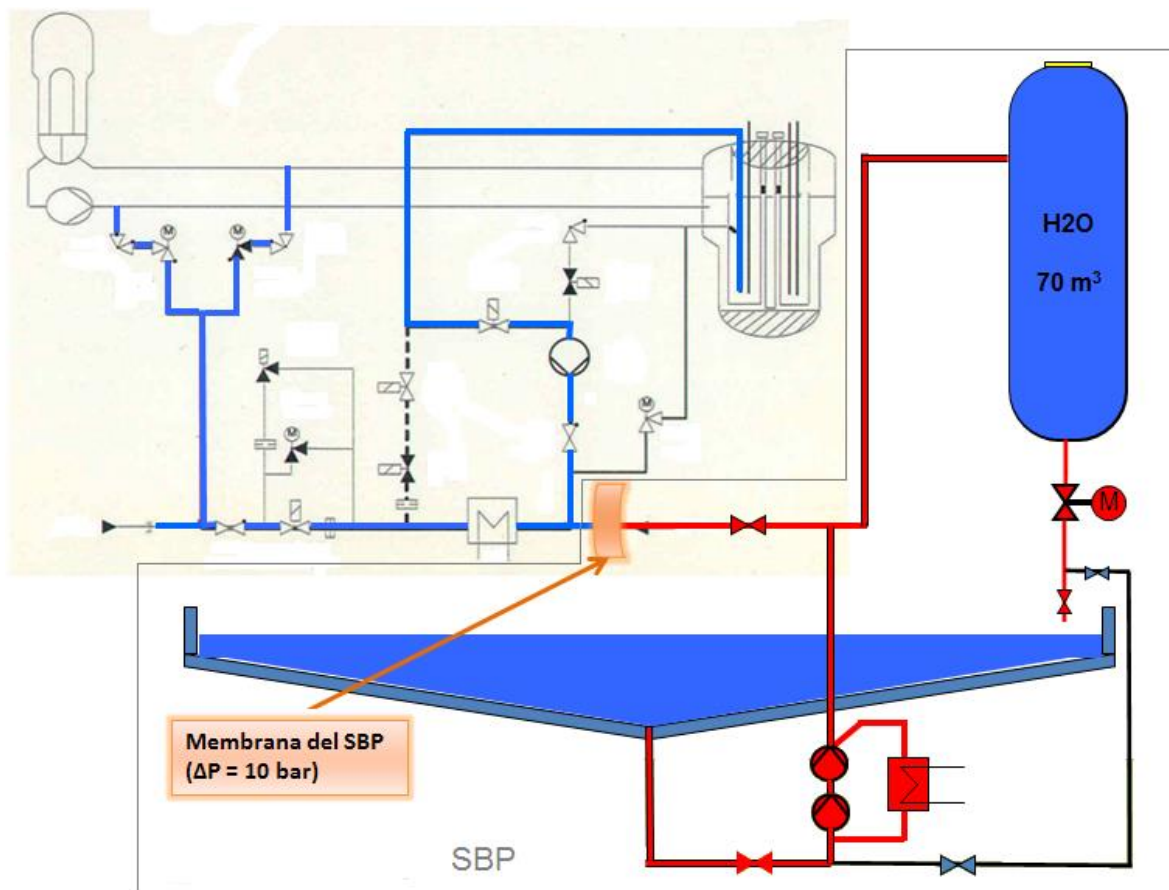
Cada tanque de almacenamiento de agua liviana posee una capacidad de 70 m³ y está instalado en el interior de la contención. El sistema de bombas está compuesto de una bomba de inyección de seguridad más una bomba de refuerzo, ambas instaladas en el espacio anular del reactor.

Cada uno de los circuitos del sistema de bombas toma agua del sumidero del edificio del reactor y del tanque de almacenamiento de agua por las líneas de succión e inyecta en la descarga de la bomba del moderador.

Durante la operación de emergencia, la bomba de inyección de agua, inyecta el refrigerante recogido en los sumideros del edificio del reactor, previo paso por los intercambiadores de calor del moderador en el sistema primario, lo cual permite el enfriamiento del agua del sumidero previo a la inyección al sistema del refrigerante principal.

Cada circuito está separado del refrigerante/moderador por medio de una membrana (disco de ruptura) que rompe a una presión diferencial de 10 bar. Una línea se bifurca desde la descarga de la bomba hacia el tanque de almacenamiento de agua, lo que permite realizar la prueba repetitiva de la bomba de inyección de seguridad.

A continuación se muestra un esquema de uno de los 4 circuitos del subsistema, a modo de simplificación ya que poseen características similares, la cañería a la derecha de la membrana pertenece al circuito del SBP y la cañería a la izquierda de la membrana muestra el circuito del moderador en situación de LOCA:



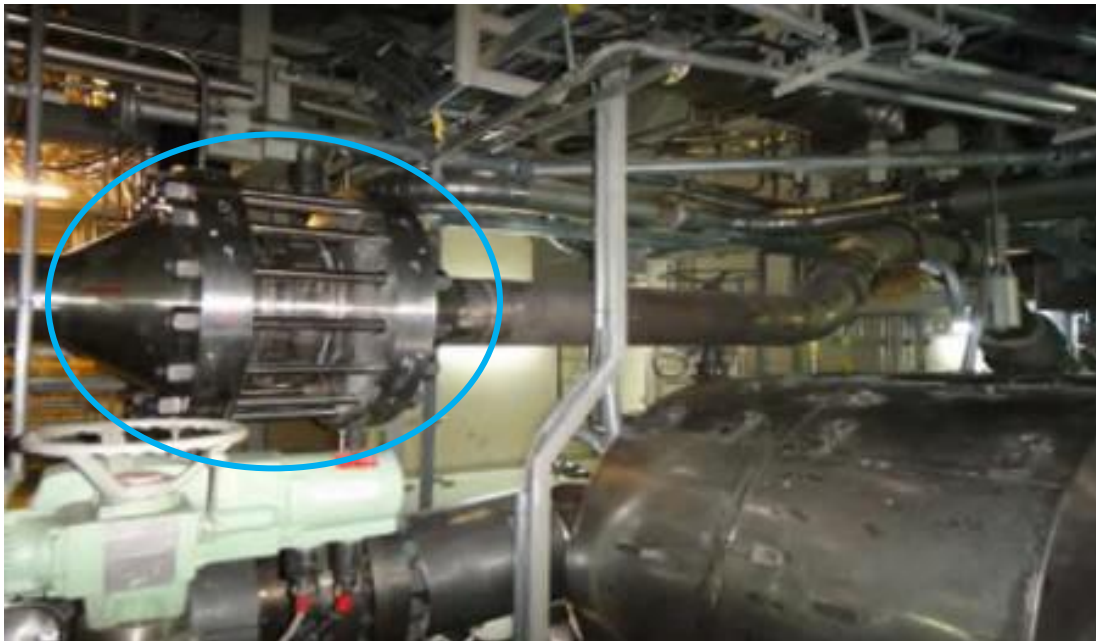
2.2. Descripción de las membranas y puntos de muestreo

Las membranas del sistema de inyección de emergencia son componentes importantes porque en caso de falla indisponen un sistema de seguridad, y debido a su deterioro frecuente, se realiza el monitoreo y se refuerza con tomas de muestras para disminuir la probabilidad de falla durante la operación.

Se muestra a continuación una foto del conjunto porta membrana - membrana (lado moderador/lado primario respectivamente) a modo ilustrativo, las membranas de ambos subsistemas son de aspecto similar y están construidas de acero inoxidable.



Se muestra también una foto real de parte de la instalación del SBP donde se puede apreciar el conjunto estructural que soporta la membrana:

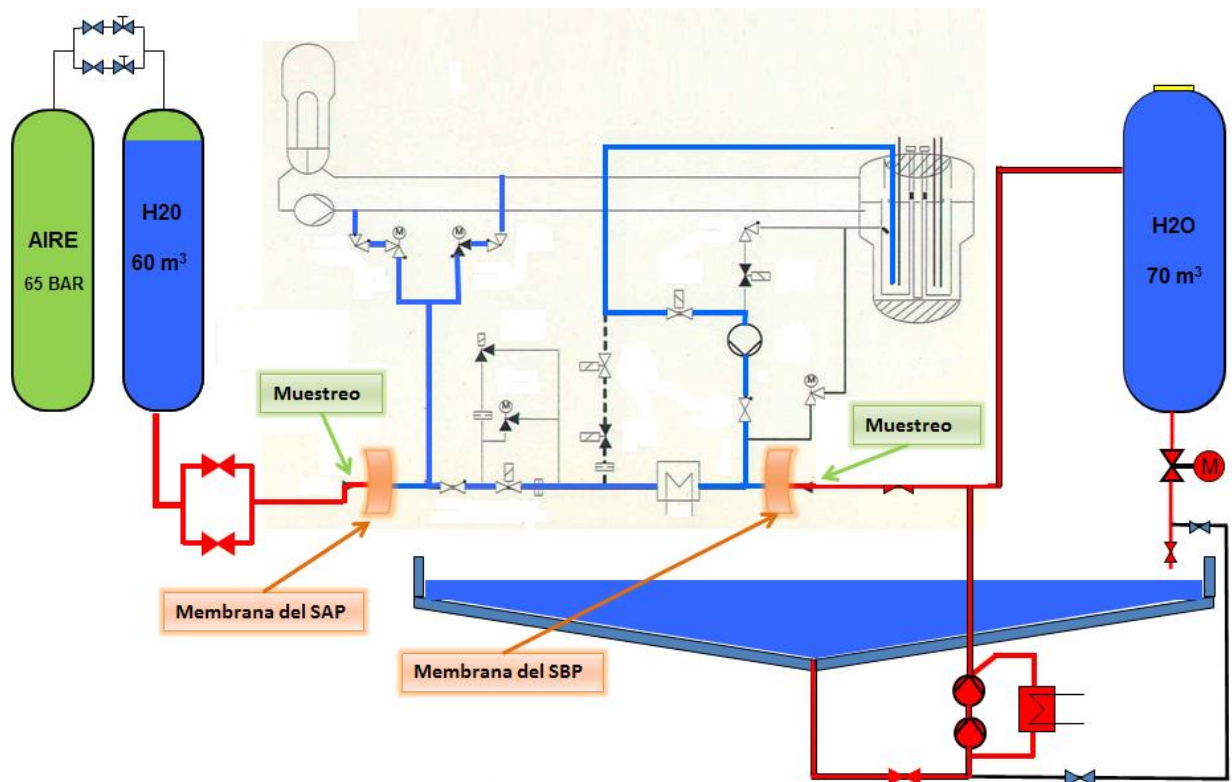


El monitoreo se realiza con un sistema de alarmas mediante sensores que miden la diferencia de presión entre ambos lados de la membrana (moderador/sistema de inyección de agua de emergencia), para las membranas del SAP el criterio es que la diferencia de presión no supere los 4 bar y para las del SBP que la diferencia de presión no supere los 10 bar.

En el caso de las membranas del SAP, la diferencia de presión con la que se produce la ruptura del disco es de 5 bar, pero se coloca la alarma a los 4 bar para producir una alerta temprana. Asimismo, para las membranas del SBP el criterio es que la alarma suene cuando se llegó a la diferencia de presión de 4 bar siendo la diferencia de presión que produce la rotura de la membrana es 10 bar.

La toma de muestras se realiza en la parte posterior de las membranas, es decir del lado del sistema de inyección de agua de emergencia para verificar que no exista agua pesada en este tramo de cañería. Esto se debe a que dicho sistema posee agua liviana y a que durante la operación normal no existe circulación de agua pesada por las mismas. En caso de detectar agua pesada en alguno de estos puntos, se confirma el deterioro de la membrana.

Se muestra en un diagrama simplificado con los dos subsistemas (SAP y SBP), donde se incluyen de manera orientativa los puntos de muestreo en verde:



2.3. Antecedentes

Se muestra en esta sección toda la información disponible al momento de la realización del trabajo relacionada con el deterioro de las membranas. Se detallará la cronología de los eventos y el análisis del evento realizado por NASA donde se determinan algunas acciones correctivas que decidieron implementar durante la parada programada en junio de 2017. Esta información se tomará como base de partida para el análisis posterior aportado por la autora.

2.3.1. Enumeración de los eventos

Dado que el sistema comprende dos subsistemas con características diferentes, se analizarán de manera independiente.

- Subsistema de alta presión:

- En agosto 2014 se cambiaron las 4 membranas de este subsistema, 2 por encontrarse agua pesada detrás de las membranas luego del muestreo y las otras 2 en forma preventiva ya que todas habían sido sometidas a iguales condiciones de presión.
- En diciembre de 2016, se extrajeron muestras de una de las membranas del SAP, encontrando una concentración de agua pesada del 15%, con lo cual se decide su reemplazo de manera preventiva. La membrana reemplazada presentó resultados negativos en el ensayo de tintas y prueba de Helio.

- Subsistema de baja presión:

- En septiembre del 2015 durante la parada programada se decidió cambiar una membrana del SBP luego de que se extrajera agua con 2% de concentración de agua pesada detrás de la misma.
- En la salida se servicio de noviembre de 2016 se muestrearon las membranas del subsistema como solicita el manual de operaciones. La muestra tomada en una de las membranas arrojó un valor de concentración de agua pesada del 3%. Se decidió arrancar la planta tomando como medida de prevención bajar la alarma de falla de la misma a 4 bar (presión detrás de la membrana) para la detección temprana de fisuras.

- En diciembre de 2016 actúa la alarma de una de las membranas ajustada en 4 bar. Se evidencia un gradiente de presurización en aumento. Como consecuencia, comienzan las maniobras de parada de la planta hasta parada fría.

Luego, se extrajeron muestras de las otras tres membranas de baja presión, encontrando una concentración de agua pesada del 15% detrás de una de estas, con lo cual se decide su reemplazo. Tras realizar ensayos de tintas penetrantes se concluyó que la membrana reemplazada presentaba fisuras y fallas.

2.3.2. Análisis de los eventos realizado por NASA

- Subsistema de alta presión:

Evento: En agosto 2014 se cambian las 4 membranas de alta presión, 2 por encontrarse agua pesada detrás de la membrana y las otras 2 en forma preventiva.

Causa encontrada: El Manual de Operaciones de ese momento no solicitaba el drenado y evacuado de las membranas del JND antes de realizar la maniobra de ir a medio caño, con lo cual, durante la ida a medio caño, las membranas fueron sometidas a un ΔP . El manual de operaciones fue modificado en septiembre 2014, resolviendo el problema.

Evento: En diciembre de 2016, se reemplazó preventivamente una membrana, producto de la salida de servicio de la planta.

Análisis: se observó en el subsistema que las membranas mantienen su coloración original, lo cual evidencia que trabajan a temperaturas aceptables. Además se comprobó mediante ensayo de tintas penetrantes y prueba de helio que no presenta fisuras.

Conclusiones:

Este subsistema ha sufrido el deterioro de las membranas en agosto 2014 como consecuencia de diferencias de presión causadas por la falta de algunas tareas específicas en el manual de operaciones que luego fueron incluidas. Una vez realizados los cambios en el manual de operaciones (septiembre de 2014), no se registraron nuevas fisuras en las membranas con lo que se infiere que el problema

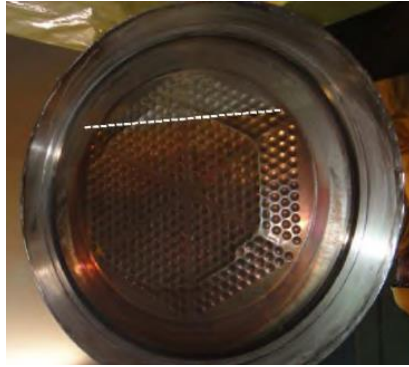
se encontraría solucionado. Por lo tanto, se podría considerar que este subsistema no requiere una continuación del análisis.

- Subsistema de baja presión:

Para el caso de este subsistema, NASA entregó varios informes donde se analizan los eventos de manera conjunta. En los mismos se evidencian varios estudios y análisis, con los cuales se determinaron las siguientes hipótesis sobre el deterioro de las membranas:

- Las membranas están expuestas a ciclados térmicos durante los arranques y las paradas de la planta. Esto se comprobó mediante termografías.
- Dos membranas del SAP están favorecidas por corrientes de ventilación de otros sistemas. Asimismo, la inclinación es también un factor que las favorece, ya que poseen una bajada justo antes de la membrana y esto promueve la formación de un tapón frío. Esto también fue confirmado por las termografías e inspecciones de planta.
- Estudios y mediciones de realizados durante la puesta en marcha recomendaban que las cañerías SBP no debían tener aislaciones. Sin embargo, estaban colocadas.
- Existe una diferencia considerable entre los 4 circuitos en las longitudes de la cañería entre la bomba del moderador y las membranas en el SBP. En las dos de menor longitud (aproximadamente 5 metros), no se alcanza a romper el flujo turbulento causado por la convección forzada de la bomba del moderador, manteniendo la cañería del primario, a una temperatura elevada, alrededor de 180°C. En cambio en las dos de mayor longitud (aproximadamente 10 metros), este efecto no se produce y las temperaturas no superan los 60°C.
- Debido a la disposición de las válvulas de prueba y a que existe un tramo horizontal de cañería posterior a esta válvula, es posible que durante las pruebas repetitivas se acumule agua liviana (probablemente con aire atrapado) en dos de las membranas del SBP.

Los aceros inoxidable en medios alcalinos forman precipitados de Magnetita (Fe_3O_4) y con presencia de oxígeno forman Hematita Fe_2O_3 , lo cual cambia la coloración de las membranas. Se muestra a continuación fotos de las membranas que pasaron por estos procesos:



Presencia de Hematita Fe_2O_3 (Marrón)



Presencia de Magnetita Fe_3O_4 (gris)

Dos membranas del SBP muestran un cambio de coloración. Lo cual evidencia el efecto de alta temperatura y el contacto con agua fría (30°C - 40°C) producto de la prueba repetitiva que se le realiza al sistema.

- La falla temprana de las membranas en SBP se produce en aquellas en donde se ha observado que trabajan a mayor temperatura, y dada la disposición de las cañerías (longitud e inclinación), se favorece la llegada de agua liviana fría que entra en contacto con la membrana.
- Los aceros inoxidable, con presencia de iones disueltos producen corrosión por picadura, proceso que se acelera por presencia de altas temperaturas.
- En el SBP, lado del moderador, la presencia de oxígeno y de agua liviana con iones proveniente del tanque de almacenamiento, puede producir corrosión localizada a altas temperaturas superficiales de la membrana. Se comprobó en algunas de ellas corrosión por picaduras.

De acuerdo con los resultados obtenidos, NASA plantea en su informe las acciones correctivas que fueron realizadas durante la parada programada de 2017 a fin de mitigar el deterioro de las membranas:

- Se descontaminaron las membranas reemplazadas para realizar un estudio metalográfico en la CNEA.
- Se analizó el agua de los tanques de almacenamiento del SBP encontrando alta conductividad y PH bajo. Se realizó el drenado y enjuague de los tanques.
- Se retiraron las aislaciones de las cañerías.

- Se envió a AREVA (proveedor de las membranas) toda la información, con las conclusiones e hipótesis, disponibles hasta el momento para obtener recomendaciones al respecto.
- Se están realizando cálculos termo-mecánicos con elementos finitos para evaluar el comportamiento de las membranas durante ciclados de temperatura.
- Se extendieron los ductos de ventilación hacia las membranas del SBP con cañerías de longitudes menores donde las temperaturas eran elevadas y se colocaron disipadores de calor.
- Se mejoraron los drenajes para que no se produzca la acumulación de agua liviana durante las pruebas repetitivas en el SBP.
- La prueba repetitiva fue modificada en junio 2017, contemplando el vaciado de la línea de recirculación, el vaciado de la línea de inyección e incorporando determinación del volumen de muestreo del disco de ruptura como medida preventiva.

Conclusiones:

El deterioro de las membranas se debió a la combinación de factores de diseño y el efecto de la prueba repetitiva.

Por ello, se tomaron varias acciones correctivas que pudieron implementarse durante la parada de 2017 y las cuales podrían solucionar el problema.

Asimismo, se espera el resultado de los cálculos termo-mecánicos con elementos finitos para evaluar el comportamiento de las membranas durante ciclados de temperatura y los aportes de CNEA y AREVA.

CAPÍTULO 3: “Buenas prácticas de la experiencia operativa aplicables al evento”

3.1. Fundamentos del análisis sistemático

Teniendo en cuenta la información presentada por NASA, podría concluirse que se han tomado las acciones correctivas necesarias para las causas encontradas y se ha ampliado el análisis a otros sectores que pueden aportar información como proveedores, laboratorios, etc. Por lo tanto podrían cerrarse estos eventos con la implementación de las acciones correctivas.

Sin embargo, si se tiene en cuenta la experiencia internacional en temas relacionados con el análisis de causas, es recomendable que se continúe la investigación hasta llegar a lo que se denomina la causa raíz.

Existen dos tipos de análisis que pueden realizarse dependiendo de la profundidad de las causas a la cual se quiere llegar, uno es el análisis intuitivo y otro el análisis sistemático. La utilización de cada uno depende de la relevancia del evento y de los recursos que decidan asignarse al análisis. Si bien un análisis intuitivo no es recomendable, en algunos casos puede ser suficiente para dar respuesta a un incidente leve y luego puede complementarse con un análisis de tendencias para evitar recurrencias.

El análisis sistemático consiste en un razonamiento estructural y lógico mediante el cual se relacionan hechos aparentemente aislados y se formula una teoría que unifica los diversos elementos. Para este tipo de análisis se requiere un equipo de trabajo interdisciplinario con amplio conocimiento sobre el proceso que se quiere analizar para asegurar que todos los aspectos del problema sean tenidos en cuenta. Asimismo, pueden consultarse personas externas a la organización para ampliar el alcance y considerar otros puntos de vista, por ejemplo proveedores, asesores externos, etc.

Con un análisis intuitivo se alcanza un nivel de investigación que llega hasta las causas visibles o físicas, con las cuales se apunta a reparar componentes o evaluar las fallas puntuales de los mismos. Es decir, se encuentran causas tangibles relacionadas con los materiales, sistemas o instalaciones.

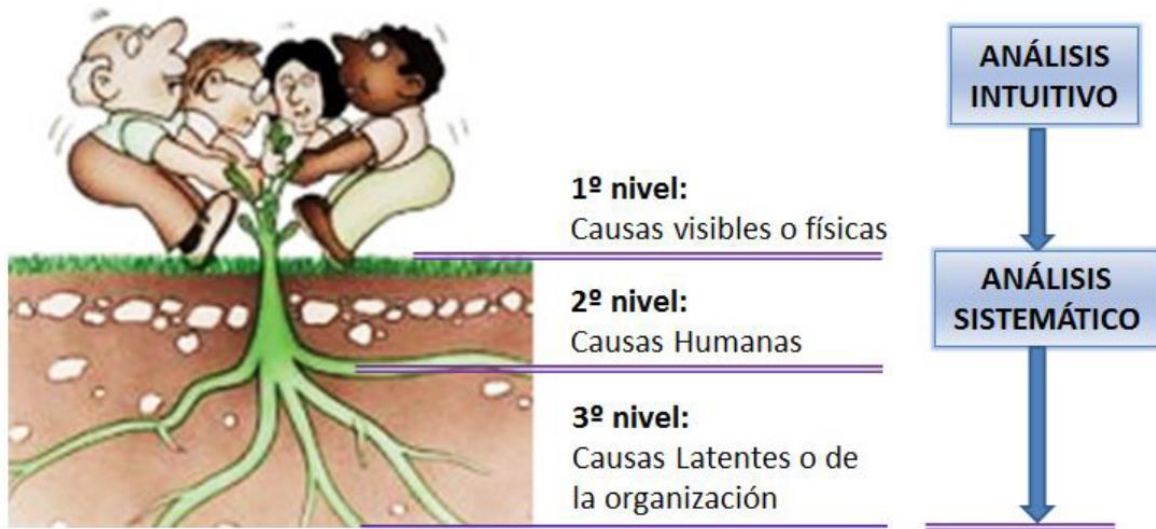
En el análisis sistemático se avanza en la profundidad de las causas y en la mayoría de los casos se llega a causas humanas donde se pueden ver errores en la implementación de procedimientos, falta de aplicación de los mismos y otros aspectos de desempeño humano. Es importante recalcar que el énfasis de las organizaciones debe estar puesto en obtener información sobre los eventos, y no en sancionar a los individuos. Esto contribuye también a promover un clima de cooperación de los individuos que realizan las tareas en la investigación de las causas y a la cultura de la seguridad mediante la concientización de las consecuencias de los eventos.

Luego si se continúa el análisis, se llega a las causas latentes o de la organización donde queda de manifiesto que el compromiso de la dirección es fundamental para la

mejora continua. En este nivel de investigación surgen por ejemplo, las oportunidades de mejoras en la gestión de los recursos, las mejoras en temas relacionados con las políticas de las organizaciones, etc.

Una vez alcanzado este nivel de investigación de las causas, no conviene continuar en la misma porque los resultados que se obtienen no aportan nueva información significativa.

A fin de resumir estos fundamentos se muestra el siguiente diagrama:



Para el caso del evento elegido en este trabajo se observa la recurrencia del mismo, con lo cual es necesario realizar un análisis sistemático.

En las conclusiones del análisis aportado por NASA puede observarse que las causas encontradas son:

- causas visibles o físicas, relacionadas con cambios en la instalación.
- causas latentes, relacionadas con los cambios en el manual de operaciones y en las pruebas repetitivas.

Si bien se considera que el análisis realizado por NASA es consistente, se propone en este trabajo la realización de una evaluación más detallada teniendo en cuenta las recomendaciones internacionales propuestas por IAEA.

3.2. Técnicas de evaluación recomendadas internacionalmente

A lo largo del tiempo han surgido diferentes herramientas para mejorar la seguridad operativa de las instalaciones nucleares debido a que la recolección sistemática, evaluación y retroalimentación de la experiencia operativa han demostrado ser una práctica valiosa y eficaz.

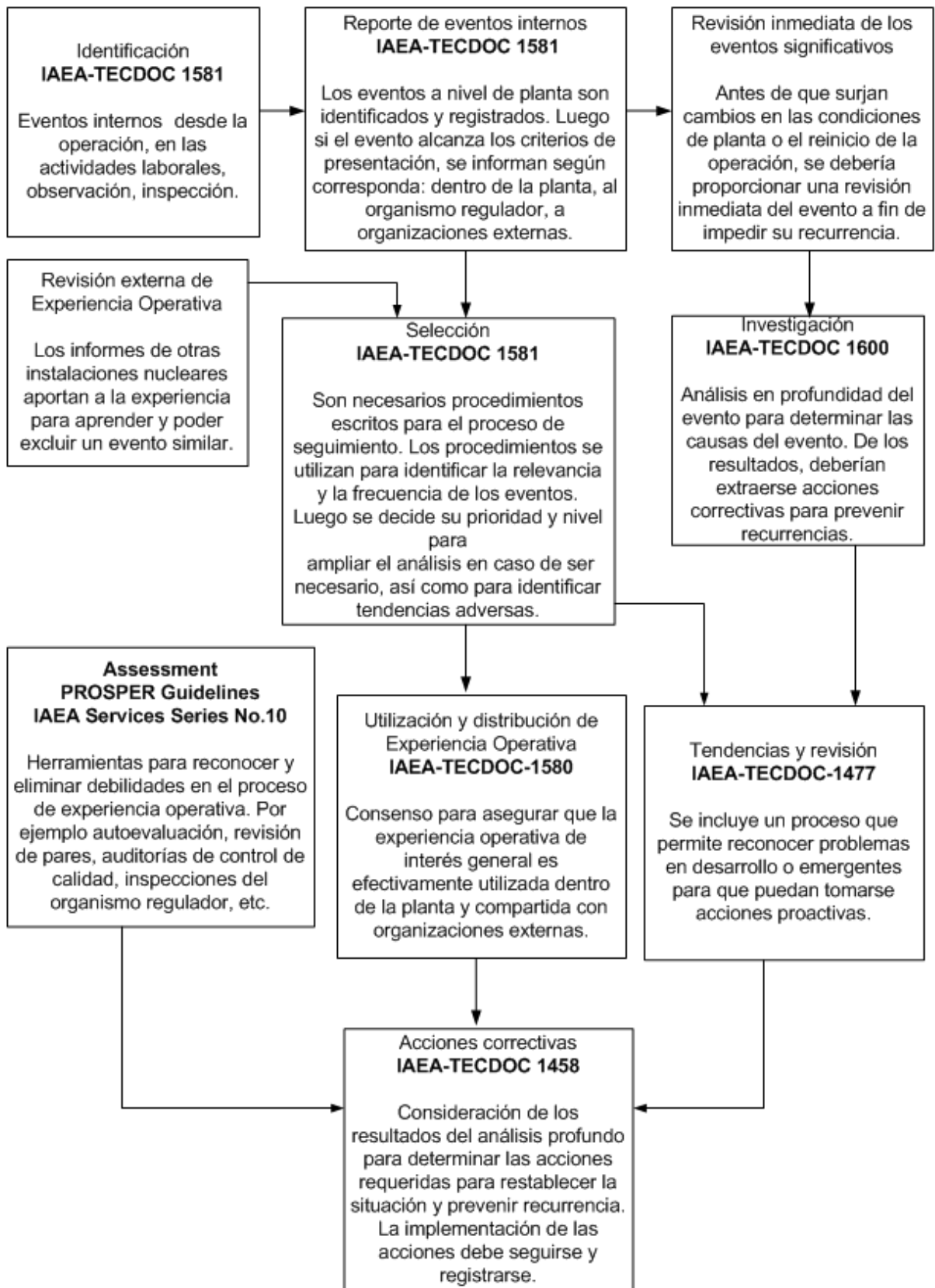
Esto puede lograrse estableciendo un sistema para la realimentación de la experiencia operativa. Este sistema debe permitir que en los eventos analizados se determinen de ser posible las causas raíces y se implementan acciones correctivas y preventivas para evitar la recurrencia de los eventos.

Es importante que la evaluación de los hechos se lleve a cabo en la medida necesaria para dar confianza en que las consecuencias de la seguridad se han comprendido plenamente, las causas se han establecido correctamente y que las acciones correctivas apropiadas han sido identificadas.

IAEA tiene un programa bien consolidado para promover un adecuado análisis de eventos mediante diferentes documentos técnicos que recomiendan las herramientas necesarias para las buenas prácticas.

A fin de encontrar las herramientas que mejor se adapten a los eventos analizados en este trabajo, se realizó un relevamiento de los contenidos de las normas internacionales.

El siguiente diagrama resume los documentos de IAEA existentes con una breve explicación del contenido y la secuencia de utilización de los mismos:



Asimismo, se eligieron herramientas de análisis teniendo en cuenta las particularidades de los eventos seleccionados. Las herramientas más utilizadas en la práctica relacionadas con fallas en equipos o componentes, con sus ventajas y desventajas son las siguientes:

Nombre	Cuando usarla	Ventajas	Desventajas
AMFE (Análisis de modos y efectos de falla)	Utilizado para problemas multifacéticos como paradas de reactor o transitorios de planta. También es bueno para evaluar falla de equipos	Permite visualizar el proceso de análisis completo e identificar las probables contribuciones a la condición de falla. Ayuda a identificar las desviaciones de los métodos	Requiere tiempo prolongado de análisis y cierta familiarización con el proceso para que sea efectivo. Requiere además una perspectiva amplia del evento para identificar problemas no relacionados.
Diagrama de factores causales	Se utiliza para visualizar todos los hechos ocurridos y detectar posibles factores que contribuyan a la falla.	Tiene en cuenta todas las condiciones que pueden provocar un evento y permite hacer mejoras más allá del evento analizado.	No se focaliza en la causa raíz aunque permite deducirla si el usuario de la herramienta está entrenado adecuadamente.
Análisis con árbol de fallas	Se utiliza para comprender los modos de falla, para identificar las formas de reducir un riesgo o para comprender las tasas de eventos de un accidente de seguridad o una falla funcional de un nivel en particular de un sistema.	Puede ser utilizado por personas con escaso entrenamiento. La representación gráfica permite el entendimiento del comportamiento del sistema bajo análisis	Si no hay una buena base de datos de probabilidades de los eventos básicos, la incertidumbre crece en este cálculo. No es dinámico, sólo incluye estados binarios (falla o no).

Análisis de cambios	Se utiliza en fallas simples. Es muy útil en el análisis de falla de equipos.	Proceso simple de 6 pasos. Puede utilizarse como soporte de otros métodos de análisis.	Evaluación limitada por el riesgo de aceptar una respuesta errónea y no encontrar la causa raíz.
Análisis de barreras	Utilizado para los problemas relacionados con los procedimientos o la gestión administrativa. También analiza el desempeño humano.	Proporciona una aproximación sistemática. Puede utilizarse para falla de equipos.	Requiere cierto conocimiento sobre el proceso.
Técnica de los 5 porqués	Se utiliza para incrementar la profundidad del análisis.	Permite analizar ordenadamente las causas desde lo trivial hacia lo más profundo	Se focaliza en un solo modo de falla
Diagrama de espina de pescado	Utilizado para ampliar el análisis a otras áreas de la organización que pudieron haber contribuido a la falla y analizar el problema de manera integral. Utiliza y ordena en un formato fácil de leer las relaciones entre la causa y el efecto.	Permite detectar deficiencias en diversas áreas	No es un análisis que favorezca la profundidad del análisis, sino que es generalista

Cabe destacar que existen más herramientas referenciadas en las guías internacionales que no se citan en el cuadro anterior por ser usualmente utilizadas en eventos donde se desea focalizar el análisis en otros aspectos como ser el desempeño humano, la confiabilidad o en otros aspectos no relevantes para este trabajo. Sin embargo, no implica que otro tipo de análisis pueda requerirse posteriormente como resultado de esta primera evaluación.

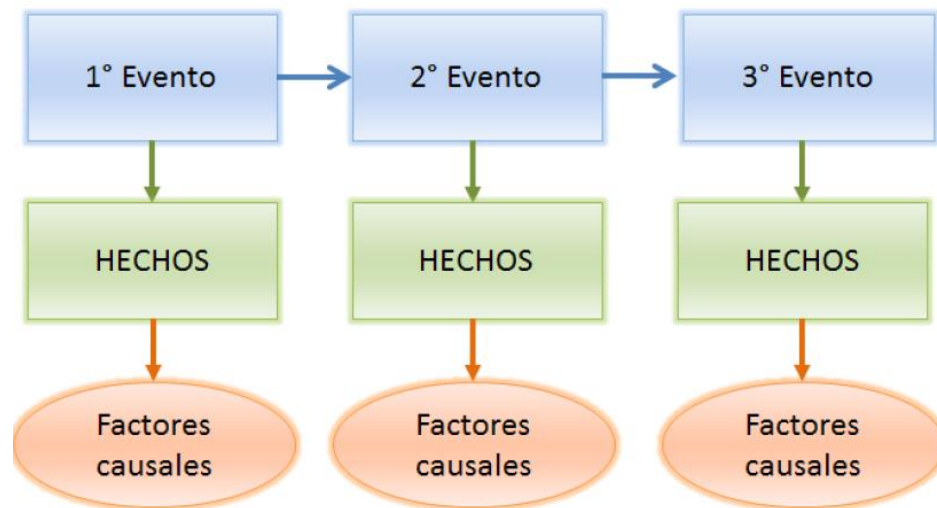
Para el análisis de este trabajo se requieren herramientas que puedan tener en cuenta todas las posibles contribuciones al problema ya que no se pretende analizar solamente el deterioro de la membrana en su causa física sino también todo el contexto en un modo integrador.

Otro requisito que deben cumplir las herramientas seleccionadas es proveer un análisis profundo de las causas a fin de inferir la causa raíz.

Teniendo en cuenta estas características, se seleccionaron tres herramientas: diagrama de factores causales, análisis de barreras y diagrama de espina de pescado.

A. Diagrama de Factores Causales:

Permite visualizar gráficamente la secuencia cronológica de los eventos (en el primer reglón), detallando los hechos (en rectángulos) y los factores causales que permiten inferir las causas (en óvalos). Un esquema de la herramienta es el siguiente:



El motivo de seleccionar esta técnica es unir de forma cronológica todos los hechos para evitar olvidos involuntarios y finalmente, poder encontrar las condiciones que pudieron favorecer la repetición del evento.

B. Análisis de Barreras:

Se denomina barreras a todos los métodos utilizados con el fin de evitar la ocurrencia de los eventos. Las barreras pueden ser físicas (Ingeniería de diseño, blindajes, alarmas, etc.) o administrativas (procedimientos, políticas,

entrenamiento, especificaciones técnicas, etc.). Esta técnica permite evaluar por qué las barreras existentes fallaron y que barreras adicionales son necesarias para prevenir recurrencia de eventos.

El análisis comienza desde el planteo de una consecuencia la cual no se sabe a priori como ocurrió, luego se investiga cuáles son las barreras que pudieron evitar dicha consecuencia. Finalmente, surgen del análisis si los tipos de barreras existentes, fueron ineficientes, perdidas o inexistentes:

- Una barrera es ineficiente cuando a pesar de estar implementada en la organización, cumplió solo parcialmente su objetivo.
- Una barrera es perdida cuando no resultó eficaz debido a que fue ignorada o no se aplicó por diferentes causas.
- Una barrera inexistente es aquella que es necesario implementar para prevenir eventos futuros.

Un esquema conceptual de la herramienta es el siguiente:



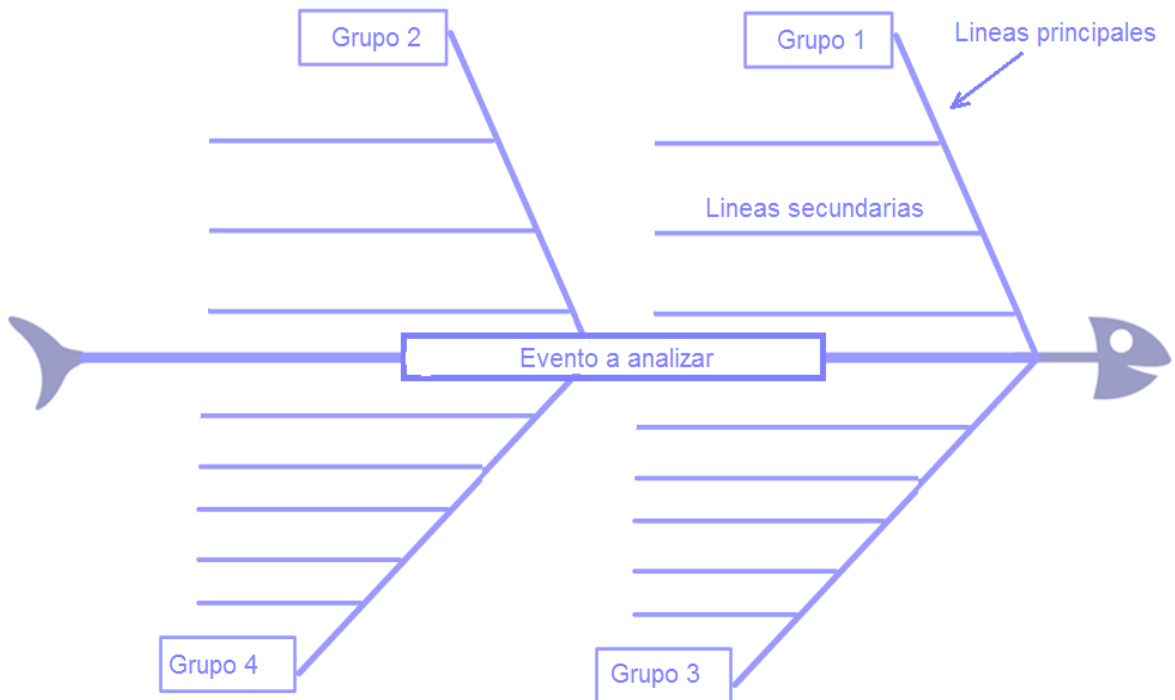
Esta herramienta se seleccionó debido a que permitiría recomendar nuevos métodos que permitan evitar la recurrencia del evento o bien, fortalecer los mecanismos ya implementados.

C. Diagrama Espina de Pescado:

Se utiliza para identificar las causas potenciales de un problema. El diagrama representa la relación entre las consecuencias y sus causas potenciales. Su nombre surge debido a la similitud que guarda con la figura de un pez, la cual consiste en

una representación gráfica en la que se puede observar una especie de espina central, que se encuentra dibujada de manera horizontal y unida directamente con el problema a analizar el cual se encuentra escrito en esta misma línea. Partiendo de la espina central podemos encontrar cuatro o más líneas que apuntan hacia la línea central, llamadas espinas principales (ejes principales), y que estas a su vez cuentan con otras líneas o espinas, llamadas espinas secundarias. Esta técnica es útil para agrupar las causas en ejes principales que permitan delimitar responsabilidades o áreas de interés y a su vez poder seleccionar de cada grupo las causas de mayor relevancia. Los grupos pueden determinarse según conveniencia y según el evento a analizar.

El esquema de la herramienta es el siguiente:



Esta herramienta se seleccionó con el fin de ampliar el análisis y también para ordenar las recomendaciones surgidas con las herramientas anteriores según los diferentes aspectos relacionados con el evento.

Una vez aplicada esta última herramienta seleccionada se podrá deducir la causa raíz y establecer las acciones correctivas necesarias.

CAPÍTULO 4: “Aplicación de las técnicas de evaluación”

4.1. Alcance

Se aplicarán las técnicas de análisis al subsistema de baja presión dado que se encontró una mayor cantidad de causas potenciales y no se tiene certeza aún de que se haya solucionado el problema del deterioro de las membranas del mismo. Si bien se implementaron varias medidas correctivas, es necesario que transcurra un tiempo luego de las mismas sin nuevos eventos para que pueda considerarse erradicado el problema.

4.2. Diagrama de Factores Causales

Se inicia el análisis con la técnica de *Diagrama de Factores Causales*. Dicho diagrama puede observarse en el Anexo I. Se describe a continuación la evaluación realizada para su construcción y las causas potenciales encontradas.

En la primer línea horizontal del diagrama se listan los eventos en el SBP de manera cronológica y luego en forma vertical, de cada evento se desprenden los hechos y en óvalos los factores causales encontrados.

Siguiendo la cronología se evidenciaron dos factores causales que se mantuvieron en el diagrama y que se señalaron unidos por líneas discontinuas.

Los factores causales encontrados son los siguientes:

- No existe un criterio definido de cambio de las membranas: en los casos donde se decidió el cambio preventivo de membranas, no se tomó un criterio uniforme. Por ejemplo en el evento de agosto de 2014 se cambian todas las membranas del subsistema al encontrar una deteriorada y en el evento de septiembre de 2015, se cambia solo una unidad. La causa potencial que se deduce es “*falta de criterios formalizados que determinen las acciones a seguir luego de la repetición de un evento*”.
- No se tomaron en cuenta las recomendaciones internacionales para el análisis del evento: mediante la evaluación de los informes entregados por NASA se observa que no utilizan la metodología sistemática mencionada en este tipo de guías, lo cual no implica que el evento este mal analizado ni que se incumpla con lo requerido por ARN. Sin embargo, no se corresponde con una buena práctica. La causa potencial que se deduce es “*debilidad en las técnicas de análisis aplicadas*”.
- Teniendo en cuenta que en noviembre de 2016, el evento se repite, es recomendable el análisis sistemático para evitar recurrencias. Como se observa en

el diagrama se reinició la operación en noviembre de 2016 sin el análisis correspondiente. De esto también se deduce “debilidad en las técnicas de análisis aplicadas”.

Resumiendo, se encontraron las siguientes causas potenciales:

1. Debilidad en el análisis de eventos recurrentes
2. Falta de criterios formalizados para determinar el cambio de membranas
3. Debilidad en las técnicas de análisis aplicadas

4.3. Análisis de Barreras

Continuando con el análisis de las causas se aplica a continuación la técnica de análisis de barreras a fin de ampliar la lista de posibles causas potenciales. Esta técnica genera una tabla que se puede observar en el Anexo II.

Para el análisis se dividieron las consecuencias en tres:

- Estrés térmico: esta consecuencia se produce por la pérdida de tres barreras preventivas (especificaciones técnicas, margen de diseño conservativo y recomendaciones realizadas durante la puesta en marcha). Por otro lado, el diseño no contempló las condiciones ambientales particulares de la instalación en su totalidad, es decir, el margen conservativo de diseño fue una barrera inefectiva.
- Membrana con deterioro temprano: esta consecuencia se produce debido a una barrera perdida que consistió en no analizar el evento hasta diciembre de 2016.
- Arranque de planta sin el análisis de causas: para esta consecuencia se encontró una barrera perdida (cultura de la seguridad).

Teniendo en cuenta las barreras perdidas, ineficientes e inexistentes encontradas se pueden inferir las siguientes causas potenciales:

1. Deficiencia en la gestión de la experiencia operativa
2. Falta de refuerzos en capacitación sobre cultura de la seguridad
3. Debilidad en el diseño de la membrana

4.4. Diagrama de espina de pescado

Finalmente se utiliza el análisis del diagrama de espina de pescado, con el objetivo de continuar en la profundización del análisis y agrupar las causas encontradas. Para ello se parte de cuatro ejes principales: recursos humanos, Instalación, procedimientos y material (membrana). Estos ejes fueron seleccionados teniendo en cuenta que las causas potenciales dependen de diferentes sectores operativos y cuando se realicen las recomendaciones, se facilitará el trabajo de distribución. Puede verse el diagrama completo en el Anexo III.

- Recursos Humanos: esto incluye además del personal operativo a supervisores, gerentes y toda aquella persona que pueda influenciar o tomar decisiones sobre el proceso y mediante ello contribuir a la falla.

Se encontraron las siguientes causas potenciales:

- No se tuvieron en cuenta las especificaciones técnicas: las membranas por diseño tienen especificaciones que definen un rango de temperatura de trabajo, no se había verificado que se cumpla para la operación normal en cada ubicación puntual dentro de la planta.
 - Falta de análisis de causas: se realizaron reemplazos de membranas sin realizar un análisis adecuado para determinar la causa raíz.
 - No se realizó una prueba de ciclado térmico. Esto cambió a partir de la parada de 2016 donde luego de realizar termografías, se decide implementar esta acción.
 - Se colocan aislaciones térmicas en lugares no recomendables, esto es una falla en capacitación y/o de supervisión.
 - Se puso énfasis en el arranque antes que en la periodicidad del evento. Falla en la gestión de eventos.
- Procedimientos: se incluyen todos los procedimientos escritos que faltaron o pudieron mejorarse para evitar que se produzca el evento de ruptura de membranas. Se encontraron las siguientes causas potenciales:
 - Falta de criterio escrito para el reemplazo: se sustituyeron algunas membranas en forma preventiva. Sin embargo, en cada parada se tomó un criterio diferente donde se reemplazaban todas o solo algunas. Es recomendable que se aplique un criterio único.

- Instalación: se agrupan en este ítem las causas potenciales que se refieren al medio ambiente en donde se produce la ruptura de las membranas. Se encontraron las siguientes causas potenciales:
 - Diferencia de temperaturas de operación en las ubicaciones particulares de cada membrana: se realizaron termografías y se encontró que había una diferencia sustancial entre estas. Asimismo, algunas de ellas operan fuera del rango de temperaturas de diseño. Esto sufrió cambios en la parada de 2017, ya que se realizaron modificaciones y se planificaron otras como se puede ver en el punto 2.3.2 del presente informe.
 - Diferencia en las condiciones de ventilación de las membranas. Esto se modificó en la parada de 2017.
 - Las cañerías poseen diferentes inclinaciones a lo largo de las mismas. Para el caso del SBP en los tramos horizontales con válvulas de prueba en las proximidades, se evidenció acumulación de agua (con bajo PH y presencia de iones) y oxígeno, lo cual terminó en corrosión y daño de las mismas.
 - Falta de drenaje disponible durante la operación de planta en las cercanías de las válvulas de prueba (se cambió en la parada programada 2017).
 - Diferentes longitudes de cañerías que permiten diferencias en la disipación del calor.
 - Los tanques de almacenamiento de agua liviana en el SBP tenía un PH bajo y concentración elevada de iones. (También se subsanó en la parada programada 2017).
- Material: este ítem incluye todo lo relacionado con el diseño y selección del material de las membranas. Se encontraron las siguientes causas potenciales:
 - No se les realizó hasta el momento una prueba de ciclado térmico, sin embargo está planificada.
 - No poseen un diseño que contemple márgenes conservativos sobre la temperatura de trabajo.
 - Los aceros inoxidable, con presencia de iones disueltos producen corrosión por picadura, proceso que se acelera por presencia de altas temperaturas.
 - Los aceros inoxidable a alta temperatura y en medios alcalinos forman precipitados de magnetita y con presencia de oxígeno forman Hematita, lo cual produce cambios de coloración en las membranas.

- No fueron previstos en el diseño disipadores de calor ni ventilación para proteger las membranas de altas temperaturas. Sin embargo, se agregaron en la parada 2017.
- Se realizó una inadecuada evaluación de modos de falla y efectos (AMFE) en el diseño de la membrana.

4.5. Causas potenciales y causa raíz

Luego de realizar el análisis con las herramientas recomendadas por las normas internacionales, y habiendo encontrado varias causas potenciales, se puede inferir cuales son las causas raíces y cuáles son las causas contribuyentes.

Las causas contribuyentes, separadas según los sectores comprometidos y teniendo en cuenta todas las herramientas anteriormente utilizadas son las siguientes:

<i>Sector</i>	<i>Causas contribuyentes</i>
Mantenimiento	No se tuvieron en cuenta las especificaciones técnicas existentes
Experiencia operativa	Falta de análisis de los eventos hasta diciembre de 2016
Ingeniería	Falta de criterios formales para el reemplazo de membranas
	No se previeron márgenes conservativos de diseño
Capacitación	Faltaría reforzar los conceptos de cultura de la seguridad

Se listan a continuación las causas que se consideran raíces, teniendo en cuenta que son aquellas en las que pudieron prevenir la ocurrencia del evento, separada por sectores involucrados:

<i>Sector</i>	<i>Causa Raíz</i>
Ingeniería	Diseño de la membrana con un inadecuado análisis de modos de falla y efectos (AMFE)

Este evento pudo haberse evitado desde el diseño, realizando una mejor evaluación de las condiciones particulares de trabajo.

4.6. Acciones correctivas necesarias y recomendaciones

Teniendo en cuenta que durante la parada de planta 2017 se han realizado varias modificaciones propuestas por NASA, se mencionan en esta sección solo aquellas acciones correctivas pendientes desde el punto de vista del análisis realizado y que podrían utilizarse en futuros informes como recomendaciones de parte de ARN:

- No realizar tareas que modifiquen la instalación sin revisar las especificaciones técnicas de los componentes.
- El sector de experiencia operativa debería incorporar a los análisis de eventos aquellos que se produzcan con cierta frecuencia a pesar de no ser relevantes para la seguridad de manera directa.
- Se deberían crear criterios formales que incluyan los parámetros necesarios para requerir un cambio de membrana.
- Reforzar mediante capacitaciones continuas los conceptos de cultura de la seguridad.
- Realizar un AMFE de diseño para las membranas con el fin de determinar una mejor especificación técnica que permita el desempeño adecuado de la misma.
- Para el análisis de causas de eventos recurrentes utilizar las herramientas sistemáticas recomendadas por las guías internacionales con el fin de ampliar el análisis.

El análisis por sí mismo no garantiza la no recurrencia de los eventos, sino que deberá monitorearse la implementación efectiva de las acciones enumeradas.

5. Conclusiones

Partiendo de las causas aportadas por NASA, se avanzó en el análisis siguiendo las recomendaciones internacionales y se encontraron causas potenciales de las cuales se infirió la causa raíz. El análisis sistemático permitió llegar a la conclusión de que como causa raíz se puede establecer que hubo debilidades en el diseño del componente.

Es importante destacar la necesidad de un análisis sistemático para eliminar las recurrencias y para alinear la dirección de las organizaciones con las mejoras continuas necesarias para reducir la cantidad y relevancia de los eventos. Por lo tanto, sería recomendable como oportunidad de mejora la incorporación de este tipo de herramientas al análisis de eventos realizado por NASA a fin de profundizar el análisis.

Cabe destacarse que, exclusivamente con el análisis del evento no se garantiza la no recurrencia de los eventos, sino que es muy importante que se realice un seguimiento de las acciones correctivas hasta su implementación.

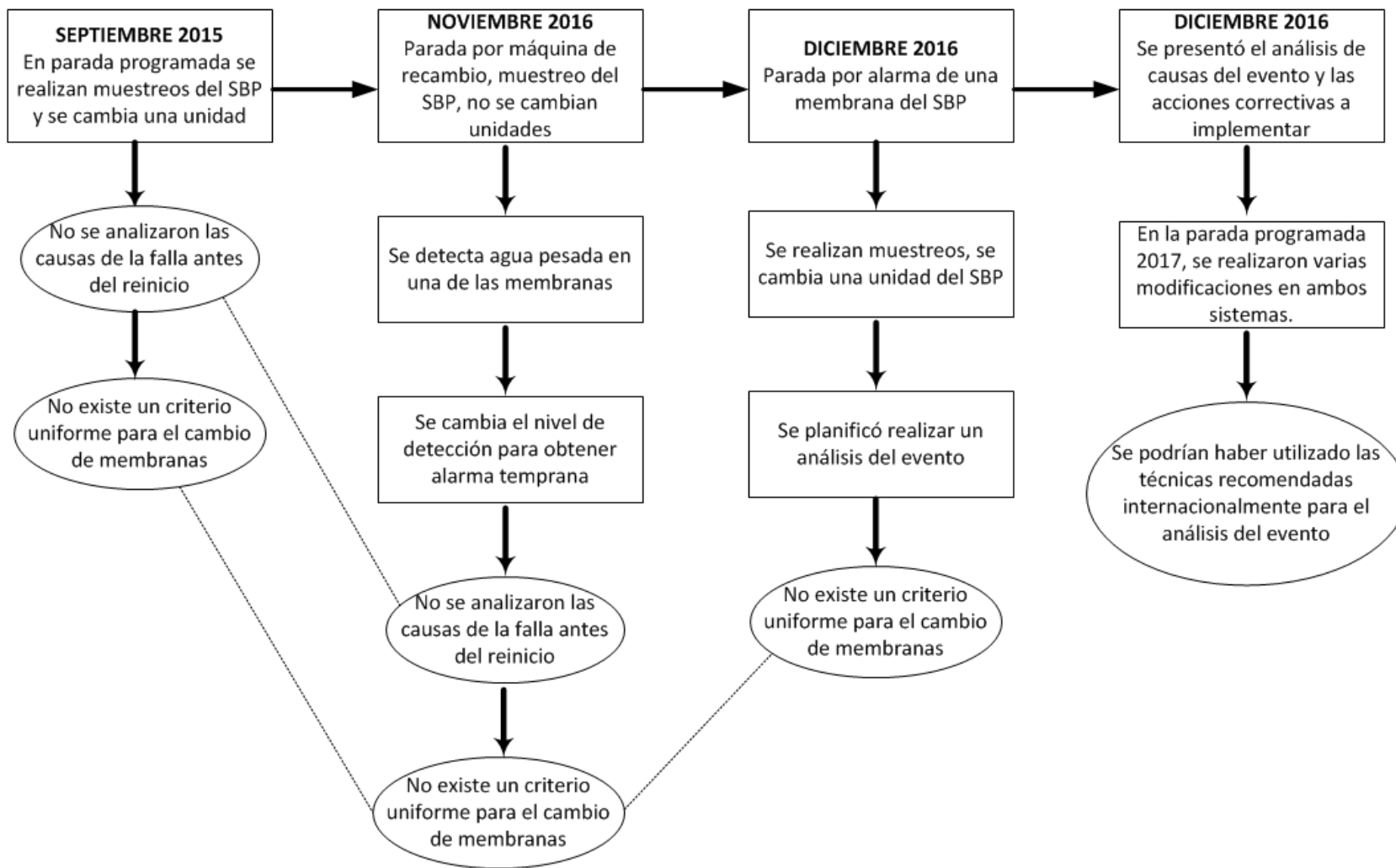
Teniendo en cuenta que se han aplicado los conocimientos de la especialización y se ha llegado a la causa raíz del evento planteado, se encontraron acciones correctivas y recomendaciones, se da por cumplido el objetivo del presente trabajo.

6. Referencias

- Clasificación de Sistemas de la CNA Unidad II Según su Función y Clase de Seguridad. PI-I-05. Rev.2. 2015.
- MANUAL DE OPERACIONES CNA II. Libro 4, Capítulo 1, Subcapítulo 14: “Sistema de inyección de seguridad JND”. NASA. C. Chavarri. Diciembre 2011.
- Manual de Mantenimiento Central Nuclear Atucha Unidad II Rev. 2. 2014.
- Informe Final de Seguridad – Capítulo 6 “Características y sismas de seguridad”. Rev.2
- OE-907, INPO 90-004: “Root Cause Analysis”. Causal Factor Worksheets.
- “Investigation of methodologies for incident analysis: Regulatory aspects (IAEA)”. Ing. Silvia Perez. Argentina, 2009.
- IAEA TECDOC-1600 “Best Practices in the Organization, Management and Conduct of an Effective Investigation of Events at Nuclear Power Plants”. Viena, 2008.
- IAEA-TECDOC-1653 “Best Practices In The Management Of An Operating Experience Programme At Nuclear Power Plants”. Viena, 2010.
- IAEA TECDOC 1581 “Best Practices in Identifying, Reporting and Screening operating Experience at Nuclear Power Plants. Marzo, 2007.
- IAEA TECDOC 1278 “Review of methodologies for analysis of safety incidents at nuclear power plants”. Marzo, 2002.
- IAEA TECDOC 4620 “Precursor analyses” Viena, Diciembre de 2003.
- TECDOC-1321 Self-assessment of Safety Culture in Nuclear Installations, Highlights and Good Practices;
- IAEA Safety Standards – Safety Guide No. NS-G-2.11: “A system for the feedback of Experience from Events in nuclear installations”. Viena, 2006.
- “Sistema JND – Sistema de Inyección de seguridad”. NASA – Departamento de operaciones. Ing. Fernando Cuvertino. Agosto, 2008.
- Informe de trabajo NASA 64/17: “Recálculo de las condiciones del agua del sumidero de CNAII post LOCA presencia de aluminio”. Cuesta, Ximena, Galarza, Guillermo. Lima. Marzo, 2017.
- GSCNA U I-II. CRT “Salida de Servicio por pérdida de estanqueidad de la membrana JND40AA008 (22/12/2016)”. Ing. Diego Garde. Lima. Enero 2017.
- NASA Evento 848/16 “Parada de planta por inestanqueidad de la válvula JND40AA008”. Contreras Gabriel. Diciembre 2016.

ANEXOS

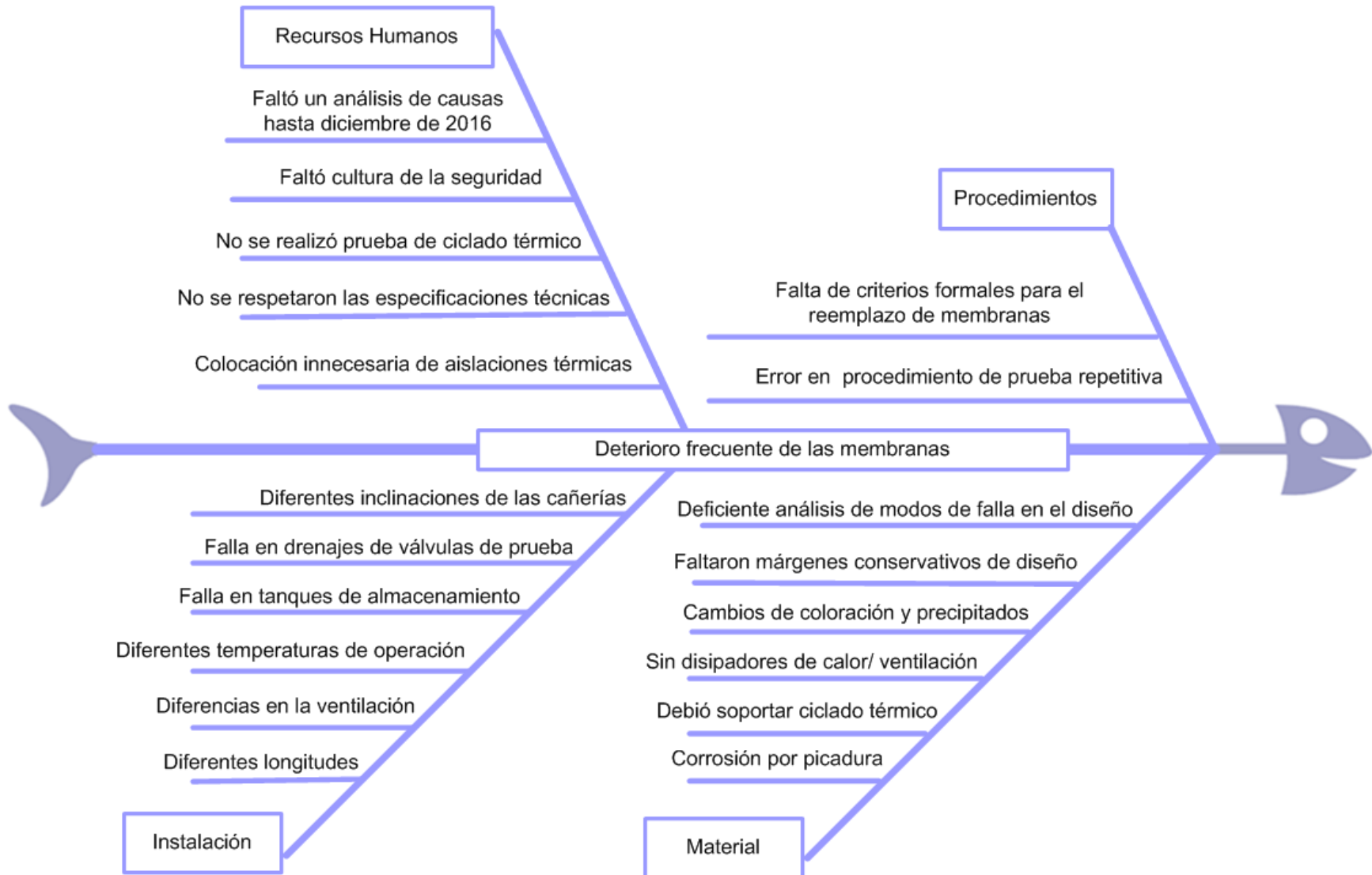
ANEXO I - Diagrama de Factores Causales



ANEXO II - Análisis de Barreras

Consecuencias	Barreras preventivas	Evaluación
Estrés térmico	Especificación técnica	Barrera perdida: se superaron las temperaturas de trabajo de la especificación técnica, ya que el rango permitido por diseño es 30°C-50°C
	Margen de diseño conservativos	Barrera inefectiva: no se diseñó en función de las condiciones particulares de la instalación
		Barrera perdida: los rango de temperaturas de trabajo no fueron conservativas
	Recomendaciones realizadas durante la puesta en marcha	Barrera perdida: se colocaron aislaciones térmicas en lugares donde no era necesario.
Membrana con deterioro temprano	Análisis de eventos	Barrera perdida: no se analizó el evento hasta la parada de 2016
Arranque de planta sin el análisis de causas/ Salida de servicio para cambio de membrana	Cultura de la seguridad	Barrera perdida: se prioriza el re-arranque frente a análisis de causas.

ANEXO III - Diagrama de espina de pescado



ANEXO IV - Historial de correcciones

Fecha	Correcciones	Corrector	Cambios
02/10/2017	Agregar un glosario	Directora	Se agregó
02/10/2017	Agregar punto de muestreo en los diagramas de los subsistemas	Directora	Se agregó
17/10/2017	Incorporar algun diagrama que resuma la aplicación de las diferentes guías de IAEA.	Directora	Se incorporó
27/10/2017	Consultar al sector de experiencia operativa de NASA sobre el análisis realizado por ellos a fin de ampliar la información.	Directora	Se consultó al sector y se incorporó nueva información al trabajo.
22/11/2017	<p style="text-align: center;">Comentarios generales:</p> <p>El trabajo comprende la evaluación del deterioro frecuente de las membranas del sistema de inyección de agua de refrigeración de emergencia, análisis de su causa raíz mediante técnicas recomendadas en guías internacionales y presentación de recomendaciones.</p> <p>Desde mi punto vista, este trabajo presenta objetivos claros, los cuales fueron cumplidos. El informe es auto-contenido, con descripciones de metodologías detalladas y concisas.</p> <p>Se recomienda analizar los comentarios y consultas que siguen, ya que influyen en los resultados del análisis realizado.</p>	Jurado	Luego de analizar los comentarios, se verificó que habrá cambios en la presentación de los resultados, sin embargo no cambia lo fundamental del trabajo. A continuación se muestran los mismos para cada caso particular.
22/11/2017	Pág. 13: En agosto 2014 se cambian las 4 membranas de alta presión, 2 por encontrarse D2O detrás de la membrana y las otras 2 en forma preventiva. El Manual de Operaciones (MdO) de ese momento no solicitaba el drenado y evacuado de las membranas del JND antes de realizar la maniobra de ir a medio caño, con lo cual, durante la ida a medio caño, las membranas fueron sometidas a un ΔP .	Jurado	Se mejora la descripción del evento teniendo en cuenta este aporte.

22/11/2017	<p>Pág. 14: En la salida se servicio de noviembre se muestrearon las membranas del sistema JND de Baja Presión (BP) como solicita el MdO. La muestra tomada del disco JND40AA008 arrojó un valor de concentración de agua pesada del 3%. Se arranca la planta tras haber bajado la alarma de falla de membrana de 90 bar a 4 bar (medida de prevención). En diciembre de 2016 se saca la planta de servicio para realizar la reparación de la rotura de la cañería de vapor. El día 21/12/2016 se realiza el arranque y el día 22/12/2016 se actúa la alarma JND40CP012 ajustada en 4 bar, (presión detrás de la membrana JND40AA008). Se evidencia un gradiente de presurización en aumento. Se comienzan las maniobras de parada de la planta hasta parada fría. Se extrajeron muestras de las demás membranas de baja presión JND10/20/30AA008, encontrando una concentración de agua pesada (D2O) del 15% detrás de la JND10AA008, con lo cual se decide su reemplazo. Producto del evento de despresurización por JR13 se muestrearon las membranas de alta presión. La muestra extraída de JND34AA010 arrojó un valor de agua pesada (D2O) de 5%, preventivamente se decide reemplazarla. Tras realizar ensayos de tintas penetrantes se concluyó que las membrana JND10/40AA008 reemplazada presentaba fisuras y fallas. La membrana JND34AA010 reemplazada presentó resultados negativos en el ensayo de tintas y prueba de Helio.</p>	Jurado	Se mejora la descripción del evento teniendo en cuenta este aporte.
22/11/2017	<p>Pág. 15: Los análisis sobre la membrana JND10/40AA008 también muestran signos de haber estado expuesta a gradientes de temperatura durante el ingreso de agua fría (30-40 °C) producto de la Prueba Repetitiva JR12.04.</p>	Jurado	Se mejora la descripción del evento teniendo en cuenta este aporte.
22/11/2017	<p>Pág. 31: "punto 8.2 de presente informe". No hay punto 8.2.</p>	Jurado	Se corrigió, el punto mencionado es el 2.3.2.
22/11/2017	<p>Se colocaron disipadores de calor en la parada programada de 2017.</p>	Jurado	Se corrigió en la página 17 como realizado (figuraba pendiente) y en la página 32 se aclaró que el hecho de que no se previeron

			disipadores se refiere al diseño.
22/11/2017	Según el MdO 2.04.02.02 “Parada desde Parada caliente hasta parada fría”, se solicita drenar agua por la válvula de muestreo de cada ramal del JND BP y tomar muestra. Con lo cual se realiza un muestreo preventivo.	Jurado	Se acepta este comentario y se elimina la observación de que no existe muestreo preventivo.
22/11/2017	<p>Las causas de reemplazo de las membranas de JND AP y BP son diferentes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • En el caso de JDN AP, se debe a que el MdO de ese momento no solicitaba el drenado y evacuado de las membranas del JND antes de realizar la maniobra de ir a medio caño, con lo cual, durante la ida a medio caño, las membranas fueron sometidas a un $\Delta P (+)$ ($P_{JND} > P_{JFC}$) debido a la columna de agua del lado JND. En el año 2014 se reemplazaron las membranas de JND AP. El MdO (Libro 2, capítulo 4, subcapítulo 2.3 – “Vaciado del sistema primario hasta medio caño”) fue modificado en septiembre 2014, resolviendo el problema. En 2016 se reemplazó preventivamente una membrana producto del evento iniciante que provocó el disparo de la señal JR13. Los eventos que causaron el reemplazo de membranas de JND AP en 2014 y 2016 fueron diferentes. • En el caso de JND10/40 BP, que presentaron fisuras, se debió a la combinación de factores de diseño y el efecto de la prueba repetitiva. La prueba repetitiva JR12.04 fue modificada en junio 2017, contemplando el vaciado de la línea de recirculación, el vaciado de la línea de inyección e incorporando determinación del volumen de muestreo del disco de ruptura como medida preventiva. <p>El análisis de ambos subsistemas debería realizarse de manera independiente, ya que las causas del deterioro de sus membranas son diferentes, habiendo subsanado del problema de JND AP en el 2014.</p>	Jurado	Se acepta el comentario y se tratarán los subsistemas por separado y se agregarán las acciones tomadas en 2014 para que se comprenda claramente.

22/11/2017	La planta cuenta con un procedimiento de análisis de eventos. Verificar cual es el período otorgado, según el nivel asignado.	Jurado	Este período venció dado que ya pasó un año (Nivel A) pero se entregó un informe donde se detallan las acciones correctivas para la parada 2017. Lo que se observa en este punto es que el sector de experiencia operativa podría haber profundizado el evento utilizando las guías internacionales que buscan fallas en los procesos de la organización más allá del problema puntual. Es a mi criterio una oportunidad de mejora, no implica incumplimiento. Esto se aclarará con más detalle en el trabajo.
22/11/2017	Acciones preventivas: Se bajó la alarma de falla de membrana de 90 bar a 4 bar. De manera preventiva se cambian las membranas. Se modificó el MdO y la prueba repetitiva.	Jurado	Se toma como acción preventiva esto en conjunto con la TDO para completarlo como acciones preventivas
22/11/2017	Mantenimiento preventivo: Contemplada dentro la prueba repetitiva y MdO	Jurado	Esto es correcto, se incorpora en el trabajo.
22/11/2017	Análisis de barreras: Según la presentación al CRT por Diego Garde: La alarma de falla de membrana se aplicó en noviembre de 2016. Se muestrearon las membranas del sistema JND como solicita el MdO.	Jurado	Esto es correcto, se incorpora en el trabajo.
22/11/2017	Respecto a la falta de acciones frente a monitoreo y alarma: Se aplicó el procedimiento de Toma de Decisiones Operativas (TDO) en ese período. En ella se asiente la necesidad de la elaboración de instrucciones para el operador, responsable y fecha.	Jurado	Esto es correcto, se incorpora en el trabajo.

22/11/2017	Se realiza un análisis no solo acotado al diseño de la instalación, sino también a las pruebas repetitivas y el MdO.	Jurado	Los cambios en las pruebas repetitivas y el MdO surgen como consecuencia de las fallas encontradas, el punto de análisis se refiere a la ampliación con las guías internacionales (siempre como sugerencia y no como incumplimiento), se aclarará esto.
22/11/2017	¿Se encontraron fisuras en las membranas del sistema JND AP? No lo indica el informe para el CRT de Diego Garde.	Jurado	No se encontraron fisuras, solo deformación. Se aclarará en el informe.
22/11/2017	Se cuenta con un ingeniero de sistemas responsable del JND, emitiendo informes de salud del mismo, al cual se le puede entrevistar para obtener mayor información.	Jurado	Se tendrá en cuenta.