

“Análisis de confiabilidad de la medición
de caudal de agua de alimentación a los GV
de CNA II”

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

Alumno: **Walker Julieta**
Director: **Andrea Lorenzo**

Marzo – 2018



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

Agradecimientos

Agradezco a mis colegas, la Ing. Mónica Álvarez (especialista en diseño de I&C de centrales nucleares), Ing. Pablo Crubellier (analista electrónico de confiabilidad), al Lic. Guillermo Urrutia (asesor técnico para ambas centrales nucleares CNA I y II), Ing. Facundo Fraguas (instructor del simulador) y al Ing. Ezequiel Andrada (operador responsable del sistema secundario en la guardia de operaciones en la central) por la continua buena predisposición que recibí en cada oportunidad que requerí de su experiencia profesional para dilucidar dudas que iban surgiendo a medida que profundizaba el estudio del funcionamiento o diseño del sistema.

A Alberto Martín Ghiselli, Jefatura del Proyecto ARAS, y a Cesar Belinco, Representante técnico del Proyecto ARAS, por autorizarme a realizar la especialización en “Reactores nucleares y su ciclo de combustible” contribuyendo a mi formación profesional dentro de la CNEA.

A Rocío Cestau, Responsable de Aseguramiento del producto del Proyecto ARAS, por darme su apoyo y relevarme en gran parte del trabajo del grupo que surgieron en las últimas semanas, permitiéndome así disponer del tiempo necesario para desarrollar este trabajo adecuadamente.

A mi directora de tesis, Andrea Lorenzo (Jefa del departamento de Gestión de Vida de Centrales nucleares e instalaciones convencionales) que aceptó guiarme a lo largo de estos meses. Por toda la dedicación y tiempo brindado para que este trabajo encuentre su curso, y pueda ir mejorándose día a día a partir de sus valiosas correcciones. Siempre dispuesta a compartir sus amplios conocimientos en el área de confiabilidad de procesos y los sistemas de la central.

Y en especial a mi familia (mi novio, hermano y padres), por acompañarme y motivarme a seguir todos los proyectos que se me ocurren, sin cuestionar nunca la locura que ellos representen.

Resumen

En el presente trabajo se realiza un estudio AMFEC sobre la cadena de medición de caudal realizada por el caudalímetro (LAB 60 CF001A/B/C) utilizado para controlar el agua de alimentación que ingresa al generador de vapor (JEA10 BC001) de la central nuclear Atucha II (CNA II).

El objetivo es mostrar la utilidad de las distintas técnicas del análisis de confiabilidad para la identificación de debilidades en el diseño, operación, mantenimiento de los sistemas de una central o planta industrial. Y como éstas resultan de gran utilidad en el proceso de toma de decisiones, ya que permiten a través de un estudio del sistema, jerarquizar los componentes críticos que requieren mayor atención para optimizar el funcionamiento.

Debido a la información y tiempo disponible, se estudió principalmente la participación de la señal LAB60 FF001 en la regulación de nivel en el generador.

Como resultados, se jerarquizaron los eventos obtenidos en el AMFEC de acuerdo a su criticidad y para todos los ítems evaluados se identificaron las medidas existentes o propuestas a fin de prevenir las causas de las fallas, corregirlas o mitigar sus efectos.

Abstract

This project consists in carrying out an AMFEC study based on the measurement chain of the flowmeter (LAB 60 CF001A / B / C) used to control the steam generator's inlet water flow (JEA10 BC001) in Atucha II nuclear power plant (CNA II).

The purpose of this work is to show how the different techniques for reliability analysis can be used on identifying weaknesses in the design, operation, or maintenance of systems in a nuclear power station or any plant. Besides, demonstrate its worth in the decision-making process, as it enable to prioritize which components are critical and require more attention in order to optimize the operation.

Due to the available information and short time available, it was studied only how the signal LAB60 FF001 leads to the level control system of the stream generator failure.

All the analyzed events of AMFEC were classified according to their critical number and in each case, the existing or proposed actions that could prevent causes of failures or mitigate their effects, were identified.

Índice

Resumen	3
Abstract.....	3
Capítulo I Introducción General	8
1.1- Introducción.....	8
1.2- Objetivos del Trabajo	9
1.3- Abreviaturas	7
Capítulo II Importancia del Sistema de agua de alimentación a los GVs de CNA II (LAB)	10
2.1- Descripción General del Sistema LAB	10
2.2- Función del Sistema LAB	12
2.3- Distintos Estados Operativos del Sistema	12
2.3.1- Operación de Arranque.....	12
2.3.2- Operación en Corriente de emergencia	13
2.4- Interfaces con otros Sistemas	15
2.4.1- Interfaz con sistema LAH.....	15
2.4.2- Interfaz con sistema JFA	16
2.5- Descripción de componentes principales de la cadena de medición de caudal	17
2.5.1- Transmisores de presión diferencial	17
2.5.2- Sensor de Temperatura	18
2.5.3- Caudalímetros LAB60/70 CF001 A/B/C	18
2.7- Detalle de las funciones del Caudalímetro	19
2.6.1- Cálculo de Potencia del lado secundario	19
2.6.2- Descripción Lazo de control de nivel de los GV de la línea principal de agua de alimentación (LAB60/70 BR004)	21
Capítulo III Conceptos teóricos	23
3.1- Descripción Técnica AMFE.....	25
3.2- Glosario de Términos	26
3.3- Metodología.....	27
3.4- Criterio De Clasificación.....	29
3.4.1- Probabilidad de ocurrencia	29
3.4.2- Coeficiente De Severidad	29

3.4.3- Probabilidad de Detección.....	30
3.5- Identificación De Ítems Críticos.....	30
3.6- Grado De Detalle.....	31
Capítulo IV AMFE.....	32
Capítulo V Resultados.....	33
5.1- Jerarquización de resultados.....	33
5.2- Hallazgos.....	35
5.2.1- Balance de masa del sistema y puntos de fuga.....	35
5.2.3- Dependencias eléctricas.....	38
Capítulo VI Conclusiones.....	41
Referencias bibliográficas	43
Anexos.....	45
Anexo 1 - Modelo de planilla AMFE.....	45
Anexo 2 - Resultados AMFEC.....	46

Lista de Figuras

<i>Figura 1 - Diagrama simplificado de la Rama de alimentación al GV 10</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2. Sistema LAH como Redundancia en la alimentación del G.V.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3. Esquema simplificado del lazo de medición LAB60 FF001</i>	<i>17</i>
<i>Figura 4. Balance entálpico del circuito secundario para estimación de potencia térmica producida</i>	<i>20</i>
<i>Figura 5. Plano del lazo de control de Plena carga JEA10DL001</i>	<i>22</i>
<i>Figura 6. Ampliación de plano funcional para el procesamiento de las señales de salida de vapor y caudal de alimentación.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 7. Suma del Error entre valor deseado y nivel medido al error anticipativo</i>	<i>24</i>
<i>Figura 8. Ampliación del plano funcional para el procesamiento de la de posición de apertura de la válvula y la señal de salida de vapor</i>	<i>24</i>
<i>Figura 9. Identificación de los caudales máxicos dentro del proceso</i>	<i>37</i>
<i>Figura 10. Trenes de alimentación de los controladores de nivel.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 11. Trenes de alimentación de los transmisores de caudal de alimentación ..</i>	<i>39</i>
<i>Figura 12. Diagrama unifilar simplificado para la instrumentación en estudio</i>	<i>40</i>

Lista de Tablas

<i>Tabla 1. Criterios adoptados para clasificación del coeficiente de probabilidad de ocurrencia</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 2. Criterios adoptados para la clasificación del coeficiente de severidad</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 3. Criterio particular para la clasificación del coeficiente de severidad en caso del cálculo de potencia térmica.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 4. Criterios adoptados para la clasificación del coeficiente de probabilidad de detección</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 5. Jerarquización de eventos analizados en el estudio AMFEC</i>	<i>33</i>

Abreviaturas

Abreviaturas	Significado
AMFE	Análisis de modo de falla y efectos
AMFEC	Análisis de modo de falla, efectos y criticidad
CNA II	Central Nuclear Atucha II
GV	Generador de vapor
IAEA	Organismo Internacional de Energía Atómica
IQ	Intercambiadores de Calor
JEA	Sistema del generador de Vapor según KKS
JFA	Sistema de agua de moderación según KKS
KKS	Sistema de identificación para centrales eléctricas
KTF	Sistema de drenajes del edificio del reactor
RESA	Corte rápido del Reactor
TUSA	Señal para el disparo de la turbina

Capítulo I - Introducción General

1.1- Introducción

Un Plan de Gestión de Vida de una central nuclear requiere para su implementación de la participación de múltiples disciplinas y especialistas. El monitoreo de Sistemas, Estructuras y Componentes identificados como críticos es una de las tareas más importantes delineadas en el documento IAEA Tecdoc 1503 “Nuclear PowerPlantLife Management processes: Guidelines and practicesfor heavy waterreactors”. La determinación del alcance y la identificación de sistemas, estructuras y componentes críticos (SSC), debería ser el punto de partida en todos los procesos de mejora continua de la confiabilidad, y en el establecimiento de los criterios de mantenimiento de equipos.

Se entiende por Confiabilidad ala **probabilidad** de que un aparato **trabaje correctamente** durante un **tiempo** determinado y en las **condiciones** de servicio en que se encuentre.

Los estudios de confiabilidad pueden realizarse a lo largo de todas las etapas de vida de un proyecto. En los inicios del proyecto, es decir durante la fase de diseño, los resultados de los estudios sirven para perfeccionar el producto que se va a obtener. Sin embargo, la aplicación de los conceptos de confiabilidad pueden realizarse durante la etapa de operación, donde el objetivo de los estudios es mejorar la disponibilidad de las instalaciones, lo cual a su vez, genera un incremento de valor de las mismas. También se busca mejorar la seguridad en la operación de los sistemas en casos donde se detecten debilidades en el diseño original. Este último será el caso de estudio sobre la central Atucha II, que ya se encuentra en la etapa de operación, donde el análisis se basará en la configuración operativa.

Existen en bibliografía diversos criterios para la clasificación de los ítems críticos dentro de un proceso. El más utilizado en el ámbito nuclear es clasificar según la importancia de la falla para garantizar el cumplimiento de funciones de seguridad. Sin embargo el estudio se puede orientar a jerarquizar por la afectación de la disponibilidad de la planta, por el cumplimiento de criterios de las reglas de mantenimiento, renovación de licencias, etc. Es decir, un sistema puede ser crítico para la disponibilidad de la central sin comprometer la seguridad de la misma.

Se cuenta con distintas técnicas de confiabilidad que pueden implementarseal momento de establecer la criticidad de los componentes. Uno de los métodos más populares en la industria aeroespacial y nuclear es el análisis de modos de falla y sus efectos. El A.M.F.E es un método que nos permite determinar los modos de fallas de los componentes de un sistema, el impacto y la frecuencia con que se presentan. De esta forma, se logran clasificar las posibles fallas detectadas por orden de importancia.

Para el presente trabajo final se optó por realizar el estudio sobre la cadena de medición de caudal realizada por los caudalímetros (LAB 60/70 CF001A/B/C) utilizados para controlar el agua de alimentación que ingresa a los generadores de vapor (GV's) de la central nuclear Atucha II (CNA II).

Esta variable resulta de interés, a pesar de no tratarse de instrumentación del sistema de protección del reactor, ni de sistemas de seguridad en su mayoría, ya que la alimentación de agua a los generadores de vapor permite llevar a cabo la función de seguridad de refrigeración del reactor, siempre que haya suministro eléctrico normal. Y son usados durante los primeros minutos, hasta que el sistema de refrigeración asegurada puede cumplir la función de acuerdo al diseño.

Adicionalmente se puede utilizar esta medición en el cálculo de potencia del lado secundario, lo que permite evaluar la performance alcanzada por la central. Por consiguiente, un desvío en su medición impactaría en el rendimiento calculado de la planta. Y una falla del sistema podría llegar a provocar la salida de servicio de la central, afectando la disponibilidad de la misma.

Por último, tal como se muestra luego en el informe mediante un balance de masa, las mediciones de caudal llevadas a cabo en la impulsión de las bombas de agua de alimentación (LAC) puede ser usada como una medición funcional y físicamente diversa de la analizada en el ingreso a los generadores de vapor, sirviendo como una rápida verificación del correcto funcionamiento del sistema.

1.2- Objetivos del Trabajo

El objetivo es mostrar la utilidad de las técnicas del análisis de confiabilidad para identificar debilidades en el diseño, operación, mantenimiento, etc; y proponer medidas que prevengan las causas de las fallas, las corrijan o mitiguen sus efectos.

El alcance de este trabajo final abarcará como técnica de análisis un estudio AMFE sobre la medición de caudal realizada por los caudalímetros (LAB 60/70 CF001A/B/C) utilizados para controlar el agua de alimentación que ingresa a los generadores de vapor (GV's) de la central nuclear Atucha II (CNA II), a partir del cual se busca jerarquizar los riesgos asociados a fallas en el sistema.

Para esto es necesario categorizar, en función de criterios preestablecidos, la probabilidad de los posibles modos de fallas del sistema, la severidad de las consecuencias que se esperan a raíz de ellos y la probabilidad de detección de los eventos iniciantes. Luego, se calculará para cada ítem, su correspondiente número de criticidad, el cual es producto de los coeficientes asignados de acuerdo a la categorización. Este número de criticidad es un índice de riesgo que permite filtrar los eventos anormales clasificándolos en críticos o no. En caso de aquellos que surgen como ítems críticos, se propondrán acciones preventivas que representen una mejora ya sea reduciendo o previniendo la probabilidad de ocurrencia, corrigiendo la falla mejorando la capacidad de una detección temprana o disminuyendo o mitigando el efecto de las consecuencias.

Capítulo II - Importancia del Sistema de agua de alimentación a los GV's de CNA II(LAB)

2.1- Descripción General del Sistema LAB

El sistema LAB es el conjunto de cañerías que toma agua del tanque de agua de alimentación y la envía hasta los G.V.

El caudalímetro (LAB60 CF001) y su cadena de medición, objeto del presente estudio, pertenecen a dicho sistema. Su codificación responde a una convención internacional, Ref. /7/. Serán descriptos en la sección siguiente.

La temperatura del agua a la salida del tanque es de 120°C. Desde allí el agua es bombeada por el Sistema de Bombeo de Agua de Alimentación (LAC). Las bombas LAC son tres. En operación normal funcionan dos y la otra está de reserva en espera de demanda.

La Figura 1 es un diagrama simplificado de una de las ramas del sistema, el cual está basado en el plano de Ref./9/. A continuación se describirán los componentes principales.

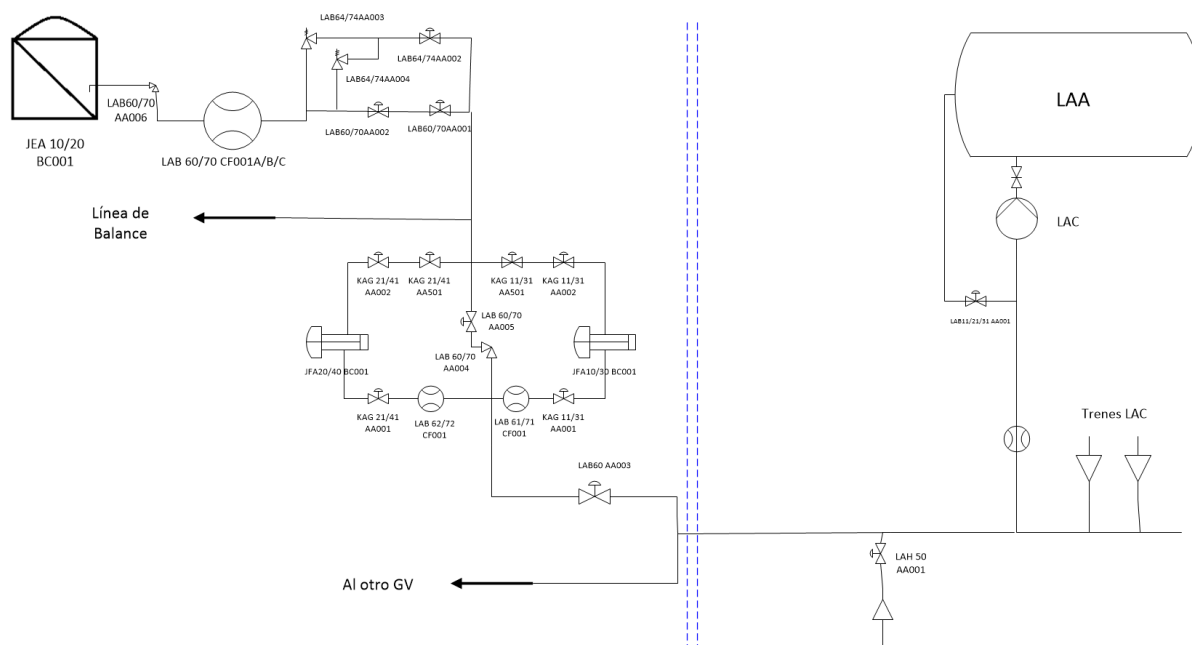


Figura 1. Diagrama simplificado de la Rama de alimentación al GV 10

En el ramal de impulsión de cada bomba se encuentra una válvula esclusa con candado, que evita el cierre, una válvula de seguridad y la medición de caudal del ramal.

Los tres ramales de descarga de las bombas LAC se unen en un colector común, y antes de ingresar al Edificio de Válvulas UJE, la cañería se vuelve a dividir en dos ramales. Cada uno posee una válvula esclusa que produce la aislación en caso de ser requerido.

Una vez dentro de la esfera, cada uno de los ramales se asocia a dos Intercambiadores de Calor del Moderador. En operación normal funcionan los cuatro intercambiadores. En dichos intercambiadores, el agua del sistema LAB actúa como refrigerante del moderador. La regulación de temperatura del moderador en el valor deseado se realiza modificando el caudal de agua de alimentación que circula por el bypass de los IQ con respecto a la fracción que se hace circular a través de los mismos. Este intercambio de calor actúa a su vez como precalentamiento de la alimentación a los GV. La temperatura de salida del agua del sistema LAB aumenta hasta 170°C aproximadamente.

Aguas abajo de los Intercambiadores de calor del moderador, las dos líneas principales se interconectan mediante la línea de balance. La misma tiene la función de abastecer de igual manera a ambos Generadores de Vapor. Adicionalmente, en caso de rotura de alguna de las cañerías permite la desvinculación inmediata de ambos ramales mediante dos válvulas de cierre rápido en configuración serie. En operación normal se adoptó la configuración cerrada de esta línea.

Existe una estación de válvulas antes del ingreso a los G.V. que tiene la función de regular el caudal alimentado. Dicha variable tiene impacto directo en el control de nivel dentro del equipo.

Cada estación de válvulas consta de una válvula de bloqueo en serie con una reguladora. Para operación en plena carga, la válvula de bloqueo es la LAB60/70 AA001, mientras que la reguladora es la LAB 60/70 AA002. Estas son bypassadas por una línea de baja carga diseñada para un máximo del 30% del caudal de agua de alimentación a plena carga.

Esta línea está provista también de una válvula de bloqueo (LAB64/74 AA002) en serie con otra controladora (LAB64/74 AA003).

La línea de baja carga puede ser “bypassada” por otra línea de muy baja carga que cuenta con una reguladora (LAB64/74 AA004) que asegura un suministro continuo al G.V. cuando el caudal es menor a 5kg/s.

En operación normal, cuando el caudal oscila entre el 30% y 100% del valor a plena carga, trabaja la válvula reguladora de plena carga (LAB60/70 AA002).

En caso de que estén en operación dos o cuatro de las bombas de arranque y parada se va a conmutar automáticamente a la válvula controladora de baja carga (LAB64/74 AA003) que regula el caudal cuando este varía entre 5 a 30%.

Cuando opera solo una de las bombas LAJ se conmuta automáticamente a la válvula controladora de muy baja carga (LAB64/74AA004) encargada de la regulación cuando el caudal varía entre 0 y 5% del caudal a plena carga.

Finalmente, una válvula de retención (LAB60/70AA006) está instalada en la línea de agua de alimentación directamente en contacto con la conexión de entrada al G.V. para prevenir pérdidas de agua en caso de una rotura de cañería entre la estación de válvulas del control de nivel y el G.V.

2.2- Función del Sistema LAB

La función principal del sistema LAB es suministrar el agua desde el tanque de agua dealimentación (LAA) hasta los Generadores de Vapor durante los distintos estados operativos de potencia de la planta, incluso durante la llamada operación de by-pass de turbina.

Como se puede observar en la Figura 1, el sistema está conformado por las bombas LAC, dos ramales que pasan a través de los IQ del moderador en cada rama de alimentación que cada una conduce a uno de los dos generadores. En este, se puede visualizar las cañerías y equipos principales.

El sistema LAB es un sistema de seguridad en lo que hace a la sección de cañerías que va desde las válvulas de aislación de edificio (LAB60/70 AA003) hasta los generadores.

Las funciones de seguridad de este tramo son:

- a) Controlar el nivel de agua en los G.V. en el valor deseado (Set Point) de 12,2 m.
- b) Aislar al Generador de vapor en el caso de una rotura de cañerías previniendo su vaciado.

El resto de los tramos del sistema no son de seguridad.

2.3- Distintos Estados Operativos del Sistema

2.3.1- Operación de Arranque

El sistema de arranque y parada posee una conformación similar al sistema de operación normal. Mientras la potencia del reactor es menor o igual al 3%, el conjunto de cañería y válvulas que envía el agua desde el tanque de agua de alimentación al generador de vapor recibe el nombre de LAH según el sistema de identificación KKS utilizado. Las bombas encargadas de bombear la misma se denominan las bombas LAJ.

El agua puede ser bombeada a través de las cañerías del LAB o por el mismo sistema de cañería LAH ante eventuales fallas del LAB, dado que también conducen al G.V.

El sistema de arranque y parada presenta a su vez en su trayecto unconjunto de válvulas de control para regular el nivel en los G.V.

La secuencia de arranque de planta consiste en: una vez lleno el LAA (punto más alto del sistema secundario), se arranca una de las bombas LAJ con la válvula de bloqueo de la descarga cerrada y se utiliza la línea de By-pass (que tiene una restricción de caudal) a fin de evitar golpes de arietes en las líneas e ir venteando el aire acumulado.

Una vez llenas las cañerías del LAB, LAH y el GV, se comienza a precalentar el tanque LAA con el sistema LBG, hasta alcanzar una presión de 1,6bar. Este sistema estará conectado para mantener la temperatura del tanque durante todo el arranque. Luego se bombea agua caliente utilizando las bombas LAJ, mientras que se precalientan las bombas LAC.

El LAH alimenta al sistema LAB por medio de la línea LAH50 BR002, donde está ubicada la válvula LAH50 AA001. El tapón de agua fría ubicada en la cañería principal es cargado en el G.V., el cual antes de esta maniobra tiene 9m aproximadamente y después alcanza los 11m.

Una vez lleno el G.V. hasta los 11m, se arranca el precalentamiento del primario arrancando las bombas del refrigerante, mientras se finaliza el llenado hasta los 12,2m con las LAJ.

Una vez alcanzado los **5bar de presión de vapor**, se abre la válvula de vapor principal, con lo cual se precalienta el resto de la línea de vapor vivo y la turbina.

La presión en el secundario continuará creciendo hasta los **23bar**, momento en el cual se conmutan los enfriadores del moderador a su modo de operación normal, es decir precalentando al sistema LAB, y se hace crítico el reactor. A su vez, se abre la línea de By-pass a la turbina.

Se arranca la primera de las bombas LAC. Una vez en marcha, se coloca en modo automático el regulador de temperatura del moderador y se comienza a aumentar la velocidad de la turbina hasta alcanzar los 1500 rpm de operación normal.

Simultáneamente el reactor alcanza el **20% de potencia de salida**, momento en el cual se conecta la segunda bomba LAC. Luego, se sincroniza la turbina y se le da carga.

2.3.2- Operación en Corriente de emergencia

Se define la situación de Corriente de Emergencia, al estar la planta operando al 100% de su capacidad, y aislarse de la red exterior y no poder mantener su consumo propio.

Permanentemente se mide tensión y frecuencia por medio del sistema de protección del reactor, en las barras eléctricas. Esa medición genera una señal de arranque de los cuatro diesel de emergencia, en caso de quedarse más de 2s con una tensión menor al 80% del valor normal, o si la frecuencia es menos a 47,2Hz.

Al quedarse sin tensión para consumo propio y no poderse conectar con la red exterior, se paran los siguientes equipos de bombeo:

- Bombas de refrigeración (cuando las revoluciones de la bomba son menores que un mínimo se dispara RESA y luego TUSA),
- Bombas LAC
- Bombas de refrigeración del condensado (PAC), implica la pérdida de vacío en el condensador. Esto termina generando, por falta de refrigeración y atemperado en el condensado, que salga de operación el bypass de turbina, dejando interrumpido el circuito secundario.
- Bombas de condensado principales (LCB), se queda sin alimentación el tanque LAA.

En un primer momento aumenta la presión a la salida del G.V. y va a abrir la válvula de alivio controlado y las válvulas de seguridad.

Las bombas LAJ se conectan por bajo caudal en la línea de vapor principal.

Al salir las LCB fuera de servicio, no entra más agua al tanque LAA y tampoco va a entrar vapor de la extracción lateral de la turbina. La temperatura y la presión se mantienen hasta que comienza a ingresar agua desmineralizada del sistema GHC, en cuyo caso, la temperatura y presión van a empezar a disminuir. Cuando se alcance una presión de 1,6 bar (113°C) van a abrir las válvulas controladoras que dejan pasar vapor vivo al tanque LAA para mantener una presión de 1,6 bar.

Siempre que tenga RESA se cerrará el precalentamiento del agua de alimentación a través de los IQ del moderador y el caudal circulará a través del bypass del LAB.

El contenido de agua en dos G.V. con nivel nominal de 12,2m, una vez provocado el RESA, me alcanza para llevar la planta a subcrítico caliente. (220°C y 23 bar en el lado secundario). Luego, el calor se continuará extrayendo de forma residual, evacuándose forzosamente mediante la entrada en servicio del sistema KAG, en el momento que la temperatura genere una fatiga admisible pero no deseable. Recién cuando el secundario alcance los 120°C la conexión del KAG sufrirá una fatiga térmica muy baja, prolongando su vida útil.

El contenido de agua en los dos G.V. más la masa de agua asegurada del LAA, bombeada estas últimas por medio del sistema LAH alcanzan para llevar la planta a subcrítico frío.

Existe otro caso en que, si además de usar los dos G.V. y el agua asegurada del LAA, se emplea también el inventario asegurado del sistema, permitiendo llevar a la planta desde los 26 bar hasta subcrítico frío por la regulación operativa a través de un

descenso de la temperatura en el secundario. Esto permite disponer de los dos generadores llenos de agua, y poder conectar al KAG con un bajo requerimiento de fatiga térmico.

2.4- Interfaces con otros Sistemas

2.4.1- Interfaz con sistema LAH

El sistema LAH resulta un sistema redundante o diverso al sistema LAB que permite alimentar al GV en caso de no estar disponible este último.

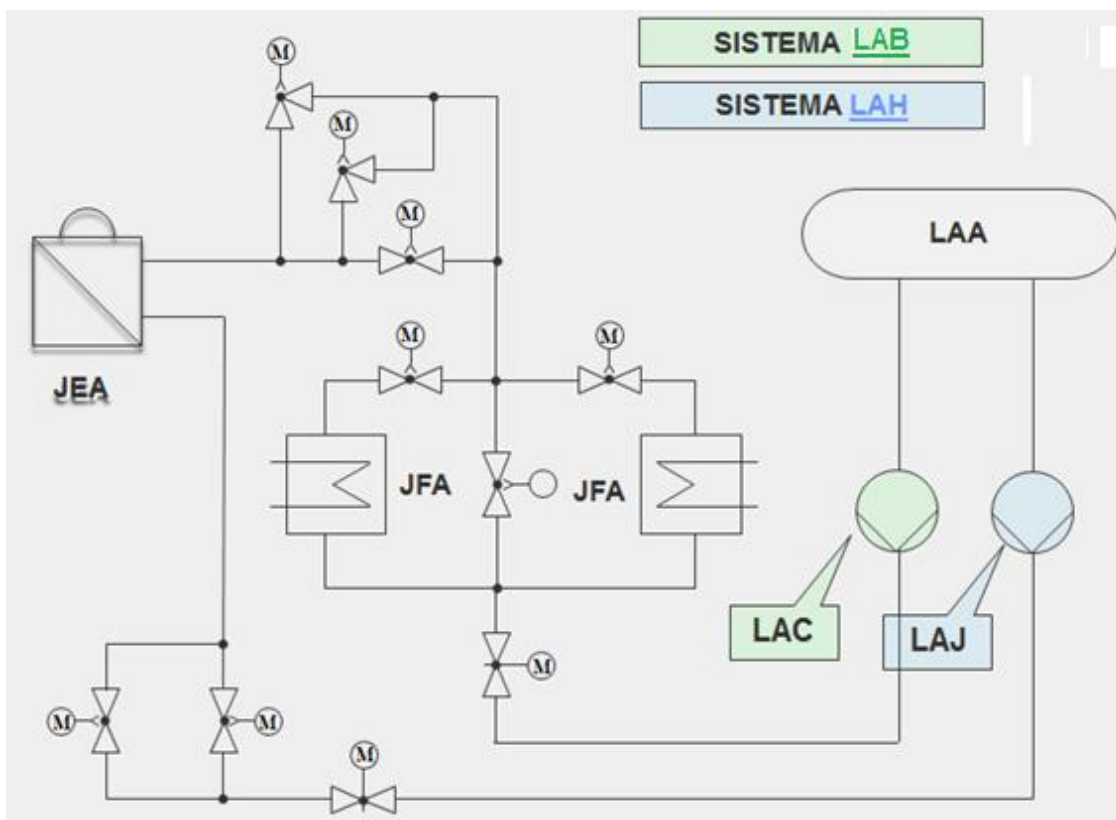


Figura 2. Sistema LAH como Redundancia en la alimentación del G.V.

En la Figura 2, se muestran los equipos principales que conforman cada uno de ambos sistemas. Como puede observarse, el sistema LAH, está conformado por el conjunto de bombas LAJ (4 unidades que operan en 2/4), la cañería auxiliar de alimentación, y cuenta con su propia estación de válvulas.

Este sistema está encargado de suministrar agua durante el arranque y la parada normal de la planta, permitiendo al sistema LAB precalentarse mientras la planta opera

por debajo de 3% de la potencia de salida del reactor, potencia a la cual este empieza a estar operativo.

Al igual que la mayor parte del sistema LAB, el sistema LAH no es un sistema de seguridad, pero cuenta con un diseño n+2 y está conectado a la red diesel de emergencia, por lo que si se considera como un sistema de alta disponibilidad o “casi” de seguridad.

Las principales funciones del sistema LAH son el suministro de agua de alimentación al G.V, para asegurar la remoción del calor residual, en el eventual caso de la falla de corriente normal, o sea corriente de emergencia, o ante la falla de las bombas de agua de alimentación LAC, o por una rotura de cañería del ciclo vapor, condensado y agua de alimentación, lográndose con la utilización de LAH disminuir la demanda de los sistemas de seguridad, como el KAG, para la remoción de calor residual.

2.4.2- Interfaz con sistema JFA

El caudal circulante por el sistema LAB actúa como fluido refrigerante del moderador en los intercambiadores de calor del sistema de moderación, sistema JFA de acuerdo a la identificación KKS.

Los dos ramales principales de cañerías de alimentación, se bifurcan nuevamente de manera de alimentar cada rama en paralelo a dos de los intercambiadores. En estos equipos, además de refrigerar el agua de moderación, el intercambio precalienta el agua de alimentación a los generadores de vapor.

Adicional a las bifurcaciones a los IQ JFA, se cuenta con un by-pass que permite regular el caudal de refrigerante que se hace circular por los mismos. Dicho caudal se regula de forma de controlar la temperatura de salida del moderador en el lado primario. Así, el agua by-passada alimenta directamente a los generadores de vapor sin realizar intercambio.

Las válvulas de control LAB60/70 AA005 son las que regulan el caudal a través de los intercambiadores en combinación con las KAG11/21/31/41 AA501, aguas abajo de ellos.

Para impedir la inversión de flujo durante los accidentes con pérdida de refrigerante en la línea de alimentación y aislar el área de rotura, se localizan válvulas esclusas KAG11/21/31/41 AA001 aguas arriba del intercambiador y LAB60/70 AA004 aguas arriba de las válvulas de bypass LAB60/70 AA005.

2.6- Descripción de componentes principales de la cadena de medición de caudal

En el diagrama de la Figura 3, se muestra el lazo de medición en estudio que genera la señal de caudal LAB60/70 FF001, arrancando por las variables del proceso, luego su procesamiento por el control de nivel para finalmente actuar sobre el elemento final de control que es la válvula reguladora de plena carga.

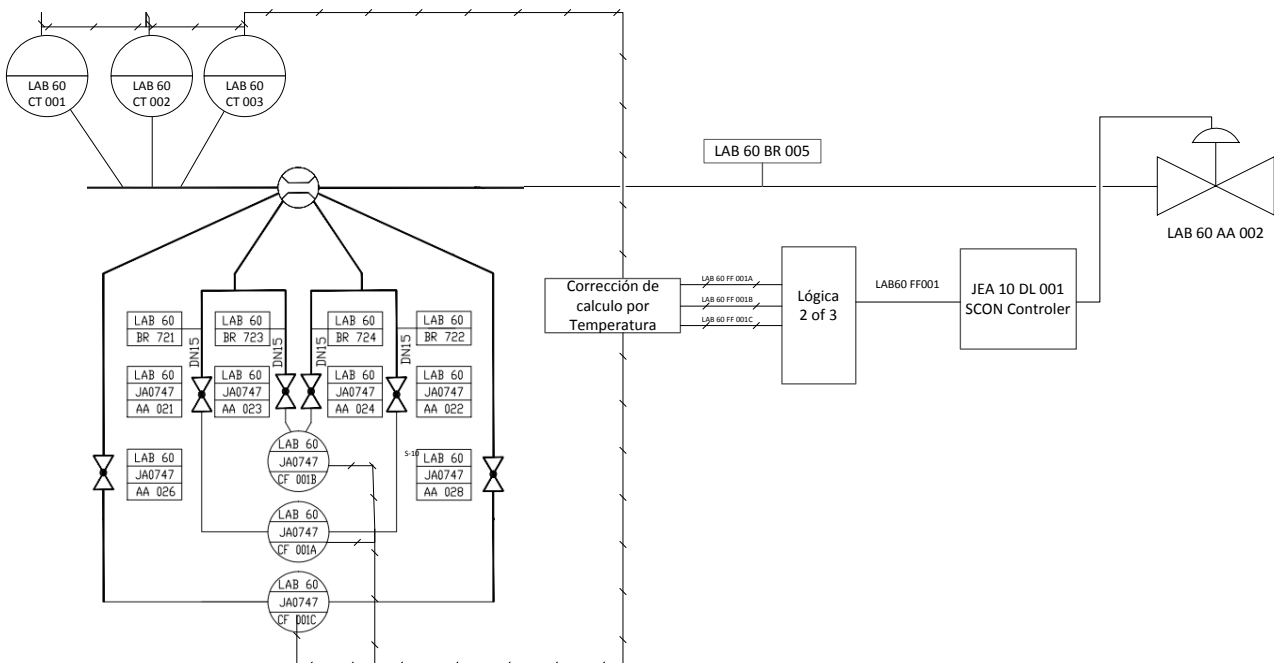


Figura 3. Esquema simplificado del lazo de medición LAB60 FF001

2.5.1- Transmisores de presión diferencial

Los transmisores utilizados para la medición de caudal de alimentación son modelo 7MF1103-3AF1-Z. Se trata de un sistema de cuatro-hilos (PN 100) aprobado para utilizarse en sistemas de ingeniería energética.

El PN 100 tiene para el cálculo de flujo un Span de 150 a 600 mbar. La señal de salida va de 0 a 20 mA.

La cadena de medición en estudio cuenta con 3 transmisores redundantes entre sí, conectados a una única placa orificio de fabricación alemana (de acuerdo a la norma DIN 1952). Las tres señales obtenidas son procesadas luego mediante una lógica 2/3 para obtener luego la medición final.

2.5.2- Sensor de Temperatura

Variaciones de temperatura en la corriente de alimentación provocan un cambio en sus propiedades fisicoquímicas, principalmente su densidad. La densidad del agua interviene en el cálculo de caudal realizada a partir de la diferencia de presión generada en la placa orificio, por lo que es necesario implementar durante la operación una corrección de temperatura a la señal medida por el caudalímetro.

Esta corrección por temperatura se realiza mediante sensores Geber PT 100. Los mismos operan en un rango de 0 a 450°C.

La PT100 es un sensor de temperatura que a 0 °C tiene 100 ohms y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica.

2.5.3- Caudalímetros LAB60/70CF001 A/B/C

Los caudalímetros ubicados en las líneas LAB60 BR004 y LAB70 BR004 de alimentación utilizan como instrumento de medición una placa orificio la cual fue diseñada de acuerdo a la Ref. /5/, Norma DIN 1952,

A partir del manual de operación del sistema LAB y un análisis detallado del sistema, se identifica como principales funciones de estos instrumentos las listadas a continuación.

Funciones operativa:

1- Indicar el flujo de agua de alimentación a la entrada de cada G.V en un rango de operación de 0 a 600kg/s. Cuenta con tres lazos de mediciones redundantes, los cuales se procesan mediante una lógica 2 de 3 y se obtiene un valor del flujo presente en cada corriente de alimentación.

2- La medición de caudal obtenido interviene en las lógicas de control de nivel de los generadores JEA10/20 DL001 y JEA10/20 DL002. Junto con el caudal de la salida de vapor vivo, la diferencia entre ambas mediciones es utilizada para el cálculo de la acumulación dentro del equipo y procesada para predecir la variación de nivel que ocurrirá en el equipo. La tasa de cambio registrada se contrasta con el nivel real medido dentro de los equipos y la lógica actúa consecuentemente sobre la posición de las válvulas de control regulación del nivel.

3- La señal de caudal de agua de alimentación del generador de vapor es utilizada para el cálculo de potencia térmica de la central. Este valor es utilizado para contrastarse con la medición de potencia eléctrica producida. El algoritmo genera la señal CRW05FJ XQ01.

2.7- *Detalle de las funciones del Caudalímetro*

2.6.1- Cálculo de Potencia del lado secundario

La potencia producida por la central puede calcularse por distintos medios. Para la facturación de la planta, se utiliza directamente la medición a partir de la potencia eléctrica entregada a la red. Con respecto a la potencia térmica producida, el cálculo se realiza mediante un balance entálpico del secundario. Esto es debido a que el caudal circulante por el circuito primario, no es una variable medida sino una estimación.

Es importante remarcar que para hacer una evaluación completa del calor nuclear que le llega al circuito secundario, donde ocurre el ciclo térmico, es necesario incluir en el análisis, no sólo a los generadores de vapor, sino también a los intercambiadores del moderador (tren de precalentamiento del agua de alimentación), tal como se muestra en la Figura 4., dado que el sistema del moderador transfiere al secundario el calor proveniente de la moderación de neutrones.

Realizando el balance entálpico del circuito secundario para obtener la potencia térmica, obtenemos la siguiente expresión:

$$\Delta\dot{H}_{\text{Sec}} = \frac{(\dot{m}_v * h_v) + (\dot{m}_{\text{purga}} * h_{\text{purga}}) - (\dot{m}_{\text{alim}} * h_l)}{3600\text{s/h}}$$

Dónde:

$\Delta\dot{H}_{\text{Sec}}$ es el salto entálpico por unidad de tiempo en el circuito secundario,

\dot{m}_v , \dot{m}_{purga} , \dot{m}_{alim} son los caudales de vapor, purgas y alimentación

h_v , h_p y h_l corresponden a las respectivas entalpías específicas

El caudal \dot{m}_{alim} es medido por las cadenas de medición LAB60/70 FF001.

En el siguiente diagrama (Figura 4.) se muestra la instrumentación del sistema que permite realizar el balance.

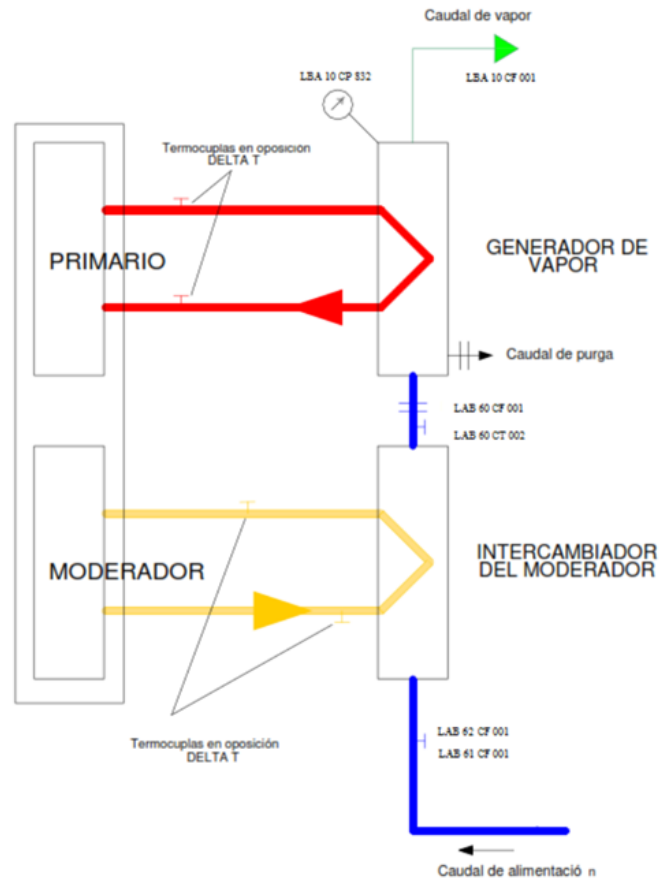


Figura 4. Balance entálpico del circuito secundario para estimación de potencia térmica producida

Como dicha energía térmica debe ser igual a la cedida por el primario, si se supone a los intercambiadores de calor adiabáticos, surge el balance de energía sobre el volumen de control “primario”:

$$Pot_{Térmica\ secundario} = Pot_{térmica\ nuclear} + Pot_{bombas\ principales} - Pot_{aislación} - Pot_{control\ volumen}$$

Para cuantificar la cantidad de calor cedida por el reactor al agua pesada que circula por los circuitos Primario (QH) y Moderador (QM) se dispone de mediciones capaces de determinar el salto térmico (ΔT) entre los ramales de entrada y salida de cada circuito.

Por último, los términos no nucleares (Potencia de bombas principales – Pérdidas al ambiente – Pérdidas a control de volumen) pueden ser evaluados experimentalmente y ser reemplazados en el cálculo por un valor que puede suponerse constante.

2.6.2- Descripción Lazo de control de nivel de los GV de la línea principal de agua de alimentación (LAB60/70 BR004)

El nivel de los G.V. es regulado por medio de tres lazos de control independientes, JEA10/20 CL 001/2/3, cuyo rango de medición varía de 7,82 a 15,71 m.

El controlador JEA 10/20 DL001, tiene asociado como elemento final de control, la válvula de control principal de plena carga (30% a 100%) LAB60/70 AA002, cuyo valor deseado es 12,2m. Por debajo de 30% de carga, actúa el controlador JEA 10/20 DL0002, el cual tiene asociado como elemento final de control a la válvula de control de baja carga (5% a 30%) LAB 64/74 AA003, cuyo valor deseado también es 12,2m. Por último, tenemos el controlador JEA10/20 DL003, quien tiene asociado como elemento final de control a la válvula de control de muy baja carga (menos de 30kg/s) LAB64/74 AA004, cuya banda proporcional varía de 12,2 a 11,2m. Este último lazo opera durante el arranque y la parada de la planta, y será conectado al modo de control automático por el operador, de acuerdo a las condiciones operativas tales como una baja carga menor a 30kg/s.

Los primeros dos lazos tienen un valor deseado común (12,2m) y un dispositivo de conmutación automático que depende de la carga instantánea.

La conmutación desde la válvula de control de plena carga (LAB 60/70 AA002) a la válvula de control de baja carga (LAB 64/74 AA003) actúa cuando el caudal de alimentación disminuye hasta aproximadamente 145Kg/s (equivalente al 30% del caudal total de agua de alimentación). Si el caudal disminuye por debajo de 30 kg/s se conmuta el control desde la válvula de control de baja carga hasta la válvula de control de muy baja carga (LAB 64/74 AA 004), de manera tal que aún con muy pequeños caudales de alimentación se asegura un flujo continuo de agua de alimentación a través de la boquilla de entrada al G.V. Esta función es importante para la operación de la central ya que previene así una fatiga térmica en la conexión del G.V., la cual podría ocurrir con un suministro intermitente de agua de alimentación.

La señal de estudio (LAB60/70 FF001) no participa en la regulación de baja carga regulada por el controlador JEA10/20DL002, ni en la regulación de muy baja carga realizado por JEA10/20DL003. Es por esto que el análisis se centra principalmente en el lazo de control de nivel de Plena carga, JEA10DL001.

En la Figura 5., se muestra el plano funcional del lazo de control de nivel JEA10 DL001.

Las variables físicas principales del proceso que intervienen en este lazo son: El nivel en el G.V. (JEA10/20FL001), el caudal de agua de alimentación (LAB60/70 FF001), el caudal de vapor vivo (LBA10/20 FF001) y el porcentaje de apertura de la válvula reguladora (LAB60/70 CG002). Esta última señal se utiliza como medición alternativa para estimar el caudal alimentado al GV. Y a su vez, participa en la regulación como retroalimentación en el cálculo del error entre la señal de porcentaje de apertura enviada por el controlador y la posición real de la válvula LAB60/70 AA002.

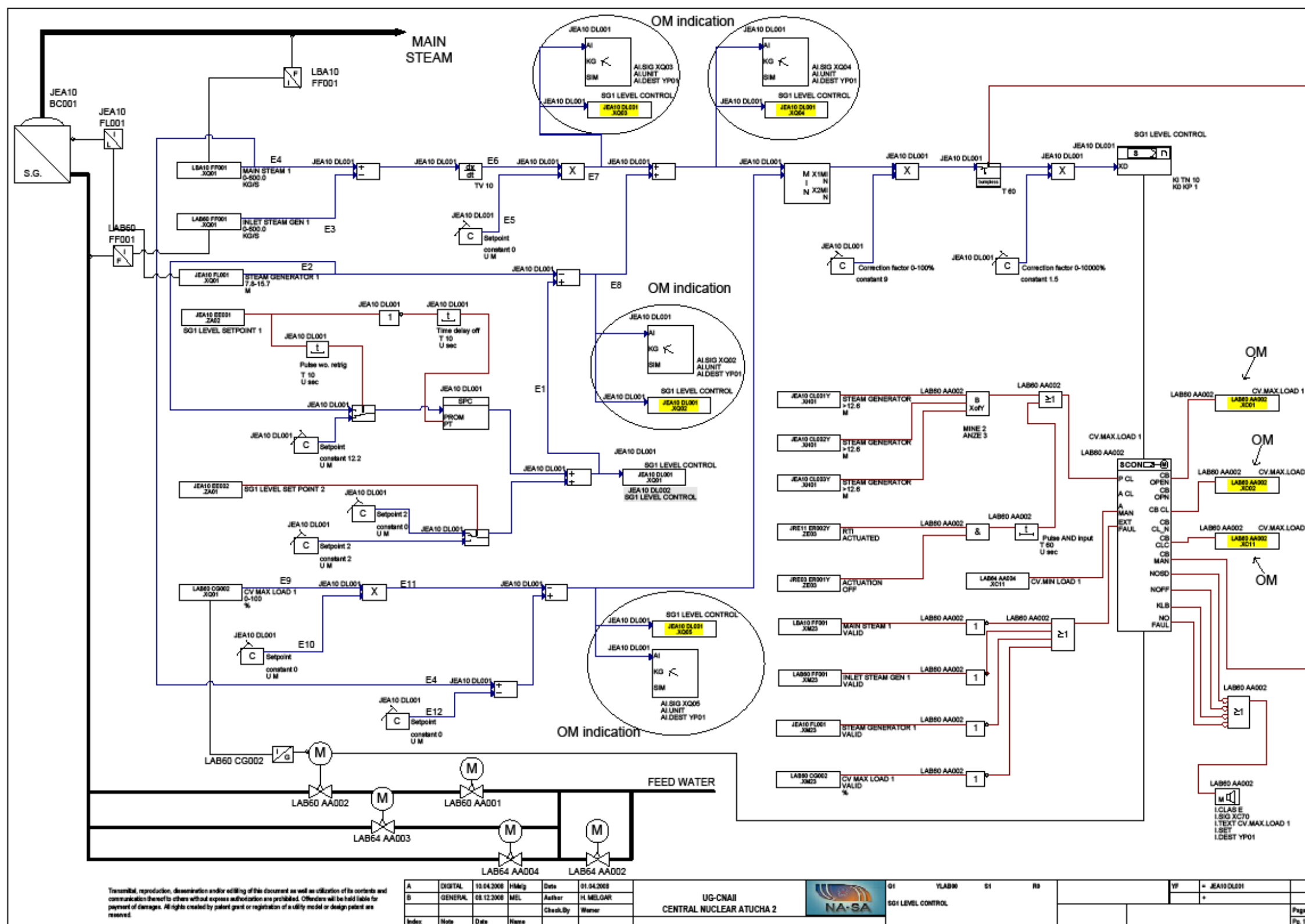


Figura 5. Plano del lazo de control de Plena carga JEA10 DL001

Cada una de estas señales está conformada en tres canales de medición independientes en conjunción con un dispositivo que realiza el procesamiento con lógica dos de tres para entregar una única señal de cada variable.

Adicionalmente, la señal de RESA (JEA10 EE001.ZA02) y la señal de RESA manual (JEA10 EE002.ZA01) tienen como objetivo la liberación del valor deseado para permitir que la regulación acompañe al valor real durante 10 segundos. Esto es debido a que luego de un RESA, el GV se enfría rápidamente como resultado de la caída de potencia, provocando la desaparición de burbujas y una consecuente caída del nivel. De no contarse con este módulo, el lazo buscaría abrir a un 100% la válvula reguladora generando un estrés innecesario al equipo.

En la Figura 5 puede observarse como el nivel en los generadores es controlado por tres mediciones distintas.

En primer lugar, el lazo contrasta el caudal de vapor a la salida contra el caudal de alimentación, y luego realiza un paso derivativo a fin de obtener una respuesta anticipativa a variaciones bruscas que pudieran impactar en el nivel resultante. Se muestra el detalle ampliado del procesamiento de estas señales en la Figura 6.

A este error anticipativo, se le suma el calculado a partir de la diferencia entre el valor medido directamente por los controladores de nivel y el set Point cargado. Se puede observar, en la ampliación de la Figura 7, como este set Point es el que se modifica en caso de recibirse la señal de RESA.

Paralelamente, se genera una medición indirecta de nivel, a partir de la diferencia entre el caudal de vapor generado y un caudal estimado a partir de la posición de apertura de la válvula reguladora LAB60 AA002. Detalle se muestra en Figura 8. Ambos errores ingresan en un selector de mínima que es el que envía el valor final de nivel a regular a la tarjeta SCON del controlador.

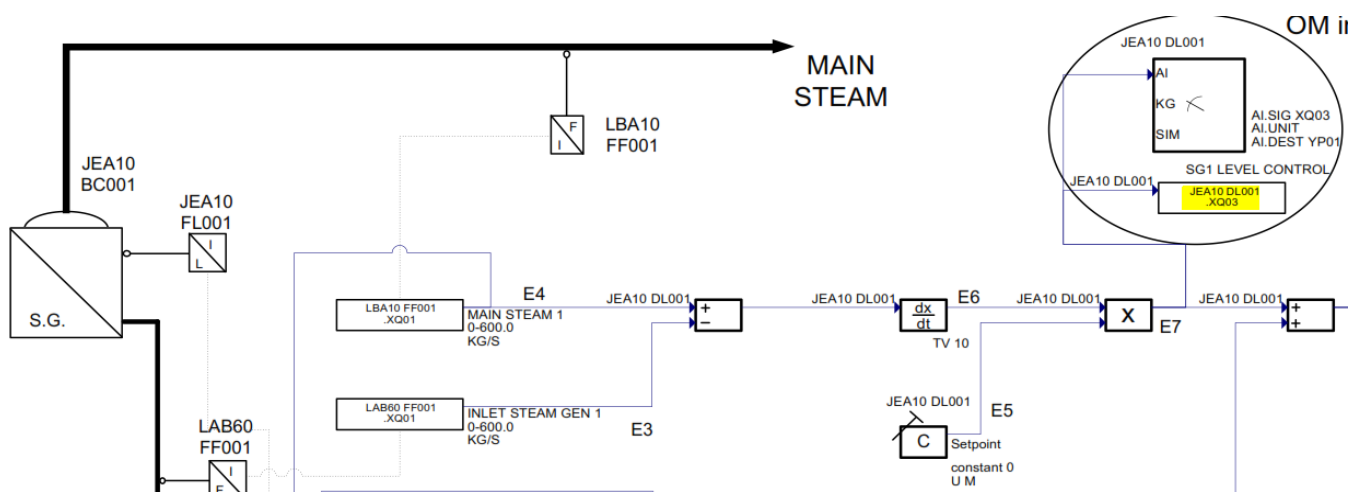


Figura 6. Ampliación de plano funcional para el procesamiento de las señales de salida de vapor y caudal de alimentación

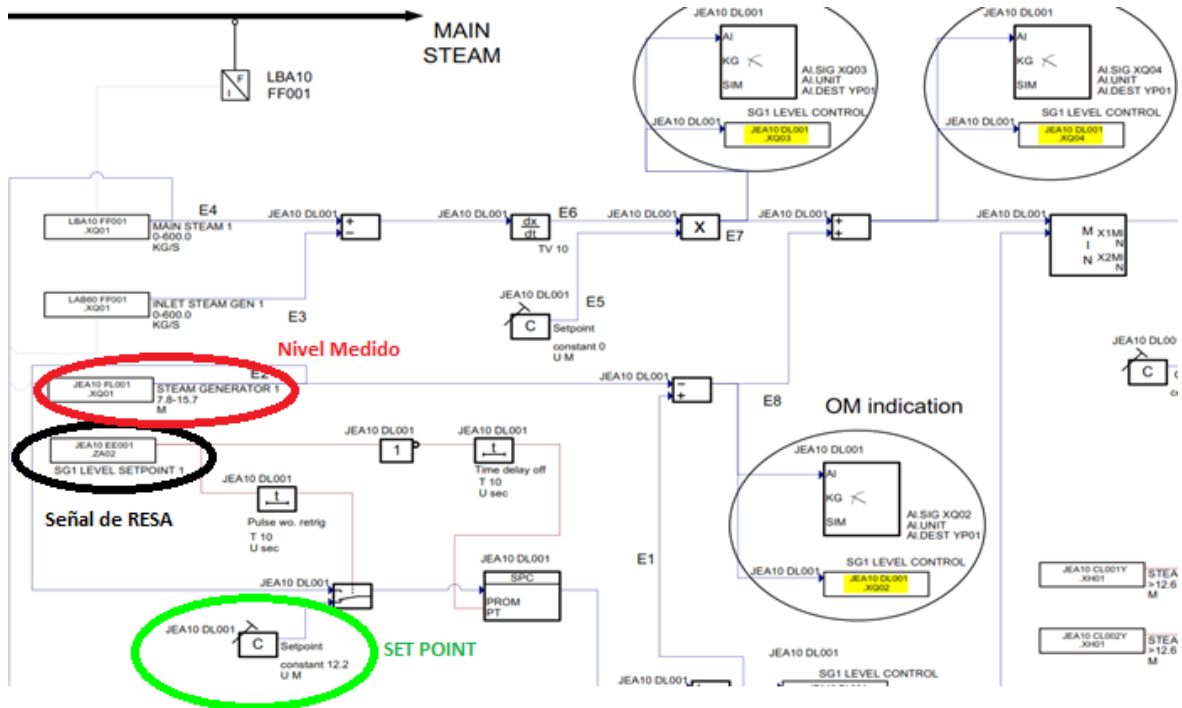


Figura 7. Suma del Error entre valor deseado y nivel medido al error anticipativo

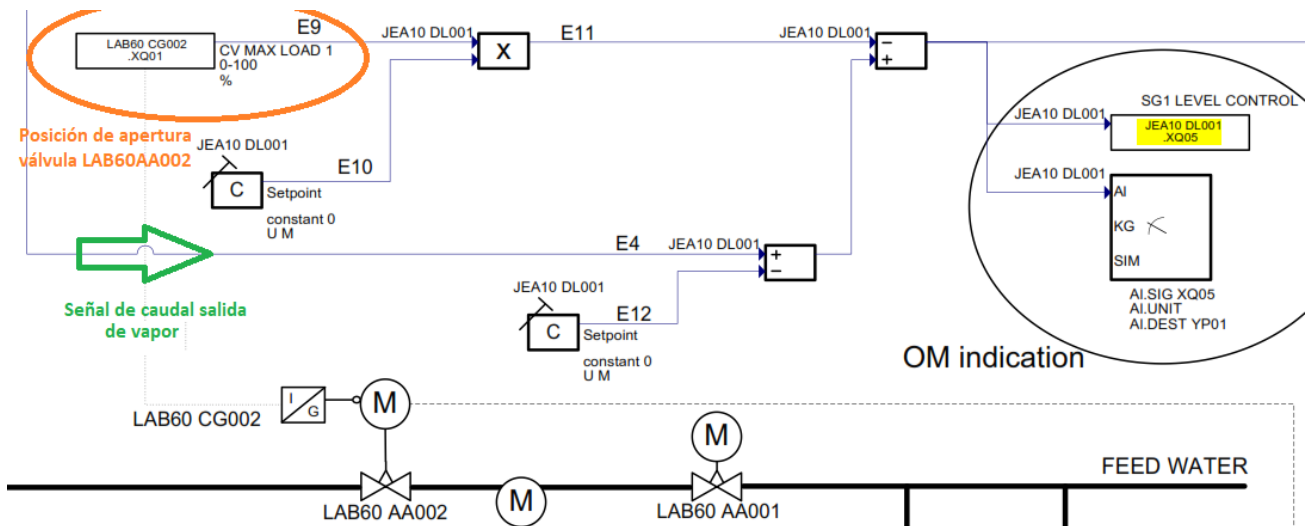


Figura 8. Ampliación del plano funcional para el procesamiento de la de posición de apertura de la válvula y la señal de salida de vapor

Capítulo III Conceptos teóricos

3.1- Descripción Técnica AMFE

El AMFE es una de las técnicas del análisis de confiabilidad que se usa en todas las etapas durante la evaluación de fallas de un sistema, ya sea desde la conceptualización hasta su implementación y uso. El AMFE busca detectar las causas inherentes de los eventos que conducen a fallas del sistema, determinar su consecuencia y planear medidas alternativas para minimizar su ocurrencia o recurrencia.

Es un método cualitativo que brinda importante información del diseño del sistema. Entre sus limitaciones se puede decir que dado que analiza una falla por vez (método inductivo) no es una herramienta útil para determinar fallas de causa común o múltiples. Para evaluar este tipo de fallas es mejor recurrir a métodos deductivos.

Una extensión del AMFE es el Análisis de Modos de Fallas, Efectos y Criticidad, **AMFEC**, que brinda un enfoque **semicualitativo** al tratamiento de fallas y permite categorizarlas no sólo por la severidad, como es el caso del AMFE, sino en función de la criticidad (en la bibliografía suele denominarse también índice de prioridad del riesgo).

En el caso de este informe, se realizará un análisis semi-cualitativo. Dado que se obtienen números de criticidad los cuales responden a una categorización numérica y pueden así jerarquizarse.

Dependiendo de la etapa de desarrollo del producto a que se aplique se pueden diferenciar distintos tipos:

- ✓ *AMFE de Diseño*: permite identificar las fallas y categorizarlas para establecer un sistema de prioridades en las mejoras al diseño, identificar acciones para minimizar las fallas, documentar los antecedentes de los cambios de diseño del producto y servir como referencia para modificaciones al diseño, nuevos diseños o diseños avanzados. La *criticidad* en este caso se obtiene del producto de la probabilidad de ocurrencia por la severidad.
- ✓ *AMFE de Procesos*: junto al Análisis de tareas se usa para identificar modos de fallas en los procesos de fabricación, ensamble, operaciones, etc y para identificar procesos críticos y las fuentes de variaciones en los procesos (materiales, operador, ambiente de trabajo, desempeño del equipo). En este caso la *criticidad* se calcula como el producto de probabilidad de ocurrencia por severidad y también se multiplica por la probabilidad de detección de la falla.

Las buenas prácticas del análisis de confiabilidad recomienda la conformación de un equipo de trabajo multidisciplinario (alrededor de 7 a 9 personas) que representen a las distintas áreas involucradas en el diseño del producto o en caso de procesos, sectores responsables de su operación y control.

Una vez discutida y acordada toda la información relacionada al modo de falla (causas, modos de falla y efectos) las conclusiones son volcadas en el formulario de AMFE del anexo 1.

En este trabajo, por tratarse de un análisis individual con fines académicos se consultó a especialista en diseño de I&C de centrales nucleares, a analista electrónico de confiabilidad, operador a responsable del sistema secundario en la guardia de operaciones en la central, a instructor del simulador y a experto en procesos de planta como una forma de corroborar los postulados y conclusiones obtenidos.

3.2- *Glosario de Términos*

Causa de la falla: son los procesos físicos o químicos, defectos del diseño, mala solitud de partes, defectos de calidad, fallas humanas u otros procesos que son la razón básica de la falla o quienes inician el proceso físico cuyo deterioro conduce a la falla. Está asociado a los mecanismos de falla. Responde a la pregunta: ¿Qué hizo que fallara?

Criticidad: medida combinada de la probabilidad de ocurrencia de una falla con la severidad de las consecuencias. En el caso de AMFEC de Procesos se debe combinar también con la probabilidad de detección.

Diversidad: la existencia de componentes o sistemas redundantes para ejecutar una función determinada, cuando tales componentes o sistemas tienen, considerados en conjunto, una o más características diferentes. Por ejemplo, diferentes principios de funcionamiento, diferentes dimensiones de los equipos, diferentes fabricantes, principios de funcionamiento diferentes o equipamientos basados en métodos físicos o principios distintos. La diversidad también consiste en utilizar distintos tipos de sensores, o de no ser posible, sensores producidos por distintos fabricantes, o de no ser posible, sensores similares producidos de diferentes partidas.

Efectos de la falla: es la consecuencia que un modo de falla tiene en la operación, función o estado de un sistema. Generalmente se clasifican de acuerdo a cómo impactan en el sistema completo. Describe el resultado de cada modo de falla, cual es el impacto sobre niveles de integración creciente (a nivel parte, componente, subsistema, etc).

Falla: inhabilidad de un componente o sistema para cumplir la función de diseño.

Posibles tipos de fallas son:

- (1) Operaciones no programadas (actuaciones espurias)
- (2) Fallas a operar cuando es demandado
- (3) Fallas a cesar la operación cuando es requerido
- (4) Falla durante la operación
- (5) Operación intermitente
- (6) Fallas dependientes
- (7) Fallas de modo común

Falla dependiente: falla que puede ocurrir en uno o más componentes, equipos o sistemas y que ocurre debido a la falla de otros componentes equipos o sistemas, o de una única causa.

Falla de modo común: interrupción del funcionamiento de componentes o sistemas debida a un único evento o causa de carácter específico. Por ejemplo una deficiencia en el diseño, un defecto de fabricación, un error de funcionamiento o de mantenimiento, un fenómeno natural, un suceso imputable al hombre, una saturación de señales, un efecto fortuito de repercusiones múltiples resultantes de cualquier otra operación o falla en la instalación o una alteración de las condiciones ambientales.

Falla única: falla aleatoria que produce la pérdida de capacidad de un componente para desempeñar la función de seguridad a él asignada.

Ítem: cualquier elemento que pueda ser considerado y descrito individualmente. Sistema, subsistema o componente bajo análisis.

Modo de falla: es la manera en que se observa la falla. Generalmente describe el modo en que ocurre la falla y su impacto en la operación del equipo. Es la consecuencia del mecanismo a través del cual la falla ocurre. Trata de determinar todas las formas en que el sistema puede fallar a cumplir los objetivos.

Redundancia: consiste en disponer un número de elementos o sistemas superior al mínimo, de modo que la falla de cualquiera de ellos no impida que el resto desempeñe la función requerida.

Severidad: medida de la peor consecuencia potencial de un modo de falla.

3.3- Metodología

Para llevar a cabo el AMFE se debe cumplir con las siguientes tareas:

1. **Identificar el ítem** que será motivo de AMFE (sistema o función). **Registrar** su denominación, quien lo realiza y la fecha de realización. Programar el modo en que se efectuará el análisis (ítems de menor a mayor nivel) y con qué grado de detalle.

2. **Describir el estado operativo y cuál es la función** del producto en cada una de los estados a ser analizadas.

3. **Análisis de la funcionalidad y confiabilidad contemplando** la operación, interrelaciones, y dependencias (sistemas eléctricos, de control, de ventilación, de lubricación, de refrigeración, etc.) de los ítems que constituyen el producto. Se deben identificar todas las interfaces.

4. **Identificar** cuáles podrían ser **los modos de fallas** que se podrían presentar para el ítem en cuestión mediante una “tormenta de ideas”.

5. Analizar para cada una de las potenciales fallas **las causas que las originan y describirlas**.

6. Analizar y **describir cuál sería el efecto** que producirían esos modos de fallas sobre el ítem en estudio y también sobre el producto (efectos "locales" y "generales").

7. Evaluar cada modo de falla en función de las peores consecuencias potenciales y **asignar una "categoría de severidad"**.

Las distintas categorías se encuentran definidas en el punto 3.4 del presente documento. La categorización de la severidad de la falla deberá hacerse sin tener en cuenta acciones compensatorias que puedan mitigar la falla. Los criterios para determinar el grado de severidad deben establecerse a priori de acuerdo al criterio optado para el estudio y debe ser consistente en el análisis de todos los ítems.

8. **Calificar la probabilidad de ocurrencia (ON)** del modo de falla con un número del 1 al 4 según los criterios predefinidos. (Ver punto 3.4- del presente documento)

9. **Calificar la detección (DN)** con un número del 1 al 4 según los criterios predefinidos. (Ver punto 3.4- del presente documento)

10. **Documentar** el análisis y **volcar en la planilla de Anexo I** los valores acordados para cada uno de los índices (números de severidad, ocurrencia y detección).

11. **Calcular el número de criticidad (CN)** y asentarlos en la planilla. Dado que se trata de un AMFE de proceso, la criticidad es el producto de la categoría de severidad por la probabilidad de ocurrencia por la probabilidad de detección:

$$CN = SN * ON * DN$$

En el AMFEC de Diseño la criticidad es el producto de la categoría de severidad por la probabilidad de ocurrencia, ya que al ser todavía una etapa de diseño, no interfiere la probabilidad de detección de los eventos una vez operativos:

$$CN = SN \times ON.$$

12. **Proponer acciones preventivas y/o medidas correctivas** con el fin de eliminar la causa que origina la falla o reducir su criticidad.

13. **Registrar cualquier observación pertinente** sobre el modo de falla analizado.

3.4- Criterio De Clasificación

3.4.1- Probabilidad de ocurrencia

La probabilidad de ocurrencia de cada evento se asigna de acuerdo a la siguiente tabla:

ON	DEFINICIÓN	LIMITES*
4	Probable	$P > 10^{-2}$ (Ocurrió más de una vez)
3	Ocasional	$10^{-4} < P < 10^{-2}$ (Ocurrió una vez)
2	Remota	$10^{-5} < P < 10^{-4}$ (Podría ocurrir)
1	Extremadamente remota	$P < 10^{-5}$ (No se cree que vaya a ocurrir)

Tabla 1. Criterios adoptados para la clasificación del coeficiente de probabilidad de ocurrencia

*Al no contar con estudios puntuales que indiquen el valor real de cada probabilidad, se realizará de acuerdo al criterio cualitativo.

3.4.2- Coeficiente De Severidad

Se adjunta a continuación la tabla con los criterios para la clasificación de severidad en los efectos de las fallas asociadas a la regulación de nivel. Para este estudio no se utiliza una clasificación de bibliografía, sino que se define una propia. Por no tratarse de un sistema de seguridad de la central, el análisis apunta a garantizar la disponibilidad.

SN	DEFINICIÓN
Catastrófico 4	Corte del reactor / By-pass de turbina
Crítico 3	Pérdida de subsistema redundante
Mayor 2	Degradación de la capacidad del sistema
Insignificante 1	Cualquier otro efecto cuyas consecuencias se evalúen como de menor importancia a los anteriores y pueda retrasar la ejecución del proyecto

Tabla 2. Criterios adoptados para la clasificación del coeficiente de severidad

Para la función relacionada a la evaluación de potencia térmica se considera que esta categorización no sería aplicable. En su lugar, podría pensarse en una clasificación como la mostrada en la tabla 3.

SN	DEFINICIÓN
Catastrófico 4	Mayor a 10 MWt
Crítico 3	5 MWt < Desviación < 10 MWt
Mayor 2	1 MWt < Desviación < 5MWt
Insignificante 1	Desviación < 1 MWt

Tabla 3. Criterio particular para la clasificación del coeficiente de severidad en caso del cálculo de potencia térmica

Al no contar con la información necesaria durante la realización de este trabajo, esta es una línea de estudio a futuro y solo se desarrolla un modo de falla a modo de ejemplo al final de la planilla de AMFEC.

3.4.3- Probabilidad de Detección

Al igual que el coeficiente de probabilidad de ocurrencia, la probabilidad de detección se categoriza siguiendo criterios cualitativos.

En la tabla a continuación se muestra las probabilidades a implementar:

DN	DEFINICIÓN
1	Muy probable
2	Probable
3	Improbable
4	Extremadamente improbable

Tabla 4. Criterios adoptados para la clasificación del coeficiente de probabilidad de detección

3.5- Identificación De Ítems Críticos

Para los *AMFEC de Diseño* se considera que un ítem es "crítico" si se determina que su modo de falla cumple alguno de los siguientes criterios:

- ✓ Con categorías de severidad distinta a 1 o 2 ($SN \geq 3$)
- ✓ Con números de criticidad igual o mayor a 8 ($CN \geq 8$, calculado como $SN \times ON$).

En cambio, en un *AMFEC de Procesos*, como es el caso en estudio, se considera "Crítico" cuando se cumple:

- ✓ El número de severidad es mayor o igual a 3 ($SN \geq 3$)
- ✓ El número de probabilidad es igual a 4.
- ✓ El número de detección es igual a 4 ($DN=4$).
- ✓ El número de criticidad es mayor o igual a 12 ($CN \geq 12$, calculado como $SN \times ON \times DN$).

3.6- *Grado De Detalle*

En principio está previsto efectuar un AMFEC que abarque las posibles fallas de los distintos componentes que integran la señal de caudal LAB 60 FF001. El análisis abarcará los distintos estados operativos de la central, descriptos anteriormente en el Capítulo 2: Operación de arranque parada, Operación normal y corriente de emergencia.

Capítulo IV AMFE

Se adjunta en el Anexo 2, la planilla con los resultados del estudio.

Capítulo V Resultados

5.1- Jerarquización de resultados

En el punto 3.4 del documento fueron establecidos los criterios a utilizar para la identificación de ítems crítico y jerarquización de los mismos.

Los criterios de criticidad usados son:

- ✓ Que el ítem en cuestión tenga severidad 3 o 4 ($SN \geq 3$)
- ✓ Que su probabilidad de ocurrir sea igual a 4 ($ON=4$)
- ✓ Que su probabilidad de detección sea extremadamente improbable ($DN04$)
- ✓ Que el ítem tenga criticidad igual o mayor a 8 ($CN \geq 8$)

A partir de la planilla AMFEC obtenida, se ordenaron los eventos de acuerdo a la clasificación resultantes. La jerarquización de los mismos se muestra en la tabla 5 a continuación.

Entre los casos postulados, se identifican 6 componentes que cumplen por lo menos con alguna de las condiciones dadas anteriormente. En rojo se indica el criterio que alcanza los límites mencionados.

Nº	Ítem	Causa potencial	SN	CN	Planilla AMFEC
1	Falla en cajas de juntura en campo UJA51GF508	Falla ambiental, falla durante el mantenimiento que inhabilita todas las señales de la caja.	4	32	Anexo 2 – AMFEC Ítem 14
2	Falla Alimentación en el armario CUA01	Inundación o incendio en la zona del armario. O pérdida de la barra ininterrumpible BRA	4	32	Anexo 2 – AMFEC Ítem 15
3	Válvula reguladora (LAB60 AA002) falla a regular	Pérdida de suministro eléctrico en barra BRA, falla en convertidor BRT50	4	4	Anexo 2 – AMFEC Ítem 16
4	Transmisores de caudal generan señal errónea	Mala práctica de mantenimiento	4	4	Anexo 2 – AMFEC Ítem 4
5	Daño en Cables de transmisión de señal	Sabotaje, Incendio, redundancias están cableadas por el mismo tren.	4	4	Anexo 2 – AMFEC Ítem 13
6	Falla placa orificio (sensor)	Obstrucción Total	4	8	Anexo 2 – AMFEC Ítem 1
7	Falla placa orificio (sensor)	Degradación (ensuciamiento,	2	8	Anexo 2 – AMFEC Ítem 2

		corrosión)			
8	Transmisor de caudal genera señal errónea	Descalibración durante operación	2	8	Anexo 2 – AMFEC Ítem 3
9	Transmisor de caudal genera señal errónea	Ruido de medición debido al proceso (Vibraciones, Radiación térmica inadecuada, etc)	2	6	Anexo 2 – AMFEC Ítem 5
10	Corrimiento de la medida en transmisor de caudal (“Drift”)	Daño en sello de carcasa (Impureza dentro de cámara)	2	4	Anexo 2 – AMFEC Ítem 6
11	Pérdida de linealidad en el transmisor	Transitorio de proceso genera pico de presión que deforma diafragma de la cámara de medición.	2	4	Anexo 2 – AMFEC Ítem 7
12	Falla electrónica de transmisor	Fallas aleatorias propias de componentes electrónicos.	2	4	Anexo 2 – AMFEC Ítem 8
13	Falla medición de temperatura para compensar el caudal	Rotura de vaina metálica que afecte aislación interna	2	4	Anexo 2 – AMFEC Ítem 9
14	Falla conexión de Bornera en transmisor PT100 temperatura	Mala conexión del cable debido a excesivos ciclos térmicos. Sensor muy cerca del proceso.	2	2	Anexo 2 – AMFEC Ítem 11
15	Cambio en el tiempo de respuesta de medición de temperatura	Se afecta aislación interna del sensor de temperatura	1	1	Anexo 2 – AMFEC Ítem 10
16	Histéresis en material (medición de temperatura)	El rango del sensor es 0°C-450°C. La Top ronda los 170°C No se espera que ocurra	No tiene impacto al no ser factible	-	Anexo 2 – AMFEC Ítem 12
17	Transmisor de caudal genera señal errónea que va a la señal CRW05FJ01 de cálculo de potencia térmica	Descalibración durante operación	X	X	Anexo 2 – AMFEC Ítem 17

Tabla 5. Jerarquización de eventos analizados en el estudio AMFEC

5.2- Hallazgos

5.2.1-Balance de masa del sistema y puntos de fuga

En el sistema LAB existen dos puntos de medición para control de caudal de agua de alimentación. Adicionalmente a los caudalímetros en estudio (LAB 60/70 CF001), en la planta existen caudalímetros situados en las líneas de impulsión de cada bomba LAC (LAB10/20/30 CF001).

Dado que en operación normal en el sistema no hay presentes salidas ni entradas de caudal por fuera de estos puntos de medición, se puede establecer una redundancia funcional entre ambos puntos de control.

De esta forma si no hay fugas dentro del sistema, el caudal registrado por los caudalímetros en dos de las tres líneas de impulsión en funcionamiento, a grandes rasgos, debería ser igual a la suma de caudal registrado en la entrada de alimentación a ambos G.V.

En la Figura 5, se presenta el plano de proceso con identificación de los caudales máxicos en distintos tramos de cañerías identificados en el plano de acuerdo a la descripción de abajo. En operación normal, varias de esas corrientes son nulas o se pueden despreciar, simplificando el análisis de acuerdo a lo siguiente:

- 2/3 bombas LAC en funcionamiento. ($M1$ y $M2 \neq 0$, $M3=0$)

-Línea de toma de muestra QUA Cerrada ($M4=0$)

La toma de muestras no se encuentra abierta en operación normal. Adicionalmente, el diámetro de la cañería (DN15) resulta despreciable frente al del colector común (DN 600).

- Línea de conexión con sistema LAH Cerrada ($M5=0$)

Esta línea se encuentra abierta durante el arranque o parada de la planta para conectar el sistema LAH con el LAB.

- Sistema de drenaje para edificio de turbina (GMM) Cerrado ($M6$ y $M7=0$)

El drenaje no se encuentra abierta en operación normal. El caudal que podría perderse por esta cañería sería un 6% de la alimentación al tener un DN25, en comparación con el DN 400 de la cañería principal de alimentación.

- Tapones de líneas instrumentación Cerrados

(Correspondientes a la Rama 60: $M8$, $M9$, $M10$, $M11$, $M12$, $M13$, $M14 =0$)

(Correspondientes a la Rama 70: $M16$, $M17$, $M18$, $M19$, $M20$, $M21$, $M22 =0$)

Lascañerías para conexiónado de instrumentación poseen un DN25 en su mayoría y en funcionamiento normal no debería perderse caudal a través de las mismas.

- Válvulas reguladoras de plena carga Abiertas (M15 y M23 \neq 0)

- Sistema de drenajes UJA (KTF) Cerrado (M24=0)

La línea de balance no se encuentra en operación.

- Sistema de control de presión dentro de la línea de balance Cerrados (M25, M26=0)

La línea de balance no se encuentra en operación.

Realizando luego un balance de masa del sistema, de respetarse las condiciones establecidas, obtendríamos que:

$$M1 + M2 = M15 + M23$$

Si introducimos en el balance la tercera rama de impulsión, se obtiene una expresión que abarca cualquier combinación de bombas:

$$M1 + M2+M3 = M15 + M23$$

Esto permite, mediante un sencillo calculo contrastar los valores medidos para detectar si el sistema se encuentra funcionando correctamente o si hay presencia de fugas en alguno de los puntos del sistema, que al no perjudicar ninguna variable de seguridad, no fueron detectadas.

A continuación se ilustra un diagrama simplificado del sistema, indicando la ubicación de los puntos de medición establecidos y la referencia de las posibles zonas de fugas del caudal.

5.2.3-Dependencias eléctricas

A partir del estudio del sistema, se observó que las tres redundancias de la medición de caudal utilizadas en el lazo de control de nivel (LAB 60 CF001 A/B/C), como también, los tres instrumentos del control de nivel (JEA10 CL001 A/B/C) y las mediciones de caudal en la línea de vapor principal (LBA10 CL001 A/B/C), se alimentan del mismo tren de alimentación eléctrica.

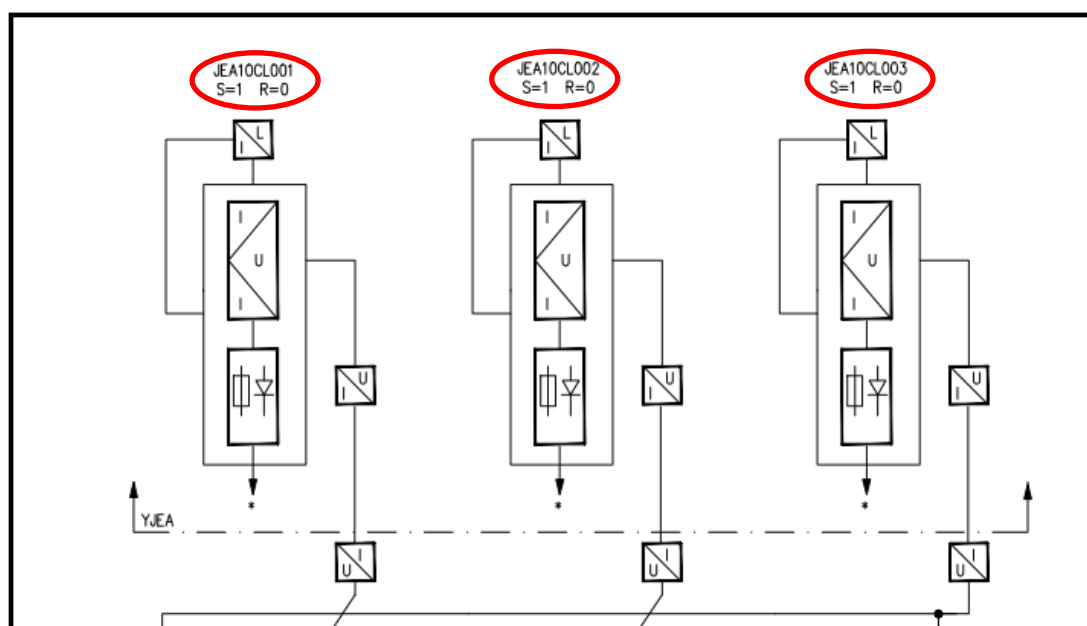


Figura 10. Trenes de alimentación de los controladores de nivel

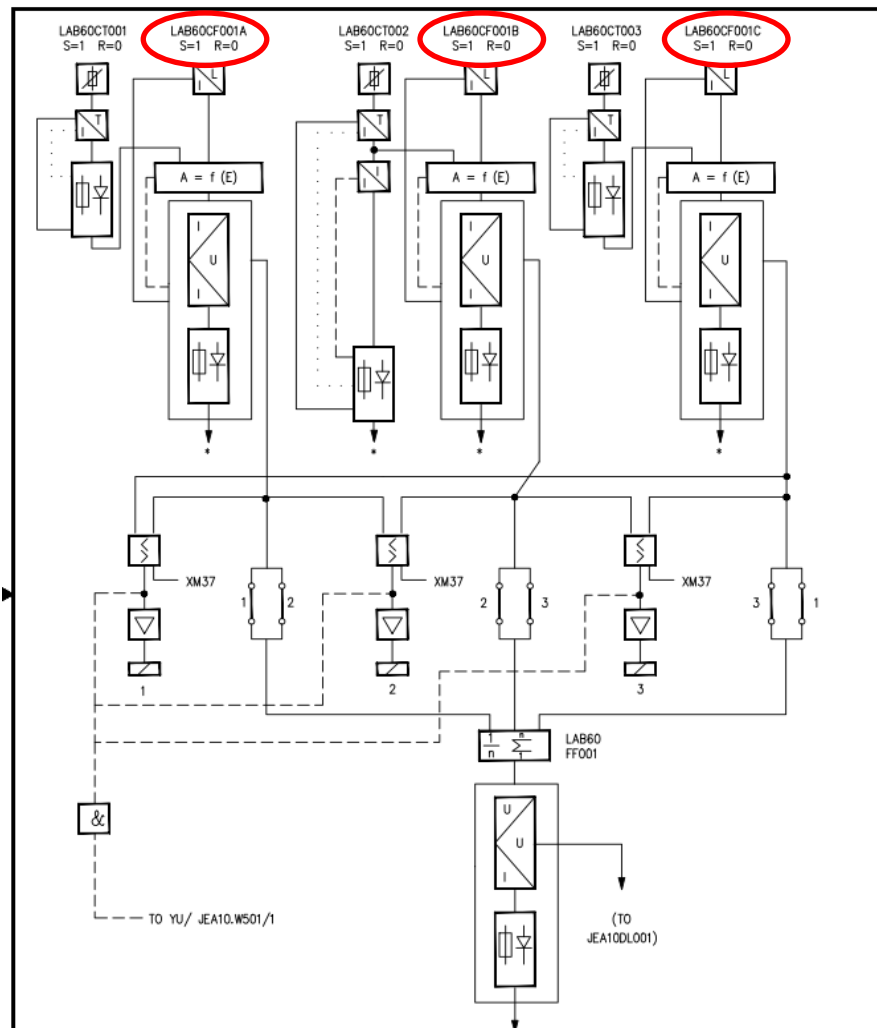


Figura 11. Trenes de alimentación de los transmisores de caudal de alimentación

Se observó en los planos de las Ref. /27/, /28/ y /29/, que los tres transmisores de caudal de la señal en estudio comparten las cajas de juntas UJA51 GF508A, JML51GF508, DGA52XA, finalizando su conexionado en el mismo armario CUA01.

Esto es opuesto a los principios básicos de confiabilidad que demandan redundancias y separación física para proteger de fallas dependientes causadas por factores ambientales.

Si bien el armario CUA01, de dónde se alimentan todos los instrumentos que participan de la regulación, está alimentado por una barra asegurada ininterrumpible (BRA), de ocurrir cualquier evento en el armario se perdería todo el lazo de control.

Cuando se investigó en profundidad se encontró que la válvula reguladora (Elemento final de Control no redundado), el cual representa un punto singular de falla para este generador, estaría alimentado desde el mismo armario. (Ref. /31/ y /32/)

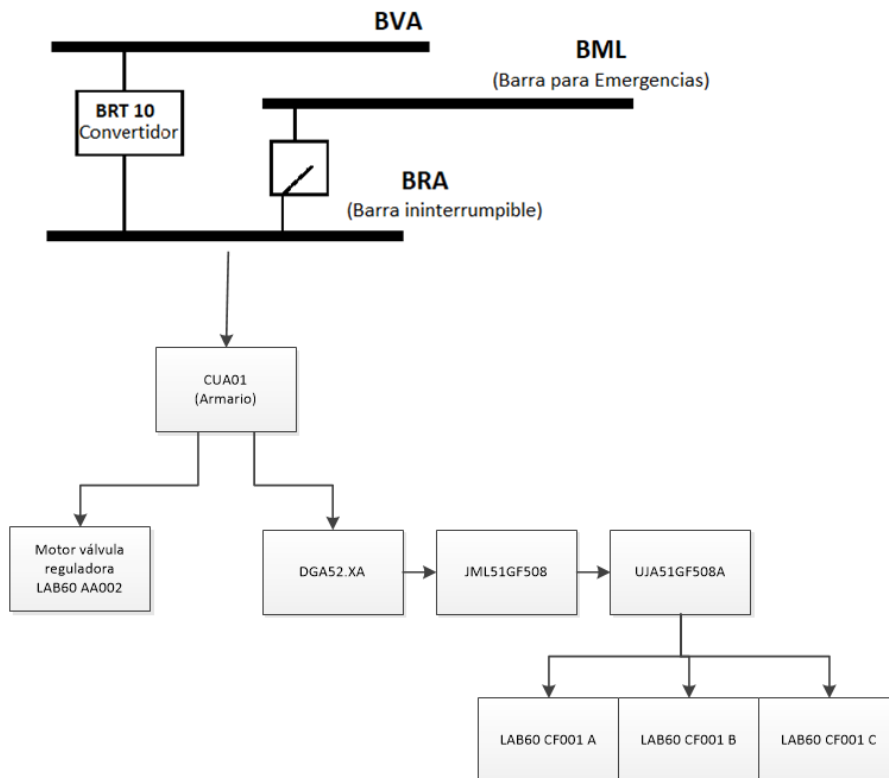


Figura 12. Diagrama unifilar simplificado para la instrumentación en estudio

En resumen, si bien toda la instrumentación del lazo de control cuenta con tres redundancias funcionales, no está contemplado como falla de causa común, un problema en campo sobre las cajas de junta UJA51GF508A, JML51GF508A o DGA52XA, gabinetes donde se conectan las tres señales. Cualquier falla o interrupción en la alimentación del mismo, generaría la indisposición de la regulación de nivel en el generador de vapor (JEA10BC001), cuyo efecto sería una salida de operación por bajo nivel en el GV. La planta de todas maneras lograría estabilizarse en forma automática en Parada Caliente a través de la alimentación por el sistema LAH, esto únicamente tendría impacto sobre la disponibilidad.

A su vez, se puede concluir que el armario CUA01 es un ítem crítico de la regulación dado que cualquier inconveniente que se presente en el mismo imposibilitaría la regulación de nivel automática y manual ya que inhabilita la válvula reguladora. Esto muy probablemente finalice en la salida de servicio de la planta.

Capítulo VI Conclusiones

A partir del AMFEC realizado, se evaluaron 16 modos de falla del sistema y se jerarquizaron de acuerdo a su criticidad.

Se clasificaron como “Ítems críticos” un total de 6 eventos para los cuales se analizaron acciones preventivas, mitigativas o correctivas.

Dentro de los hallazgos principales, se propone implementar como verificación funcional del sistema LAB un balance de masa global. Se observa en el mismo la existencia de dos puntos de medición para control de caudal de agua de alimentación. Adicionalmente a los caudalímetros en estudio (LAB 60/70 CF001 A/B/C), en la planta existen mediciones de caudal en las líneas de impulsión de cada bomba LAC (LAB10/20/30 CF001 A/B).

Esta verificación consistiría en contrastar los caudalímetros estudiados, a la entrada de los generadores de vapor, con los que están instalados en la impulsión de las bombas LAC. Esto requeriría de estimación del error en cada una de las mediciones, evaluación de fugas, y finalmente implementación del balance en los sistemas de monitoreo informático de la central. Un algoritmo similar es empleado para la evaluación de la potencia térmica del lado secundario, que se utiliza para chequear la medición de potencia eléctrica generada por la central. Dicho cálculo es realizado por fuera del sistema OM y sólo es visible en el la señal resultante.

El otro punto a remarcar, es la detección de un modo de falla común en las 3 redundancias de las señales de caudal. Todas se encuentran conectadas en las mismas cajas de juntas, alimentándose finalmente desde un mismo armario (CUA01). Esto es opuesto a los principios básicos de confiabilidad que demandan redundancias y separación física para proteger de fallas dependientes causadas por factores ambientales.

Se encontró que la válvula reguladora (Elemento final de control no redundado), estaría alimentada desde el mismo armario. Esta es un punto singular de falla para este generador. Si bien este componente está alimentado por la Barra de tensión BRA que es una barra asegurada ininterrumpible de alta confiabilidad, se considera un ítem crítico para este análisis por la severidad de sus consecuencias.

A raíz de esto, se propone evaluar en mayor detalle si separar las señales redundantes en distintos trenes, en distintas cajas de juntas, contribuiría a eliminar modos de fallas comunes al evitar la vulnerabilidad de estas a factores de estrés ambiental, y a su vez, reducir el número de combinaciones de fallas que inhabilitan la regulación de nivel. De todas maneras, esta medida no eliminaría la pérdida de la regulación de ocurrir un evento en el armario CUA01, ya que la válvula reguladora que también se alimenta de él, siempre representaría un punto singular de falla ya que redundar puede no ser una mejora por las complejidades que introduciría en la operación del sistema y los nuevos modos de falla que surgirían de esta modificación.

Durante el estudio del sistema de agua de alimentación y las señales que participan en las lógicas de control del sistema secundario, se detectó que la medición de flujo de vapor vivo a la salida del G.V. (LBA10/20 FF001 A/B/C) tiene mayor impacto en la disponibilidad de la central, en comparación con el caudal en la alimentación de agua a los GV. Se utiliza para calcular el error de regulación en dos de las tres contrastaciones que determinan la corrección de posición de apertura de las válvulas a plena carga (JEA10DL001), y también en la regulación para baja carga (JEA10DL002).

Esta señal, además de su función anterior, está encargada, de acuerdo al documento de Ref. /8/, de intervenir en la conmutación automática de las válvulas de control de la estación (UJE), de plena a baja carga. Es decir que se podría realizar un análisis AMFEC para determinar la criticidad de sus potenciales fallas.

Por otro lado, el modelado de la conmutación de bombas LAC, también se identifica como otro posible punto de análisis para garantizar el suministro de agua de alimentación al GV. Analizar los tiempos de cierre de las válvulas, los retardos en las señales, etc.

Cabe remarcar que, contrario con las buenas prácticas de los análisis de confiabilidad, se trata de un trabajo final con fines académicos, dónde la recolección de información, el estudio del sistema y el análisis fueron llevados a cabo por una única persona. Para una evaluación más exhaustiva del sistema se debería conformar un equipo interdisciplinario de especialistas electrónicos, operadores, personal de mantenimiento, responsables de sistemas, a fin de realizar un torbellino de ideas y obtener una identificación más completa de todos los posibles modos de falla, y la respuesta del sistema frente a ellos.

El análisis AMFE llevado a cabo no es exhaustivo pero sirve para mostrar como el mismo permite jerarquizar distintas fallas del sistema y de esa manera priorizar los recursos para realizar evaluaciones más detalladas en los casos que se requirieran.

Referencias bibliográficas

1. CNAII - TS31-44-015 (OS4120), Manual de operaciones sistema LAB, 23/05/83.
2. INPO AP-913 Rev. 3, Equipment Reliability Process Description, Marzo 2011.
3. IT-13OS01-02 Análisis De Modos De Fallas Y Sus Efectos, Proyecto SAOCOM,
4. Informe de trabajo “Medición de la Potencia Generada por la Central Nuclear Atucha I, autores: Urrutia G., Sabransky M.
5. Norma DIN 1952:1982-07 “Measurement of fluid flow by means of orifice plates, nozzles and venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full (VDI-rules for measurement of fluid)”
6. Transmitters F TELEPERM, SIEMENS, Ord. No C73000-B5676-c101-7
7. KKS CNA II – Revisión 1.11122013, Ing. Villegas, Eduardo – Departamento operaciones.
8. JEA10DL000 - YLAB00 SG1 Level Control “Close Loop Control Description”

Planos de la central Atucha II:

Plano de sistemas

9. LAB-LAH “002-TS3-1V-73001-g”

Planos Tipo YF:

10. JEA10DL001, “SG1 LEVEL CONTROL”
11. JEA10DL002, “SG1 LEVEL CONTROL”
12. JEA10DL003, “SG1 LEVEL CONTROL”
13. LAB60CT, “MEASURING DIAGRAM”
14. LAB60CF, “MEASURING DIAGRAM”
15. LAB60FF001, “INLET STEAM GEN 1”
16. LBA10FF001, “MAIN STEAM 1”
17. JEA10FL001, ”STEAM GENERATOR 1”
18. JEA10EE01, “SG1 LEVEL SET POINT1”
19. JEA10EE02, “SG1 LEVEL SET POINT2”
20. JEA10DL004, “SG1 EMERG. LEV. CONTROL”
21. JEA10DL005, “SG1 EMERG. LEV. CONTROL”
22. JEA10FL004, “SG1 CORRECTED LEVEL”
23. LAB60AA001, “CUTOFF FULL LOAD 1”

Planos Tipo YU

24. JEA10FL001, "STEAM GENERATOR 1"

25. LAB60FF001, "STEAM GENERATOR 1"

26. JEA10FL004, "STEAM GENERATOR 1"

TIPO YS:

27. LAB60 CF001A "INLET STEAM GEN.1"

28. LAB60 CF001B "INLET STEAM GEN.1"

29. LAB60 CF001C "INLET STEAM GEN.1"


30. R183E-00-59661 (hoja 9/10), "Reactor Protection System Limit Signal Processing"

31. Plano (0)E88120-A6135-S550-N "Diagrama Unifilar"

32. Descripción del Sistema Eléctrico de CNA 2

Anexos

Anexo 1 - Modelo de planilla AMFE

		AMFE DE PROCESO ESPECIALIZACIÓN EN REACTORES NUCLEARES Y SU CICLO DE COMBUSTIBLE		CNEA Revisión: 00 Página : 1 de			
SISTEMA () SUBSISTEMA () COMPONENTE ()		DENOMINACIÓN:					
AUTOR:		COORDINADO POR:		FECHA:			
Nº	Función	Modo de falla	Causa potencial	Efecto potencial	Método de detección	Acciones preventivas/Correctivas	Observaciones
En operación Normal							
1							
2							
3							
4							

Anexo 2 - Resultados AMFEC

SISTEMA () SUBSISTEMA (X) COMPONENTE ()						DENOMINACIÓN: Medición de caudal LAB60 FF 001					
AUTOR: WALKER, Julieta						COORDINADO POR: LORENZO, Andrea			FECHA: 26/10/2017		
Nº	Función	Modo de falla	Causa potencial	NO	Efecto potencial	NS	Método de detección	DN	CN	Acciones preventivas/ Correctivas	Observaciones
En operación normal											
1	Participa de la regulación del nivel del G.V. (Estima acumulación a partir de diferencia entre caudal de entrada y el de salida, contra el nivel medido en el G.V.)	Falla placa orificio (sensor)	Obstrucción Total	1	Se generaría una excitación escalón en el error del controlador. Ordenaría apertura de válvula reguladora LAB 60 AA002 pero el caudal no podría pasar. Corte del reactor por bajo nivel en el G.V.(10 m) Es un transitorio mitigado en el diseño de planta. Se perdería la función de seguridad del sistema de regular el nivel.	4	Hay muchos indicadores pero ninguno permite diagnosticar con exactitud la falla. -Caudalímetro de agua - Alarma por bajo nivel en el GV - Sube presión en el lado secundario del IC moderador. - Sube presión en la descarga de las bombas LAC. (Indicación sala de control)	2	8	AC - Parada de planta, evaluación de integridad de la cañería/ placa, reemplazo o reacondicionamiento. - Evaluación del origen del objeto extraño. AP - Plan de Mantenimiento de sistemas	Está ubicada en zona de alta dosis. Se simuló la perturbación en el simulador interactivo de la central.

Nº	Función	Modo de falla	Causa	NO	Efecto potencial	NS	Método de detección	ND	NC	AP / AC	Observaciones
2	Participa de la regulación del nivel del G.V.	Falla placa orificio (sensor)	Degradación (ensuciamiento, corrosión)	2	La regulación de nivel compensa el cambio de sección en la placa, ya que contrasta con el nivel medido. La lógica asociada a la medición de caudales se usa para perturbaciones rápidas (escalón, salto)	2	- Inspección visual por sonda. -Comparación con estimación caudal a partir de balance de masa del sistema.	2	8	Se propone realizar verificaciones periódicas anticipatorias del sistema contrastando las medidas del balance de masa.	
3	Participa de la regulación del nivel del G.V.	Transmisor de caudal genera señal errónea	Descalibración durante operación	2	Señal errónea de alto/bajo caudal. Si falla uno, la lógica 2/3 tolera la falla y continúa regulando si no se presenta otra falla.	2	Tiene indicación en sistema de monitoreo OM. Señal: XM38 Nombre: "A2OF3 MEASUREMENT"	2	8	Se utilizan 3 redundancias a fin de mitigar este tipo de falla.	Si falla la señal de validación tiene alarma sonora

Nº	Función	Modo de falla	Causa	NO	Efecto potencial	NS	Método de detección	ND	NC	AP / AC	Observaciones
4	Participa de la regulación del nivel del G.V.	Transmisores de caudal generan señal errónea	Mala práctica de mantenimiento	1	<p>Señal errónea de alto/bajo caudal en 2/3 transmisores.</p> <p>Si falla más de uno, la lógica 2/3 no detecta el error del transmisor.</p> <p>Una perturbación escalón genera un transitorio que puede llevar a alto nivel, 12.6m, (y luego el corte por el cierre de la válvula de aislación) o de bajo nivel (llevando al corte cuando alcanza los 10 m)</p> <p>Perder la regulación de nivel representa la pérdida de una de las funciones de seguridad del sistema.</p>	4	<p>Indicación de caudal en pantalla de sala de control.</p> <p>Puede ser observada por el operador.</p>	1	4	<p>AP</p> <p>Calibrar por personal e instrumentos distintos y chequeados en diferentes momentos. Espaciar mantenimiento preventivo de redundancias, en ausencia de indicios, realizarlos solo sobre una de ellas para disminuir posibilidad de falla común.</p> <p>AC</p> <p>Detectada la desviación puede sacar de automático y regular manualmente el nivel y solicitar inmediatamente la revisión del transmisor para evitar corte.</p>	Es un transitorio muy rápido. En pocos minutos corta el reactor.

Nº	Función	Modo de falla	Causa	NO	Efecto potencial	NS	Método de detección	DN	NC	AP / AC	Observaciones
5	Participa de la regulación del nivel del G.V.	Transmisor de caudal genera señal errónea	Ruido de medición debido al proceso (Vibraciones, Radiación térmica inadecuada, etc)	1	Señal espuria de alto/bajo caudal. Se vería un pico o un incremento del Spam de medición. Al estar en el mismo ambiente podría afectar a los 3, por lo que la lógica 2/3 no detectaría. El sistema responderá de acuerdo a la magnitud de la perturbación.	2	- Comportamiento anómalo de la señal en el Visual data. -Indicación en el OM si es un salto importante Señal: XQ03 JEA10DL001	3	6	AP Monitoreo en línea del comportamiento de las señales que genere alarmas por comportamiento anómalo. AC Analizar la fuente del ruido dentro del proceso y corregirla de ser posible o incorporar la desviación en la incertidumbre de medición.	
6	Participa de la regulación del nivel del G.V.	Corrimiento de la medida en transmisor ("Drift")	Daño en sello de carcasa (Impureza dentro de cámara)	1	Señal errónea de alto/bajo caudal. Si falla uno, la lógica 2/3 tolera la falla y continúa regulando si no se presenta otra falla.	2	Alarma en sistema de monitoreo OM. Señal: XM38 Nombre: "A2OF3 MEASUREMENT"	2	4	AP Realizar mantenimientos de acuerdo a hoja de datos, y verificar que se mantengan las condiciones ambientales aceptables.	Se utilizan transmisores de calidad nuclear (Teleperm) Por lo que tienen baja tasa de fallas.

Nº	Función	Modo de falla	Causa	Nº	Efecto potencial	Nº	Método de detección	Nº	Nº	AP / AC	Observaciones
7	Participa de la regulación del nivel del G.V.	Pérdida de linealidad en el transmisor	Transitorio de proceso genera pico de presión que deforma diafragma de la cámara de medición.	1	Se pierde una señal redundante, la lógica 2/3 tolera la falla y continúa regulando si no se presenta otra falla.	2	Indicación en sistema de monitoreo OM. Señal: XM38 Nombre: "A2OF3 MEASUREMENT" Desviación de la medida de esa señal en comparación a sus redundancias.	2	4	AP El diseño del transmisor cuenta con una protección por sobrepresión. Se utilizan transmisores de calidad nuclear (Teleperm) AC Se debe reemplazar el transmisor dañado.	
8	Participa de la regulación del nivel del G.V.	Falla electrónica de transmisor	Fallas aleatorias propias de componentes electrónicos.	1	Pérdida de linealidad en la señal, corrimiento de la medida, cambio de la ganancia. Se pierde una señal redundante, la lógica 2/3 tolera la falla y continúa regulando si no se presenta otra falla.	2	Indicación en sistema de monitoreo OM. Señal: XM38 Nombre: "A2OF3 MEASUREMENT" Desviación de la medida de esa señal en comparación a sus redundancias.	2	4	AP El uso de componentes calidad nuclear hace que sea extremadamente improbable que ocurra este tipo de fallas AC Se debe reemplazar el transmisor afectado.	

Nº	Función	Modo de falla	Causa	NO	Efecto potencial	NS	Método de detección	DN	NC	AP / AC	Observaciones
9	Participa de la regulación del nivel del G.V.	Falla medición de temperatura para compensar el caudal	Rotura de vaina metálica que afecte aislación interna	1	Se pierde una señal redundante, la lógica 2/3 tolera la falla y continúa regulando si no se presenta otra falla. Si fallan las 3 el sistema adopta un valor de temperatura de referencia.	2	Indicación en sistema de monitoreo OM. Señal: XM38 LAB60 CT (Desviación de la medida de esa señal en comparación a sus redundancias)	2	4	AP Buenas prácticas de instalación y mantenimiento de los transmisores	En la regulación no es muy importante. Su utilización es a fines de mejorar la medición de potencia térmica. El módulo electrónico de compensación se usa para mediciones de líquidos y gases. En este caso no es importante la corrección de presión por ser líquido.
10	Participa de la regulación del nivel del G.V.	Cambio en el tiempo de respuesta de medición de temperatura	Se afecta aislación interna del sensor de temperatura	1	La presencia de 3 redundancias en lógica 2/3 debería compensar la falla en uno de los sensores.	1	Alarma en sistema OM Señal XM26 A2OF3 MEASUREMENT YF LAB60 CT	1	1	AP Monitoreo en línea del comportamiento de las señales que genere alarmas por comportamiento anómalo. AC Reemplazar el sensor	Dado que no se trata de instrumentación de seguridad el tiempo de respuesta no tiene grandes impactos.

Nº	Función	Modo de falla	Causa	Z O	Efecto potencial	Z S	Método de detección	Z D	Z C	AP / AC	Observaciones
11	Participa de la regulación del nivel del G.V.	Falla conexionado de Bornera en transmisor PT100 temperatura	Mala conexión del cable debido a excesivos ciclos térmicos. Sensor muy cerca del proceso.	1	Corrimiento en la medida y aumento tiempo de respuesta. La lógica 2/3 compensa la falla para seguir corrigiendo por temperatura	2	Alarma en sistema de monitoreo OM. Señal: XM26 LAB60 CT Falla una validación en la lógica 2/3.	1			
12	Participa de la regulación del nivel del G.V.	Histéresis en material (medición de temperatura)	El rango del sensor es 0°C-450°C. La Top ronda los 170°C No se espera que ocurra	1							Despreciable porque el sistema debería estar funcionando en los límites del instrumento.
13	Participa de la regulación del nivel del G.V.	Daño en Cable de transmisión de señal	Sabotaje, Incendio, Las redundancias están alimentadas de un mismo tren.	1	Pérdida de la regulación de nivel (función de seguridad del sistema), y seguramente corte del reactor	4	Indicación de nivel del Sistema de Protección del Reactor y alarmas del OM	1	4	AP Separar físicamente las redundancias AC El operador puede regular manualmente y solicitar inspección en campo de los daños y decidir el corte del reactor.	

Nº	Función	Modo de falla	Causa	NO	Efecto potencial	NS	Método de detección	DN	CN	AP / AC	Observaciones
14	Participa de la regulación del nivel del G.V.	Falla Alimentación en caja de alimentación en campo UJA51GF508	Falla ambiental, falla durante el mantenimiento o que inhabilita todas las señales de la caja.	2	Pérdida de la regulación (función de seguridad del sistema). Regulación pasa a modo manual. Operador dispone de los indicadores de nivel del sistema de protección. Transitorio muy rápido, Aislación de alimentación por alto nivel y/o RESA por bajo.	4	Se desencadenarían varias indicaciones, validaciones. Alarmas. Los instrumentos de nivel, caudal se alterarían. Es difícil de diagnosticar desde sala de control si fallo la caja o el armario CUA01 o la barra BRA. Se detecta en campo.	4	32	AP Separar físicamente las redundancias AC El operador puede regular manualmente y solicitar inspección en campo para evaluar la ubicación y los daños y decidir el corte del reactor.	Se considera que no es detectable por los tiempos disponibles antes del corte. Pero la falla es visualmente identificable.

Nº	Función	Modo de falla	Causa	Nº	Efecto potencial	Nº	Método de detección	Nº	Nº	AP / AC	Observaciones
15	Participa de la regulación del nivel del G.V.	Falla Alimentación en el armario CUA01	Inundación o incendio en la zona del armario. O pérdida de la barra ininterrumpible BRA	2	Dado que los 3 trenes de regulación y la válvula se alimentan del mismo armario, no hay posibilidad de regulación manual. (Se pierde la función de seguridad del sistema) La válvula queda en posición. El operador no puede regular manualmente dentro de los límites de disparo. Por alto nivel se cierra la válvula de bloqueo. Baja el nivel hasta el disparo del RESA.	4	Los armarios tienen alarmas. Alarmas del OM de falla de validaciones de la tarjeta SCON. Para identificar la causa tiene que ir a campo.	4	32	AP La barra dispone de convertidor con baterías y posibilidad también de conmutarse a barra BML para emergencia.	Se considera que no es detectable por los tiempos disponibles antes del corte. Pero la falla es visualmente identificable.

Nº	Función	Modo de falla	Causa	Nº	Efecto potencial	Nº	Método de detección	Nº	Nº	AP / AC	Observaciones
16	Participa de la regulación del nivel del G.V.	Válvula reguladora (LAB60 AA002) falla a regular	Pérdida de suministro eléctrico en barra BRA	1	Dado que los 3 trenes de regulación y la válvula se alimentan del mismo armario, no hay posibilidad de regulación manual en caso de interrupción en la alimentación de la Barra BRA. La válvula queda fija en la posición en la que operaba. El operador no puede regular manualmente al GV y mantenerlo dentro de los límites de disparo. Por alto nivel se cierra la válvula de aislación de línea. Y Baja el nivel hasta el disparo del RESA (10m).	4	Se perderían las indicaciones de las señales en sala de control. Y también alarma de la pérdida de la barra.	1	4	AP Capacitar en maniobras relacionadas al sistema eléctrico ininterrumpible. Reemplazar los convertidores por los del tipo inverter que son más confiables.	

Ejemplo de análisis en el caso del cálculo de potencia térmica

17	Procesamiento de la señal Señal CRW05FJ01 en calculo potencia térmica	Transmisor de caudal genera señal errónea	Descalibración durante operación	2	Señal errónea de alto/bajo caudal. Al seleccionarse el segundo máximo, el valor visualizado en el OM no se vería afectado.	X ¹	Indicación en sistema de monitoreo OM. Señal: XM38 Nombre: "A2OF3 MEASUREMENT" Se contrasta con la medición de potencia primario, pero esta no es tan precisa.	1	X	En CNA 1 se estimó una sensibilidad de la influencia del caudal en el cálculo de potencia de 0.64 MW/t/h El caudal en CNA 2 ronda los 500kg/s es decir 1800 t/h (Ver Ref. 4) Sería un estudio derivado.
----	--	---	----------------------------------	---	--	----------------	--	---	---	---

¹Quedó fuera del alcance la evaluación de severidad con la escala basada en impacto económico.