

“Determinación de la confiabilidad de los sistemas de refrigeración primario y secundario del RA-10”

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

Alumno: Ing. Cisneros, María Eugenia.
Director: Ing. Ibarra, Víctor.
Co-Director: Ing. Ramírez, Pablo.

Noviembre 2017.



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN



INDICE

1. RESUMEN.....	4
2. ABSTRACT.....	5
3. INTRODUCCIÓN.....	6
2.1 Descripción del reactor RA-10	6
4. OBJETIVO	7
5. ALCANCE DEL ANÁLISIS	8
6. SISTEMA PRIMARIO DE REFRIGERACIÓN.....	8
6.1. Descripción	8
6.2. Componentes.....	8
6.3. Funciones.....	9
6.4. Criterios y bases de diseño	10
6.5. Convección Forzada	11
7. SISTEMA SECUNDARIO DE REFRIGERACIÓN	13
7.1. Descripción	13
7.2. Funciones.....	14
8. METODOLOGÍA A UTILIZAR.....	15
8.1. AMFE: análisis de modos y efectos de falla.....	15
8.2. Árbol de fallas	18
8.3. Vínculo entre el AMFE y el árbol de fallas.....	21
9. CONDICIONES INICIALES DEL ANÁLISIS	22
9.1. Elementos Pasivos.....	22
9.2. Líneas de alimentación	22
9.3. Válvulas de corte manual	22
9.4. Pérdidas de fluido	22
10. DESARROLLO	23
10.1. AMFE para sistema PRI.....	23
10.1.1 Cañerías	25

10.1.2 Bombas del PRI.....	26
10.1.3 Válvula neumática de control de caudal	27
10.1.4 Intercambiador de calor	28
10.2. Árbol de fallas del sistema PRI	30
E1: Pérdida de caudal por el núcleo	32
E2: Pérdida de inventario.....	33
E3: Pérdida de intercambiador de calor.....	35
10.3. AMFE para el sistema SEC	36
10.3.1 Torre de enfriamiento (TORREN).....	38
10.4. Árbol de fallas del sistema SEC	39
E1: Pérdida de intercambiador de calor.....	41
E2: Pérdida de caudal.....	42
E3: Pérdida de una celda en la TORREN.....	42
11. RESULTADOS	45
11.1 Resultados del análisis del Sistema PRI.....	45
11.1.1 Confiabilidad para un ciclo de operación.....	47
11.1.2 Confiabilidad para seis ciclos de operación.....	47
11.2 Resultados del análisis del Sistema SEC.....	48
12. CONCLUSIONES	52
13. BIBLIOGRAFÍA.....	53

1. RESUMEN

En el presente trabajo, se calculó la confiabilidad de los sistemas de refrigeración primario y secundario del reactor de investigación RA10, para el estado operacional de planta Convección Forzada.

El análisis se realizó aplicando dos metodologías complementarias, el Análisis y Modos de fallas y sus efectos (AMFE) y Árbol de Fallas. Para esto se analizaron cada uno de los componentes de cada sistema y se obtuvieron las probabilidades de fallas de cada uno en un tiempo de misión determinado; éste valor luego fue utilizado en el árbol de fallas para calcular los conjuntos mínimos de corte, que corresponden a las combinaciones de eventos básicos que generan el evento tope no deseado. Para el sistema primario se planteó que evento tope no deseado es la no refrigeración del núcleo, y para el sistema secundario la pérdida del sumidero de calor. Se calculó una probabilidad de ocurrencia de dichos eventos topes, que se corresponden con las distintas ramas de los árboles de fallas realizados para cada sistema.

Por último, se expresaron los resultados obtenidos, donde se estableció un orden de importancia de los eventos básicos que llevan a la ocurrencia del evento tope, con el fin de identificar los componentes críticos de cada sistema, sobre los cuales se deberá prestar mayor interés y realizar las tareas de mantenimiento correspondientes durante la operación del reactor, a fin de evitar la ocurrencia de cualquiera de los eventos básicos planteados.

2. ABSTRACT

In the present work, the reliability of the primary and secondary refrigeration systems of the RA10 research reactor was calculated for the operational plant status of Forced Convection.

The analysis was carried out applying two complementary methodologies, the Analysis and Failure Modes and their effects (FMEA) and Tree of Faults. For this, each component of each system was analyzed and the probabilities of failure of each one were obtained in a determined mission time; this value was then used in the fault tree to calculate the minimum cut sets, which correspond to the combinations of basic events that generate the unwanted stop event. For the primary system it was stated that the unwanted stop event is the non-cooling of the core, and for the secondary system the loss of the heat sink. A probability of occurrence of these stop events was calculated, which correspond to the different branches of the fault trees made for each system.

Finally, the results obtained were expressed, where an order of importance of the basic events that lead to the occurrence of the top event was established, in order to identify the critical components of each system, on which of them more interest should be given and perform the corresponding maintenance tasks during the operation of the reactor, in order to avoid the occurrence of any of the basic events raised.

3. INTRODUCCIÓN

3.1 Descripción del reactor RA-10

El Proyecto RA-10 tiene como finalidad diseñar, construir y licenciar un Reactor Nuclear de Investigación y Producción Multipropósito, de flujo neutrónico suficientemente alto como para garantizar su utilización simultánea en una amplia gama de aplicaciones.

El Reactor RA-10 tendrá como finalidad ampliar y consolidar la producción de radioisótopos, proveer facilidades de irradiación de materiales y combustibles y ofrecer nuevas aplicaciones en el campo de la ciencia y la tecnología.

El reactor RA-10 estará ubicado en el Centro Atómico Ezeiza (CAE) el cual comprende una superficie de 840 hectáreas y está situado en el Partido de Ezeiza, provincia de Buenos Aires, aproximadamente a 33 km al suroeste de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

El Núcleo del Reactor tendrá 25 posiciones distribuidas según una grilla en un arreglo de 5x5. El Núcleo estará compuesto por 19 Elementos Combustibles del tipo MTR, de 21 placas cada uno conteniendo polvo de siliciuro de uranio con un enriquecimiento de 19.70% de Uranio-235. La potencia nominal del núcleo será de 30 MW. Las 4 esquinas y 2 posiciones centrales que completan el arreglo de 25 posiciones se utilizarán como Dispositivos Experimentales.

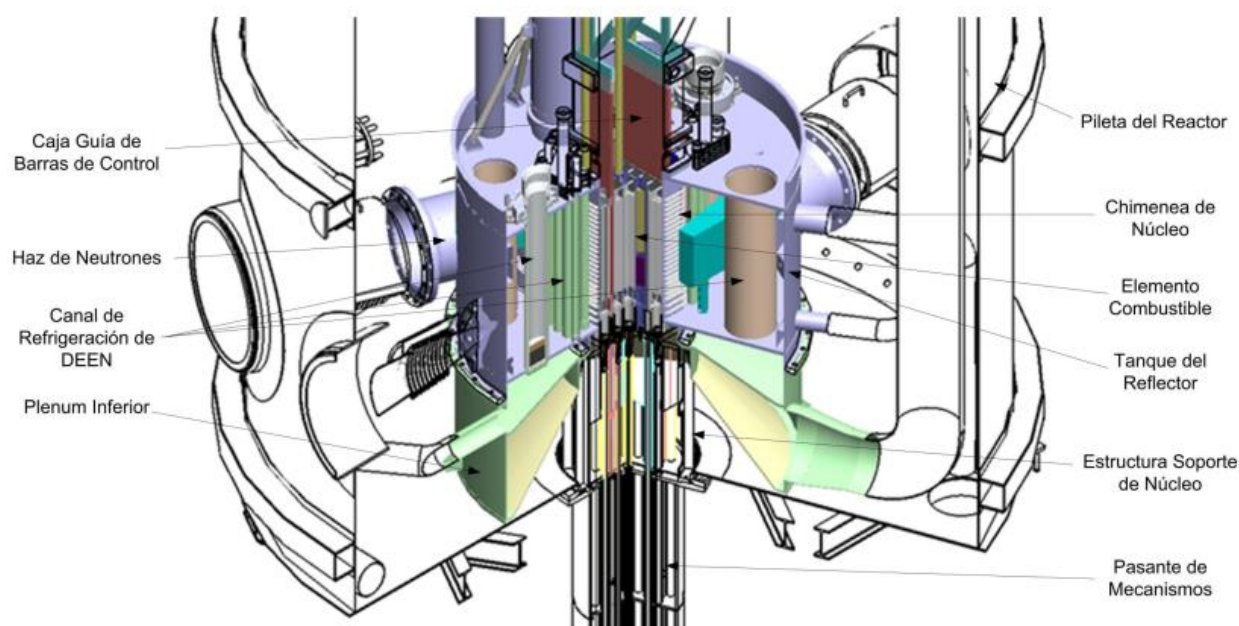


Figura 1: Internos de Pileta de Reactor (PRE)

El Núcleo se encuentra reflejado radialmente por agua pesada la cual se encuentra contenida dentro del Tanque del Reflector. El Tanque del Reflector y los sistemas de proceso asociados con el reflector de agua pesada son estancos y están separados del refrigerante de agua liviana. El Tanque del Reflector cuenta además con posiciones para alojar Dispositivos Experimentales.

La regulación de reactividad se realizará por medio de 6 barras de control que pueden moverse verticalmente y se insertan desde el fondo de la Pileta del Reactor. La inserción rápida de las 6 barras de control por la acción combinada de la gravedad e inyección de aire comprimido constituirá el Primer Sistema de Parada. El Reactor RA-10 también contará con un Segundo Sistema de Parada, el cual consiste en el vaciado parcial del reflector de agua pesada contenida en el Tanque del Reflector.

Cuando el reactor opere a su potencia máxima, 30 MW, la circulación del agua será forzada por el Sistema Primario de Refrigeración en sentido ascendente. También será posible operar el Reactor con refrigeración por convección natural cuando su potencia sea inferior a 400 KW. El calor generado por los dispositivos experimentales ubicados en las posiciones del Tanque del Reflector es removido por el Sistema de Refrigeración de Piletas. El refrigerante que circula por el Sistema de Refrigeración Primario y por el Sistema de Refrigeración de Piletas transfiere el calor que remueve al Sistema Secundario de Refrigeración por medio de intercambiadores de calor. El Sistema Secundario de Refrigeración Transfiere el calor del Núcleo y los Dispositivos Experimentales a la atmósfera por medio de torres de enfriamiento.

4. OBJETIVO

Como todo reactor nuclear, el RA10, tendrá sistemas que cumplan con una de las funciones fundamentales de la seguridad nuclear: *refrigeración*, para condiciones de operación normal y condiciones anormales. Para la operación normal, la función de refrigeración del núcleo la implementa el Sistema de Refrigeración Primario (PRI) y el Sistema de Refrigeración Secundario (SEC). Para condiciones anormales, el diseño incluye sistemas de seguridad para eventos de base de diseño, el Sistema de Refrigeración por Convección Natural del Núcleo. El diseño del RA-10 también incluye sistemas que hacen frente a condiciones más severas y de más baja frecuencia de ocurrencia que se denominan eventos de base de diseño extendida donde la función de refrigeración es implementada por el Sistema de Inyección de Agua de Emergencia (IAE) y el modo de Refrigeración Prolongada de Piletas (RPPIL) del SEC.

El objetivo de este trabajo es determinar la confiabilidad de los sistemas de refrigeración del núcleo para *operación normal*, PRI y SEC; analizando cada uno de sus componentes y por lo tanto teniendo una evaluación completa de éstos sistemas. Se utilizarán dos metodologías complementarias para el análisis de confiabilidad: el Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF) y la técnica de Árboles de Fallas (AdF). Estas metodologías utilizadas en conjunto constituyen la mejor práctica profesional para la determinación de la confiabilidad de sistemas complejos.

5. ALCANCE DEL ANÁLISIS

Para la realización del presente análisis, el alcance está determinado por el reactor funcionando en operación normal, en modo *Convección Forzada*. De acuerdo a la memoria descriptiva del Sistema de Refrigeración Primario (PRI), la principal condición en dicho modo de operación es tener dos de las tres bombas del sistema activas.

6. SISTEMA PRIMARIO DE REFRIGERACIÓN (PRI)

6.1 Descripción

El Sistema de Refrigeración Primario refrigerará las placas combustibles por circulación forzada de agua liviana desmineralizada moviéndose en dirección ascendente, removiendo el calor y transfiriéndolo por medio de intercambiadores de calor al Sistema Secundario de Refrigeración que finalmente la evacuará al medio ambiente a través de torres de enfriamiento. Para la refrigeración en parada y durante algunos eventos operacionales, el circuito de refrigeración se cerrará sobre la misma pileta del reactor al abrirse unas válvulas (clapetas) y el calor residual generado se extraerá del núcleo por convección natural, siendo el agua de la pileta del reactor el sumidero de calor.

6.2 Componentes

Los componentes y equipos del PRI dentro de la pileta del reactor son:

- Plenum inferior para ingreso refrigerante primario
- Chimenea del Primario
- Rompesifones
- Válvulas clapeta de convección natural
- Cañería interior de la Pileta Reactor
- Los componentes y equipos del PRI fuera de la pileta del reactor son:
 - Tanque de decaimiento

- Bombas con Volante de Inercia
- Intercambiadores de Calor
- Válvulas de aislamiento
- Cañería del primario, válvulas y componentes asociados.

El PRI será un circuito abierto. La presión a la salida del núcleo será igual a la presión atmosférica más la columna de agua sobre el mismo. El sistema estará completamente dentro del confinamiento. Las bombas y equipos asociados a las mismas se encontrarán por debajo del nivel del núcleo. El tanque de decaimiento se encontrará dentro de un cuarto blindado con paredes de concreto.

6.3 Funciones

La función principal del PRI es mantener las placas combustibles refrigeradas, con márgenes adecuados, dentro de los límites de seguridad, tanto en estados operacionales como durante eventos operacionales previstos y eventos base de diseño. Operando a potencia nominal el PRI deberá extraer aproximadamente el 95% del calor generado en el núcleo. El 5% restante será extraído por el Sistema de Refrigeración del Reflector RD2O.

El circuito puede considerarse dividido en dos partes con funciones de seguridad diferentes. La parte del PRI ubicada dentro de la pileta del reactor tendrá como función la refrigeración del núcleo:

- en convección forzada cuando el reactor está operando a potencia
- en convección natural cuando el reactor está en parada.

La parte del PRI ubicada fuera de la pileta del reactor tendrá como función mantener el refrigerante en circulación transfiriendo el calor generado en el núcleo al Sistema Secundario de Refrigeración.



El PRI se diseña para los siguientes propósitos:

- El PRI opera de dos maneras:

- El tipo de Refrigeración lo establece el Estado del Reactor.

Para pasar de un tipo de Refrigeración a otro sólo se activan o desactivan 2 bombas 1010-AB-001-A/B/C. Salvo en tareas de mantenimiento, no se manipulan válvulas y/o variables en el sistema de control.

6.5 Convección Forzada

Dado que el presente trabajo analiza cual es la confiabilidad del PRI y SEC en convección forzada, a continuación, se describe la misma.

Durante la operación del reactor a potencia nominal el PRI extrae el calor generado en el núcleo en circulación forzada a través del mismo y lo transfiere al SEC a través de los intercambiadores de calor.

Después de atravesar el núcleo en flujo ascendente, el agua del PRI asciende por la chimenea donde se encuentra con el caudal de taponamiento descendente desde la pileta. El caudal total (primario + taponamiento) es conducido a través de la cañería de salida hacia el tanque de decaimiento atravesando la pileta del reactor.

La línea principal del PRI sale del tanque de decaimiento atravesando el blindaje de hormigón y entra en la sala de bombas, donde se divide en tres ramas cada una de las cuales tiene una bomba centrífuga y un intercambiador de calor tipo placas. En operación normal, dos ramas tienen la capacidad de refrigerar adecuadamente el sistema. Cada bomba deberá tener un volante de inercia que permita la disminución lenta del caudal de refrigeración a través del núcleo, en caso de pérdida de energía eléctrica.

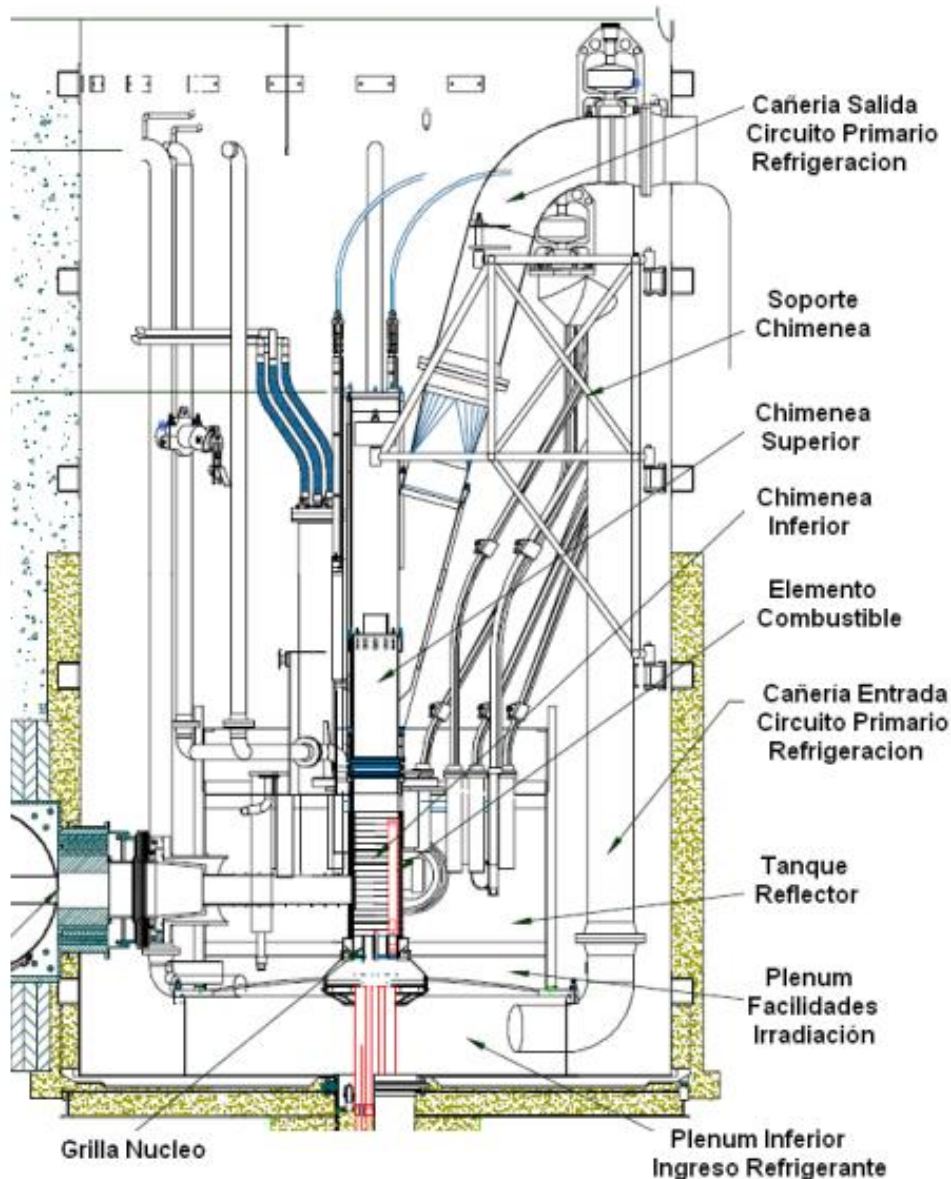


Figura 3: Convección Forzada.

La sala de bombas estará subdividida de manera que cada rama del circuito quede separada físicamente. A la salida de los intercambiadores de calor las tres ramas se conectan en una tubería común de retorno. Esta atraviesa el blindaje de hormigón del reactor y luego se divide en dos ramas de cañería que entran a la pileta del reactor por sobre el nivel del núcleo. Las cañerías descienden dentro de la pileta para descargar el agua en el plenum inferior del núcleo. La cota de ingreso/egreso de las cañerías a la pileta debe ser suficiente como para que, en caso de un evento de pérdida de refrigerante, los rompesifones aseguren mantener un cierto nivel de agua en la pileta por encima del núcleo

7. SISTEMA SECUNDARIO DE REFRIGERACIÓN

7.1 Descripción

El SEC tendrá dos modos de operación: remoción de calor en operación a potencia y remoción de calor en modo refrigeración prolongada de piletas RPPIL. Este último modo incluirá los casos de reactor apagado, recambio de combustibles y mantenimiento.

En el modo a Plena Potencia el sistema de bombeo (conformado por 3 bombas principales al 50%, una en stand-by) suministrará un caudal aproximado de 5000 m³/h. que proveerá refrigeración a: PRI, PIL, RD2O, dispositivos de irradiación y demás facilidades del reactor. En este modo de funcionamiento las bombas para RPPIL permanecerán apagadas. El sistema evacuará el calor al medio ambiente a través de un conjunto de torres de enfriamiento de tiro inducido que descargarán a una gran pileta colectora de hormigón. El sistema tendrá regulación automática de velocidad de giro de los ventiladores de las torres para controlar la temperatura de salida.

El SEC utiliza como fluido de proceso agua industrial con aditivos para preservar su calidad fisicoquímica. Durante la operación normal del Reactor, la temperatura del fluido estará en el rango de 31°C (salida de la torre de enfriamiento) y 38°C (retorno a la torre de enfriamiento).

Una parte del caudal se derivará hacia el sistema de tratamiento de aguas (TASEC) para mantener la calidad del agua de enfriamiento dentro de los rangos de operación especificados. El TASEC funciona en los dos modos de operación del SEC. Como sistemas auxiliares posibles se debe mencionar un grupo de bombas que impulsará agua para los enfriadores de agua del Sistema de Ventilación del Edificio Reactor. Otro grupo de bombeo para los compresores de Helio de la fuente fría.

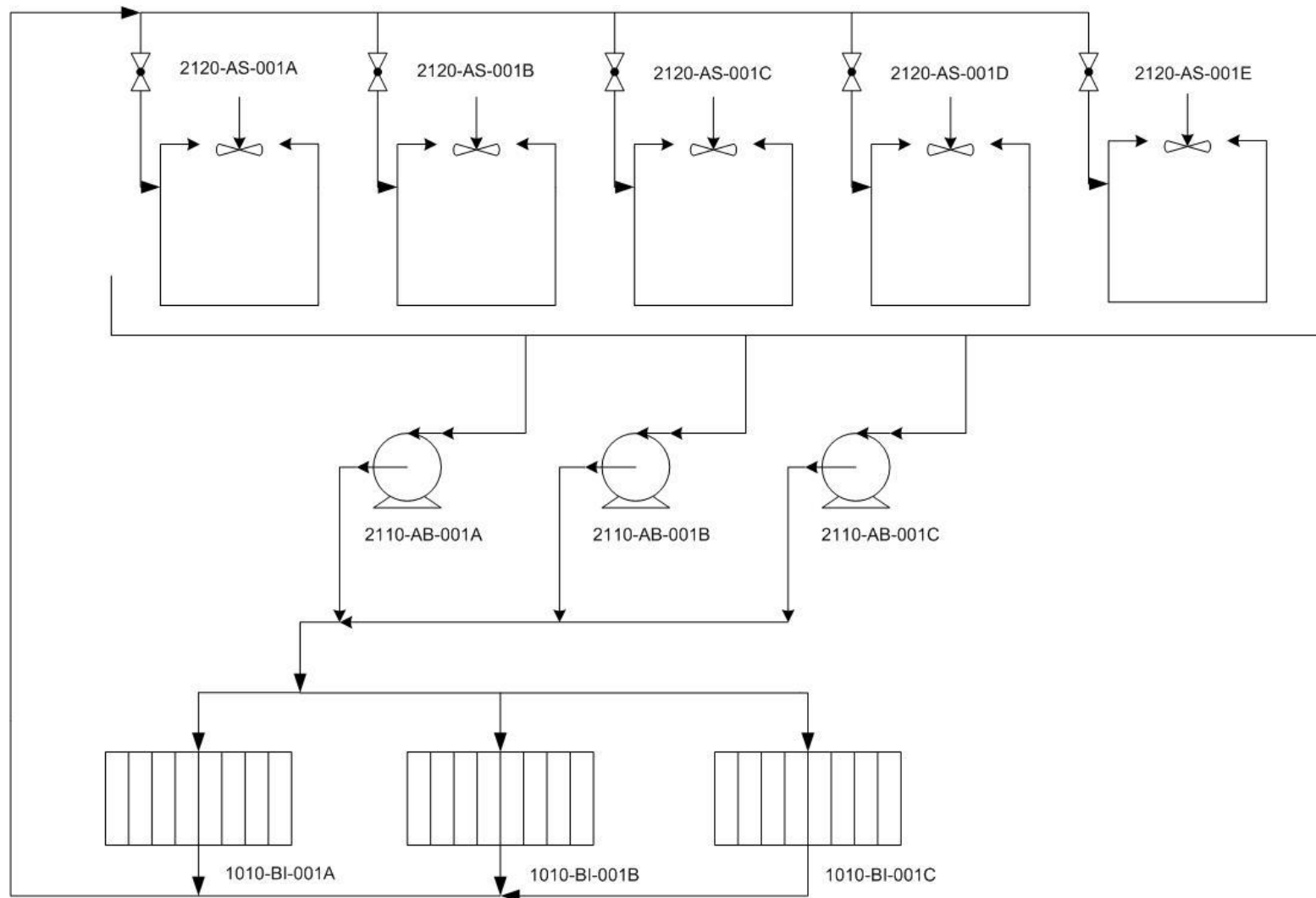


Figura 4: Sistema secundario simplificado.

7.2 Funciones

El SEC tiene la función de transferir al ambiente, mediante la circulación de agua industrial desmineralizada (5000 m³/h aproximadamente), una carga térmica máxima de 35 MW con el reactor operando a plena potencia, proveniente de los siguientes sistemas:

- PRI: 95% del valor nominal de potencia del reactor. (28,5 MW)
- PIL: Incluye refrigeración de dispositivos de irradiación (1 MW) y de Elementos Combustibles gastados (carga completa equivalente a 10 años de operación) (0,1 MW).
- RD2O: 5% del valor nominal de potencia del reactor. (1,5 MW)
- Facilidades Experimentales del reactor. Incluye refrigeración para la Fuente Fría de Neutrones, el Circuito de Ensayo para barras combustibles de potencia y otros. (0,2 MW)
- Enfriadores del Sistema de Ventilación del Edificio Reactor. (2 MW)
- Potencia de Bombeo de Primario y Secundario. (1 MW)

Con el reactor en parada, tiene la función de transferir al ambiente, mediante la circulación de agua industrial desmineralizada (70 m³/h aproximadamente), el calor de decaimiento radiactivo: del núcleo, de los dispositivos de irradiación y de los Elementos Combustibles gastados, con el fin de mantener dentro de cierto rango la temperatura de las piletas reactor y servicio.

8. METODOLOGÍA A UTILIZAR

8.1 AMFE: análisis de modos de fallas y sus efectos

El análisis de modos de fallas y sus efectos (AMFE) es una técnica analítica utilizada para identificar los modos en que componentes, sistemas o procesos fallan, causando efectos indeseados sobre el funcionamiento para el cual el sistema fue diseñado. Se trata de un análisis inductivo y sistemático, componente por componente, de modo de identificar todos los posibles modos de falla y sus efectos sobre el sistema.

El análisis AMFE comienza identificando modos de falla de los componentes del sistema para luego analizar sus efectos.

La técnica AMFE consiste en un procedimiento metódico de análisis de sistemas. Se utiliza para identificar los modos en que componentes, sistemas o procesos pueden fallar a la hora de cumplir la función para la cual fueron diseñados.

A través de este análisis se identifica:

- Los potenciales modos de falla de los componentes del sistema.
- Los efectos del modo de falla sobre el componente y/o sobre el sistema y la planta, en su operación, función o estado.
- El mecanismo de falla, es decir las posibles causas de la misma.
- Medidas de ingeniería a implementar en el diseño para prevenir o mitigar el impacto de los modos de falla en los componentes y/o sistema.

Esta técnica resulta útil como soporte para las revisiones de diseño y es recomendable comenzar a utilizarla lo antes posible en el proyecto. El análisis debe actualizarse conforme se avanza con el proyecto y a medida que el diseño de aquellos sistemas que hayan sido analizados, sea modificado.

Para el desarrollo del análisis AMFE se requiere información detallada sobre los componentes y sus funciones en el sistema a fin de poder identificar con claridad los modos en que estos pueden fallar.

Para el presente trabajo, el AMFE se ha desarrollado de modo de poder identificar cuáles son los posibles modos de falla de cada componente, asociando una tasa de falla a cada uno, y dado un tiempo determinado, calcular su confiabilidad, y como consecuencia la Inconfiabilidad.

A continuación, se definen conceptos relevantes de la metodología.

- **Tasa de fallas**

Dado que la tasa de fallas varía respecto al tiempo, su representación típica tiene forma de bañera, debido a que la vida de los dispositivos tiene un comportamiento que viene reflejado por tres etapas diferenciadas:

- Fallas iniciales (Tasa decrece)
- Fallas normales (Tasa constante)
- Fallas de desgaste (Tasa aumenta)

En la figura 5, se puede ver la representación de la curva típica de la evolución de la tasa de fallas.

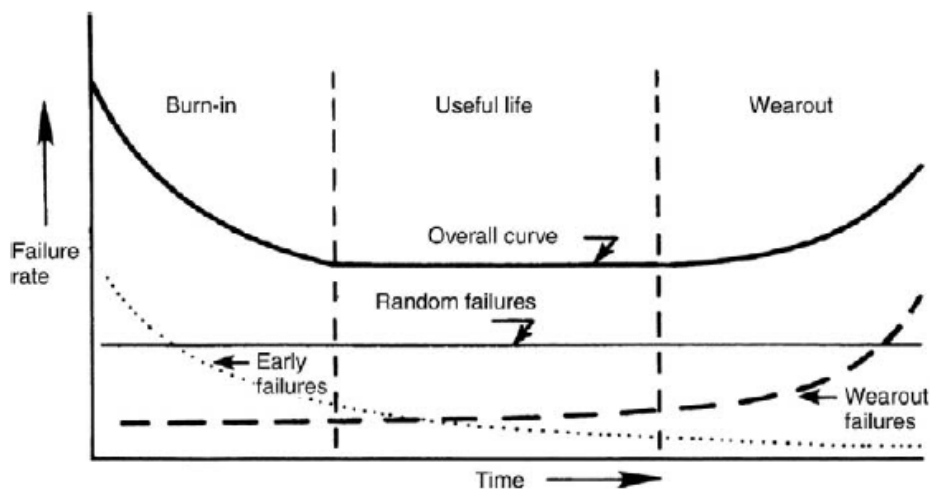


Figura 5: Curva de la Bañera, evolución de la tasa de fallas.

La primera etapa de fallas iniciales, corresponde a la existencia de dispositivos defectuosos o instalados indebidamente con una tasa de fallos superior a la normal. Esta tasa de fallas elevada va disminuyendo con el tiempo hasta alcanzar un valor casi constante.

La segunda etapa de fallas normales, también llamada de fallas aleatorias, es debida principalmente a operaciones con solicitaciones superiores a las proyectadas y se presentan de forma aleatoria e inesperada. El comportamiento de la tasa es constante durante esta etapa, y las fallas son debidos a las propias condiciones normales de trabajo de los dispositivos o a solicitaciones ocasionales superiores a las normales.

La tercera etapa de fallas de desgaste, es debida a la superación de la vida prevista del componente cuando empiezan a aparecer fallos de degradación como consecuencia del desgaste. Se caracteriza por un aumento rápido de la tasa de fallas. Para desarrollar el análisis de confiabilidad se tomó la etapa de fallas normales, donde $\lambda = \text{constante}$; y estos valores se obtuvieron de un Informe de la Comisión de Regulación Nuclear de U.S.¹.

¹NUREG-CR-6928 - Industry Avg for Components and IE for US Commercial NPP.

- **Confiabilidad e Inconfiabilidad**

De acuerdo al tipo de falla, la *Inconfiabilidad* (1) puede variar. Para el caso de análisis del presente trabajo, se trata de *Fallas en Operación*, dado que el alcance es Convección Forzada, y las mismas se consideran *no reparables*. En la Tabla 1, se pueden observar los diferentes *Modelos de Confiabilidad* (2) de componentes.

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t_m} \quad (1)$$

$$R(t) = e^{-\lambda t_m} \quad (2)$$

Estado	Modelo	Fórmula	
Operación	No reparable	$Q(t_m) = 1 - \exp(-\lambda_0 t_m)$	$Q(t_m) \approx \lambda_0 t_m$
	Reparable	$Q = \frac{\lambda_0 MTTR}{1 + \lambda_0 MTTR}$	$Q(t_m) \approx \lambda MTTR$
Espera	No reparable	$Q(t_m) = 1 - \exp(-\lambda_e t_m)$	$Q(t_m) \approx \frac{1}{2} \lambda_e t_m$
	Reparable Monitoreado	$Q = \frac{\lambda_e Td}{1 + \lambda_e Td}$	$Q = \lambda_e Td$
	Sometido a pruebas periódicas	$Q_t = \frac{\lambda_e T_{ep}}{2} + \frac{\tau}{T_{ep}} + \lambda_e MTTR$	
Demanda		$Qd = p$	

Tabla 1: Modelos de Confiabilidad.

8.2 Árbol de fallas

Los árboles de fallas constituyen una técnica ampliamente utilizada en los análisis de riesgos debido a que proporcionan resultados tanto cualitativos como cuantitativos.

Esta técnica consiste en un proceso deductivo basado en las leyes del Algebra de Boole, que permite determinar la expresión de sucesos complejos estudiados en función de los fallos básicos de los elementos que intervienen en él. De esta manera, se puede apreciar de forma cualitativa, qué sucesos son menos probables porque requieren la ocurrencia simultánea de numerosas causas.

Consiste en descomponer sistemáticamente un suceso complejo denominado *suceso TOP* en *sucesos intermedios* hasta llegar a *sucesos básicos*.

- *Suceso TOPE*: Ocupa la parte superior de la estructura lógica que representa el árbol de fallos. Es el suceso complejo que se representa mediante un rectángulo. Tiene que estar claramente definido.
- *Sucesos intermedios*: Son los sucesos intermedios que son encontrados en el proceso de descomposición y que a su vez pueden ser de nuevo descompuestos. Se representan en el árbol de fallos en rectángulos.
- *Sucesos básicos*: Son los sucesos terminales de la descomposición. Pueden representar cualquier tipo de suceso: sucesos de «fallas», error humano o sucesos de «éxito»: ocurrencia de un evento determinado. Se representan en círculos en la estructura del árbol.
- *Sucesos no desarrollados*. Existen sucesos en el proceso de descomposición del árbol de fallos cuyo proceso de descomposición no se prosigue, bien por falta de información, bien porque no se considera necesario. Se representan mediante un rombo y se tratan como sucesos básicos.

En el proceso de descomposición del árbol se recurre a una serie de *puertas lógicas* que representan los operadores del álgebra de sucesos. Los dos tipos más elementales corresponden a las puertas AND y OR cuyos símbolos se indican a continuación. La puerta OR se utiliza para indicar que la salida ocurre si al menos ocurre un evento de entrada.

La puerta AND se utiliza para indicar un «Y» lógico. Para que ocurra la salida deben ocurrir todos los eventos de entrada.

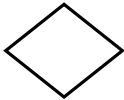
SIMBOLOS DE EVENTOS PRIMARIOS	
	EVENTO BÁSICO: un evento básico que no requiere mayor desarrollo.
	ACONTECIMIENTO ACONDICIONADO: condiciones o restricciones específicas que se aplican a cualquier compuerta lógica (se utiliza primaria con PRIORIDAD Y puerta de ENTRADA).
	EVENTO NO DESARROLLADO: un evento que no se desarrolla aún más porque no tiene consecuencias suficientes o porque la información no está disponible.
	EVENTO EXTERNO - Un evento que normalmente se espera que ocurra.
SIMBOLOS DE EVENTOS INTERMEDIOS	
	EVENTO INTERMEDIO - Un evento que ocurre debido a una o más causas antecedentes que actúan a través de puertas lógicas
SIMBOLOS DE PUERTA LÓGICAS	
	Y - La salida ocurre si se producen todos los eventos de entrada.
	OR: la salida ocurre si ocurre al menos uno de los eventos de entrada.
	Not - OR - La salida ocurre si al menos uno de los eventos de entrada no ocurre
	Not - AND - La salida ocurre si no se producen todos los eventos de entrada
SIMBOLOS DE TRANSFERENCIA	
	TRANSFER IN - Indica que el árbol se desarrolla más adelante en el momento en que se produce la TRANSFER OUT correspondiente (p., en otra página)
	TRANSFER OUT - Indica que esta porción del árbol debe estar unida en la TRANSFERENCIA correspondiente.

Tabla 2: Simbología de Árbol de Fallas.

A continuación, se definen conceptos relevantes.

- **Evento tope (T):** suceso de falla postulado para el sistema.

- **Conjunto de corte:** es un suceso formado por un suceso primario o una intersección de sucesos primarios, tal que, de ocurrir hace que ocurra el evento tope.
- **Conjunto Mínimo de Corte (CMC):** cuando un conjunto de corte está formado por el mínimo número de sucesos primarios posibles para la función lógica dada.
- **Función lógica del sistema:** representa el modelo lógico del sistema y se expresa mediante la unión de CMC.

En la técnica del árbol de fallas, caben destacar dos fases bien diferenciadas: la primera consiste en la *elaboración del árbol* y la segunda en el *análisis de los resultados y en su tratamiento*.

Es importante tener en cuenta, que los árboles de fallas pueden ser realizados desde etapas tempranas del diseño; y luego ser actualizados en función del mayor conocimiento que se tenga del sistema. Luego de la puesta en marcha del sistema, los árboles también son utilizados para identificar las causas raíces de las fallas.

El objetivo de un análisis cualitativo es reducir el árbol a una forma lógicamente equivalente en términos de las combinaciones específicas de eventos básicos suficientes para provocar el evento superior no deseado. Cada combinación será un "conjunto de corte mínimo" de modos de falla para el árbol.

Una vez que la estructura del árbol ha sido construida, el análisis siguiente toma dos formas. El análisis cualitativo, que reduce el árbol hasta obtener un conjunto mínimo de modos de fallas para el mismo; para realizarlo se utiliza el álgebra Booleana. El análisis cuantitativo del árbol consiste en calcular la probabilidad de ocurrencia del evento principal a partir de la probabilidad de ocurrencia de los eventos básicos, ésta última es la nombrada como Inconfiabilidad en el AMFE correspondiente.

8.3 Vínculo entre el AMFE y el árbol de fallas

La técnica AMFE, la cual es de tipo inductiva, es utilizada como complemento de la técnica deductiva de desarrollo de Árboles de Fallas. Esta última es empleada, entre otras aplicaciones, para la determinación de la Inconfiabilidad de sistemas y la frecuencia de eventos iniciantes.

La consistencia en la aplicación de ambas técnicas está dada porque cualquier falla simple en el AMFE que conduce a la falla del sistema (falla catastrófica), tiene

que aparecer como falla simple en los conjuntos mínimos de corte obtenidos como resultado del árbol de fallas. De la misma forma, todas las fallas simples identificadas en el árbol de fallas deben haber sido detectadas como tales en el desarrollo del AMFE.

9. CONDICIONES INICIALES DEL ANÁLISIS

No se considera dentro del análisis de este estudio lo siguiente:

9.1 Elementos Pasivos (Pileta de reactor, pileta de servicio y tanque de decaimiento)

Las fallas que puedan surgir en estos componentes son parte del diseño de los mismos, y pueden descartarse por estar cubiertas por el código de aplicación, es decir, por ser componentes ASME. Para la pileta de reactor y la pileta de servicio, el código de diseño que se aplica es ASME III, División 1, subsección ND; y para el tanque de decaimiento ASME VIII, División 1.

9.2 Líneas de alimentación

Se descartan en este análisis la falla de las mismas, ya que se consideran diseñadas con la suficiente flexibilidad para soportar las expansiones térmicas, golpes de ariete, etc., y sus consecuencias. Las mismas están diseñadas y fabricadas bajo las normas ASME / ANSI B36.19 Rev. 1.² Si se considerará la tasa de falla para el modo ELS (fugas externas pequeñas) y el modo ELL (fugas externas grandes).

9.3 Válvulas de corte manual

Se excluyen del análisis bajo la suposición de que existe un procedimiento para la operación o la puesta en marcha, que impida que una válvula esté en la posición incorrecta (error humano). Esto se extiende a la posibilidad de que, durante el funcionamiento normal, alguna válvula sea operada incorrectamente.

9.4 Pérdidas de fluido

Se considera que las pérdidas de fluido externas grandes (para válvulas, bombas e intercambiadores de calor) deberían estar cubiertas por los procedimientos de montaje y puesta en marcha, con lo cual cualquier falla de este tipo aparecería

² Según especificación técnica ET-INV/RA-10/0000-2-00

como falla temprana. Consideraremos solo la ELS (fugas externas pequeñas), ya que es la más probable.

10. DESARROLLO

El desarrollo del análisis comienza con la confección de los AMFE tanto para el Sistema PRI, como para el SEC. Una vez realizados los mismos, se obtiene la *Inconfiabilidad* $Q(t)$ de los componentes más relevantes de cada sistema. Este dato, es llevado al Árbol de fallas, para determinar los *conjuntos mínimos de corte* (CMC) y calcular la probabilidad de que los mismos ocurran.

Se calcularon las confiabilidades de los sistemas PRI y SEC, para dos tiempos de misión, con el objetivo de realizar una comparación de resultados. Los tiempos de misión utilizados, corresponden a *un ciclo de producción*, que son t_{m1} 28,5 días de trabajo continuo en el estado operacional de *Convección Forzada*, y a *seis ciclos de producción*, t_{m2} 171 días de trabajo, sin tener en cuenta las paradas de mantenimiento entre cada ciclo de trabajo, esto último con el propósito de que los valores de *confiabilidad* sean comparables, debido a que si se tuviesen en cuenta las paradas de mantenimiento, se estaría trabajando con la disponibilidad de los sistemas, y el presente trabajo desarrolla la confiabilidad de los mismos.

Durante el desarrollo se muestran los cálculos realizados para el tiempo de misión de 28,5 días, mientras que, en la sección de resultados [10], se muestran los de los dos tiempos de misión.

10.1 AMFE para sistema PRI

Para la confección del AMFE, se analizaron todos los componentes que forman el sistema, teniendo en cuenta las condiciones iniciales descritas en el apartado [4]; a cada uno de los componentes analizados se les describió su función, su modo de falla, las probables causas de la misma, la tasa de fallas, la Confiabilidad e Inconfiabilidad, de acuerdo a lo descrito en el apartado [7.1].

En la Tabla 3, se pueden observar los resultados obtenidos. En la última columna de la tabla, se indica cuáles son los eventos que luego se utilizaron para la confección del árbol de fallas.

TAG	COMPONENTES	DESCRIPCIÓN y FUNCIÓN	MODO DE FALLA	PROBABLES CAUSAS DE LA FALLA	METODO DE DETECCIÓN	HORAS POR CICLO	LONGITUD DE LA CAÑERÍA (ft)	TASA DE FALLAS (1/hs)	CONFIABILIDAD R(t)	INCONFIABILIDAD Q(t) = 1 - R(t)	NOMBRE DEL EVENTO PARA Adf
1010-400-AR-B-030, 1010-400-AR-B-031	Cañería interna a la PRE	La cañería interna a la PRE es la que conduce a todo el caudal refrigerante desde la parte superior de la PRE, hasta el plenum inferior, el mismo pasa por el núcleo y sale por un lateral de la chimenea hacia fuera de la PRE.	ELL	Desgaste por corrosión. <i>Sismo</i> : tensión axial, pandeo local, pandeo tipo columna.	Inspección visual. Disminución en el caudal que pasa por la cañería.	684	48,87	7,3E-09	0,999994986	5,01E-06	A3
			ELS	<i>Incendio</i> : distorsión térmica, inicio de creep, oxidación rápida.				3,4E-08	0,99997660	2,34E-05	A2
1010-500-AR-B-001, 1010-450-AR-B-051, 1010-450-AR-B-061, 1010-450-AR-B-016, 1010-450-AR-B-038, 1010-450-AR-B-020, 1010-600-AR-B-022, 1010-150-AR-B-034, 1010-200-AR-B-023	Cañería externa a la PRE	La cañería principal es la que conduce a todo el caudal refrigerante desde la salida de la PRE, pasando primero por el TDPRI, y luego por las bombas e intercambiadores de calor, para ingresar nuevamente a la PRE.	ELL	Desgaste por corrosión. <i>Sismo</i> : tensión axial, pandeo local, pandeo tipo columna.	Inspección visual. Disminución en el caudal que pasa por la cañería.	684	342,43	5,1E-08	0,999964867	3,51E-05	A5
			ELS	<i>Incendio</i> : distorsión térmica, inicio de creep, oxidación rápida.				2,4E-07	0,999836057	1,64E-04	A4
1010-25-AR-B-042, 1010-50-AR-B-043	Cañería flushing	Se utiliza para lavar el mecanismo de las barras de control (BC) de depósito de suciedad que puedan causar gran fricción en la operación de las BC (flushing). Línea de retorno a la PRE.	ELL	Desgaste por corrosión. <i>Sismo</i> : tensión axial, pandeo local, pandeo tipo columna. <i>Incendio</i> : distorsión térmica, inicio de creep, oxidación rápida.	Inspección visual. Disminución en el caudal que pasa por la cañería.	684	51,17	3,6E-08	0,999975501	2,45E-05	A6
1010-AB-001A, 1010-AB-001B	Bomba	Impulsa el refrigerante al intercambiador de calor de la línea correspondiente.	FTR	Falla interruptor o señal eléctrica	Tablero de control	684	-	5,0E-06	0,996585842	3,41E-03	B
			SO	Falla señal espuria al SCMR	Tablero de control	684	-	1,0E-06	0,999316234	6,84E-04	C
			ELS	Desgaste por corrosión. <i>Sismo</i> : tensión axial, pandeo local, pandeo tipo columna. <i>Incendio</i> : distorsión térmica, inicio de creep, oxidación rápida.	Inspección. Disminución en el caudal que pasa por la cañería.	684	-	1,2E-07	0,999917923	8,21E-05	A1
1010-HV-1048.00	Válvula neumática de control de caudal	Regula el caudal de interconexión, en un circuito de control abierto; posee un interruptor limitante mecánico y variable para su apertura.	ELS	Desgaste por corrosión. <i>Sismo</i> : tensión axial, pandeo local, pandeo tipo columna. <i>Incendio</i> : distorsión térmica, inicio de creep, oxidación rápida.	Inspección. Disminución en el caudal que pasa por la cañería.	684	-	1,5E-08	0,99998974	1,03E-05	A7
			SO	Señal de control espuria	Tablero de control.	684	-	4,0E-08	0,99997264	2,74E-05	D
			FC	Ausencia de aire. Traba queda abierta por suciedad. Por mala operación del operador.	Disminución de caudal.	684	-	3,0E-06	0,997950104	2,05E-03	F
1010-BI-001A, 1010-BI-001B, 1010-BI-001C (Stand-by)	Intercambiador de calor	Reciben el agua impulsada por las bombas principales del PRI, y enfrían el refrigerante, transfiriendo el calor al sistema SEC.	ELS	Desgaste por corrosión. <i>Sismo</i> : tensión axial, pandeo local, pandeo tipo columna. <i>Incendio</i> : distorsión térmica, inicio de creep, oxidación rápida.	Inspección. Disminución en el caudal que pasa por la cañería.	684	-	1,5E-08	0,99998974	1,03E-05	H, L, J
			PG	Falla por obstrucción en tapón.	Disminución de caudal.	684	-	6,0E-07	0,999589684	4,10E-04	G, K, I

Tabla 3: AMFE del sistema PRI.

A continuación, se describen los resultados expresados en la tabla anterior.

10.1.1 Cañerías

Para las cañerías, se explica cuales es la descripción de cada una y la función que cumplen dentro del sistema. La tasa de fallas de éste componente, tiene en cuenta que la falla predominante es ELS (fugas externas pequeñas), que contemplan de 0,3 a 13,6 m³/hs³, si bien existen otros posible modos de falla, los mismos no se tuvieron en cuenta debido a que no son representativos para el análisis.

Como probables causas de la falla ELS, se tomaron un evento interno y un evento externo, y quedaron determinadas como *desgaste por corrosión; en caso de sismo: tensión axial, pandeo local, pandeo tipo columna; en caso de Incendio: distorsión térmica, inicio de creep, oxidación rápida*. Se propuso como método de detección la *inspección visual* y la *detección de la disminución en el caudal que pasa por la cañería*. La tasa de fallas λ , tiene unidades de 1/ft*hs. Por lo que se determinaron las longitudes de cada cañería en ft y las horas de operación corresponden al ciclo completo de 28,5 días de producción continua que se estableció para el RA-10, lo cual equivale a 684 hs por ciclo.

A continuación, se muestra el análisis realizado para cañerías internas del sistema, con el fin de demostrar el procedimiento de cálculo. Luego, lo mismo se realizó para cañerías externas y cañerías de flushing.

TAG	1010-400-AR-B-030, 1010-400-AR-B-031
COMPONENTE	Cañería interna a la PRE
DESCRIPCION Y FUNCION	La cañería interna a la PRE es la que conduce a todo el caudal refrigerante desde la parte superior de la PRE, hasta el plenum inferior, el mismo pasa por el núcleo y sale por un lateral de la chimenea hacia fuera de la PRE.
MODO DE FALLA	ELS
PROBLABLES CAUSAS DE LA FALLA	Desgaste por corrosión. Sismo: tensión axial, pandeo local, pandeo tipo columna. Incendio: distorsión térmica, inicio de creep, oxidación rápida.
METODO DE DETECCION	Inspección visual. Disminución en el caudal que pasa por la cañería.

³Según NUREG-CR-6928. Industry Avg for Components and EI for US Commercial NPP.

HORAS POR CICLO	684
LONGITUD DE LA CAÑERÍA (ft)	48,87
TASA DE FALLAS : $\lambda(1/hs)$	7,0E-10
ONFIABILIDAD R(t)	$R(t) = e^{-\lambda t_m}$
INCONFIABILIDAD Q(t)	$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t_m}$

Tabla 4: AMFE PRI. Componente cañería interna.

$$R(t) = e^{-\lambda t_m}$$

$$R(t = 684 \text{ hs}) = e^{-7,0E-10 \left(\frac{1}{hs \cdot ft} \right) * 48,87 \text{ ft} * 684 \text{ hs}}$$

$$R(t = 684 \text{ hs}) = 0,99997660$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t_m} \quad \text{ó} \quad Q(t) = 1 - R(t)$$

$$Q(t) = 2,34E - 05$$

Entonces, la probabilidad de falla ELS de las cañerías internases 2,34E-05.

10.1.2 Bombas del PRI

Las bombas del sistema PRI son tres, de las cuales dos están activas trabajando al 50% de su capacidad, y una está en stand-by. Para el análisis se tomó una sola bomba al 100%, debido a que como se trata de un análisis probabilista, no se requiere la diferenciación, sino cuanto aportan al sistema. Los posibles modos de fallas son ELS (fugas externas pequeñas) que contemplan de 0,3 a 13,6 m³/hs, FTR (fallas en funcionamiento) y SO (falla por señal espuria al SCMR), si bien existen otros posibles modos de falla, los mismos no se tuvieron en cuenta debido a que no son representativos para el análisis. Las horas de operación corresponden al ciclo completo de 28,5 días de producción continua que se estableció para el RA-10, lo cual equivale a 684 hs por ciclo.

TAG	1010-AB-001A, 1010-AB-001B
COMPONENTE	Bomba

DESCRIPCION Y FUNCION	Impulsa el refrigerante al intercambiador de calor de la línea correspondiente.
MODO DE FALLA	FTR
PROBLABLES CAUSAS DE LA FALLA	Falla interruptor o señal eléctrica.
METODO DE DETECCION	Tablero de control.
HORAS POR CICLO	684
TASA DE FALLAS : $\lambda(1/hs)$	5,0E-06
CONFIABILIDAD R(t)	$R(t) = e^{-\lambda t_m}$
INCONFIABILIDAD Q(t)	$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t_m}$

Tabla 5: AMFE PRI. Componente bomba.

$$R(t) = e^{-\lambda t_m}$$

$$R(t = 684 \text{ hs}) = e^{-5,0E-6 \left(\frac{1}{hs}\right) * 684 \text{ hs}}$$

$$R(t = 684 \text{ hs}) = 0,996585842$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t_m} \quad \text{ó} \quad Q(t) = 1 - R(t)$$

$$Q(t) = 3,41E - 03$$

Entonces, la probabilidad de falla de la bomba, por falla en señal eléctrica es 3,41E-03.

10.1.3 Válvula neumática de control de caudal

Para la válvula de control de caudal de interconexión o taponamiento, los posibles modos de fallas son ELS (fugas externas pequeñas) que contemplan de 0,3 a 13,6 m³/hs, SO (señal de control espuria) y FC (falla en sistema de control), si bien existen otros posibles modos de falla, los mismos no se tuvieron en cuenta debido a que no son representativos para el análisis. A continuación, se calcula la confiabilidad para el caso de falla por SO. La tasa de fallas λ para SO, tiene unidades de 1/hs. Las horas de operación corresponden al ciclo completo de 28,5

días de producción continua que se estableció para el RA-10, lo cual equivale a 684 hs por ciclo.

TAG	1010-HV-1048.00
COMPONENTE	Válvula neumática de control de caudal
DESCRIPCION Y FUNCION	Regula el caudal de interconexión, en un circuito de control abierto; posee un interruptor limitante mecánico y variable para su apertura.
MODO DE FALLA	SO
PROBLABLES CAUSAS DE LA FALLA	Señal de control espuria
METODO DE DETECCION	Tablero de control.
HORAS POR CICLO	684
TASA DE FALLAS : $\lambda(1/hs)$	4,0E-08
CONFIABILIDAD R(t)	$R(t) = e^{-\lambda t_m}$
INCONFIABILIDAD Q(t)	$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t_m}$

Tabla 6: AMFE PRI. Componente válvula neumática de control de caudal.

$$R(t) = e^{-\lambda t_m}$$

$$R(t = 684 \text{ hs}) = e^{-4,0E-8 \left(\frac{1}{hs}\right) * 684 \text{ hs}}$$

$$R(t = 684 \text{ hs}) = 0,99997264$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t_m} \quad \text{ó} \quad Q(t) = 1 - R(t)$$

$$Q(t) = 2,74E - 05$$

Entonces, la probabilidad de falla de la válvula 1010-HV-1048.00 por señal espuria es 2,74E-05.

10.1.4 Intercambiador de calor

Para los intercambiadores de calor, los posibles modos de fallas son ELS (fugas externas pequeñas) que contemplan de 0,3 a 13,6 m³/hs, y PG (falla por obstrucción en el tapón), si bien existen otros posibles modos de falla, los mismos

no se tuvieron en cuenta debido a que no son representativos para el análisis. A continuación, se calculó la confiabilidad para el caso de falla por PG. La tasa de fallas λ para PG, tiene unidades de 1/hs. Las horas de operación corresponden al ciclo completo de 28,5 días de producción continua que se estableció para el RA-10, lo cual equivale a 684 hs por ciclo.

TAG	1010-BI-001A, 1010-BI-001B, 1010-BI-001C (Stand-by)
COMPONENTE	Intercambiador de calor
DESCRIPCION Y FUNCION	Reciben el agua impulsada por las bombas principales del PRI, y enfrían el refrigerante, transfiriendo el calor al sistema SEC.
MODO DE FALLA	PG
PROBLABLES CAUSAS DE LA FALLA	Falla por obstrucción en el tapón.
METODO DE DETECCION	Tablero de control.
HORAS POR CICLO	684
TASA DE FALLAS : $\lambda(1/hs)$	6,0E-07
CONFIABILIDAD R(t)	$R(t) = e^{-\lambda t_m}$
INCONFIABILIDAD Q(t)	$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t_m}$

Tabla 7: AMFE PRI. Componente válvula neumática de control de caudal.

$$R(t) = e^{-\lambda t_m}$$

$$R(t = 684 \text{ hs}) = e^{-6,0E-7 \left(\frac{1}{hs}\right) * 684 \text{ hs}}$$

$$R(t = 684 \text{ hs}) = 0,999589684$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t_m} \quad \text{Ó} \quad Q(t) = 1 - R(t)$$

$$Q(t) = 4,10E - 04$$

Entonces, la probabilidad de falla del intercambiador de calor por obstrucción en el tapón es $4,10\text{E}-04$.

10.2 Árbol de fallas del sistema PRI

Para la realización del Árbol de fallas se consideró como Evento Principal, denominado *Evento Tope “No se refrigera el núcleo”*. Luego se analizaron las posibles causas, y como resultado se obtuvieron tres eventos intermedios, que terminan en eventos básicos.

Se determinaron tres eventos principales, potenciales causantes de la pérdida de refrigeración del núcleo.

- E1: Pérdida de caudal
- E2: Pérdida de inventario
- E3: Pérdida de intercambiador de calor

A continuación, se muestra el resultado de la confección del árbol de fallas para el sistema PRI, y luego se desarrollarán cada uno de los eventos considerados en el mismo.

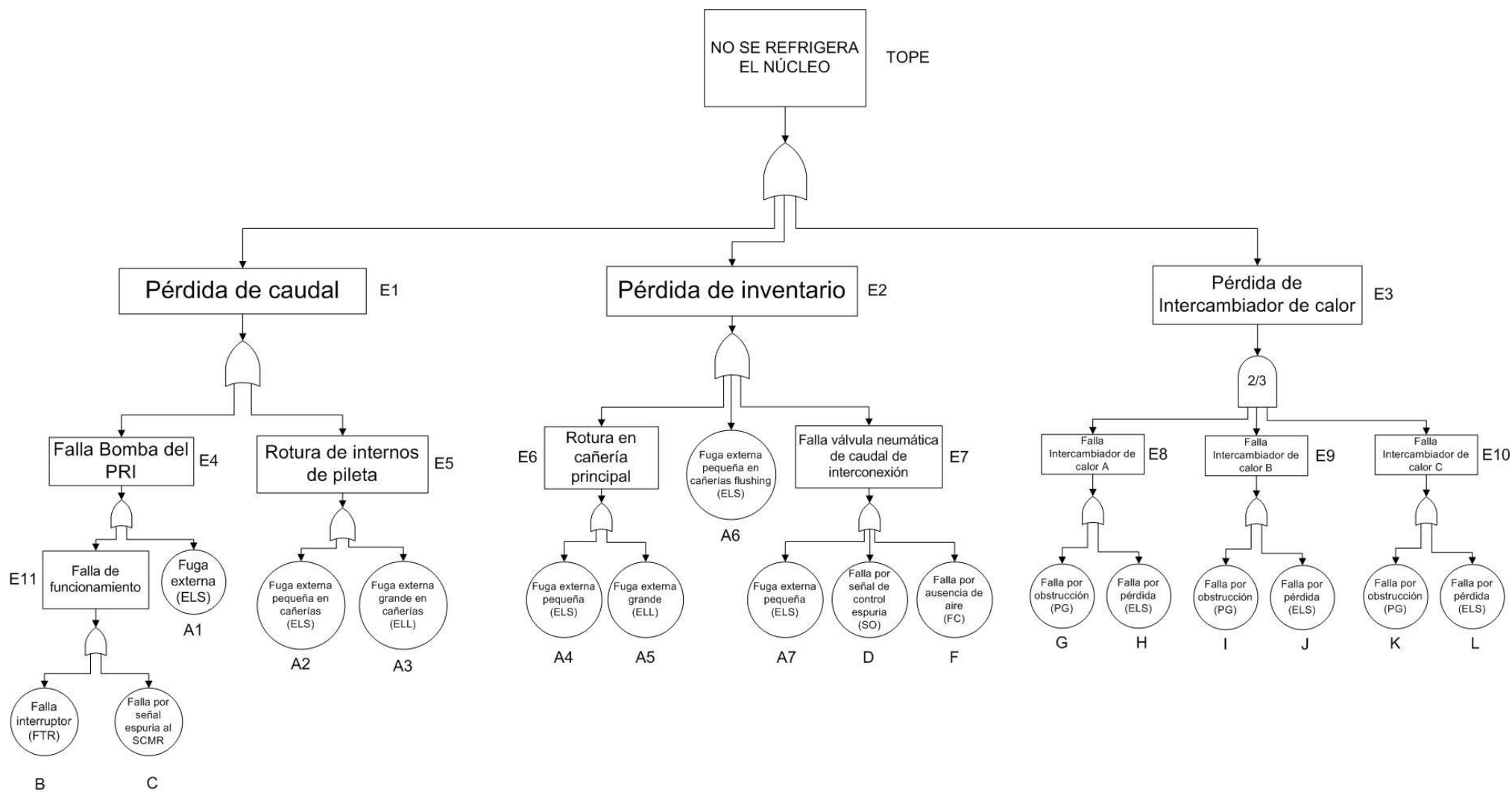


Figura 6: Árbol de fallas del PRI.

E1: Pérdida de caudal

La pérdida de caudal puede ser generada, por un lado, por falla en alguna de las dos bombas principales del sistema (E4 ó E5), recordemos que el mismo funciona con lógica 2/3 para las bombas, si una de las mismas falla, el sistema deja de trabajar en convección forzada, debido a que ésta lógica está asociada a la lógica de seguridad, y el reactor, mediante el sistema de protección, se lleva a parada segura ante una falla de este tipo; por otro lado, se postula la falla por rotura de internos de pileta (E6). Cada uno de estos eventos, está causado por otros eventos básicos como puede observarse en la Figura 7.

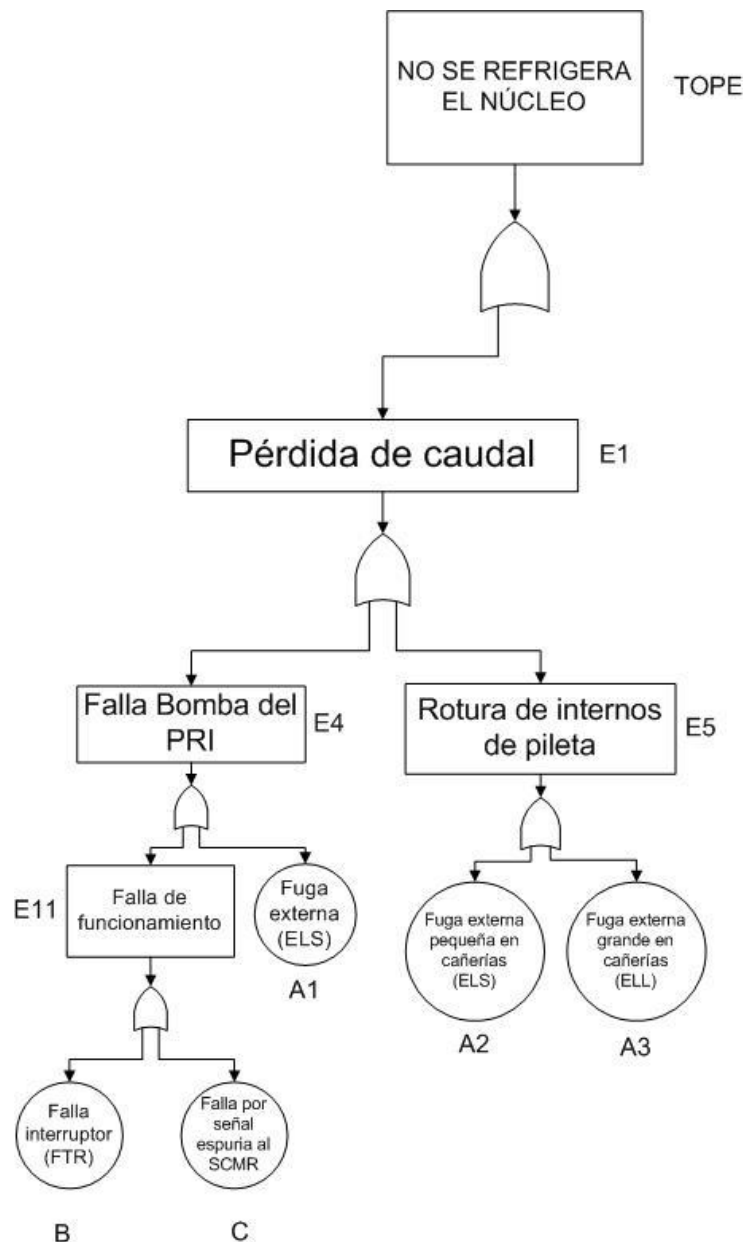


Figura 6: Rama del árbol correspondiente al evento E1.

Según el álgebra booleana los eventos se definen de acuerdo a las puertas lógicas que los relacionan.

$$E1 = E4 + E5$$

$$E4 = A1 + B + C$$

$$E5 = A2 + A3$$

$$E1 = A1 + B + C + A2 + A3$$

$$E1 = \{A1, A2, A3, B, C\}$$

A1, A2, A3, B y C son conjuntos mínimos de corte para el evento E1. Esto permite obtener las probabilidades de ocurrencia de los distintos eventos, de acuerdo al análisis realizado en el AMFE.

E2: Pérdida de inventario

Se postula la falla de pérdida de inventario (E2). Esto puede ocurrir por rotura de cañería principal (E6), o por fuga externa en cañería flushing (A6) o por falla de la válvula neumática del caudal de interconexión (E7); a su vez cada uno de estos eventos intermediarios, están ligados a otras causas, como puede observarse en la Figura 8.

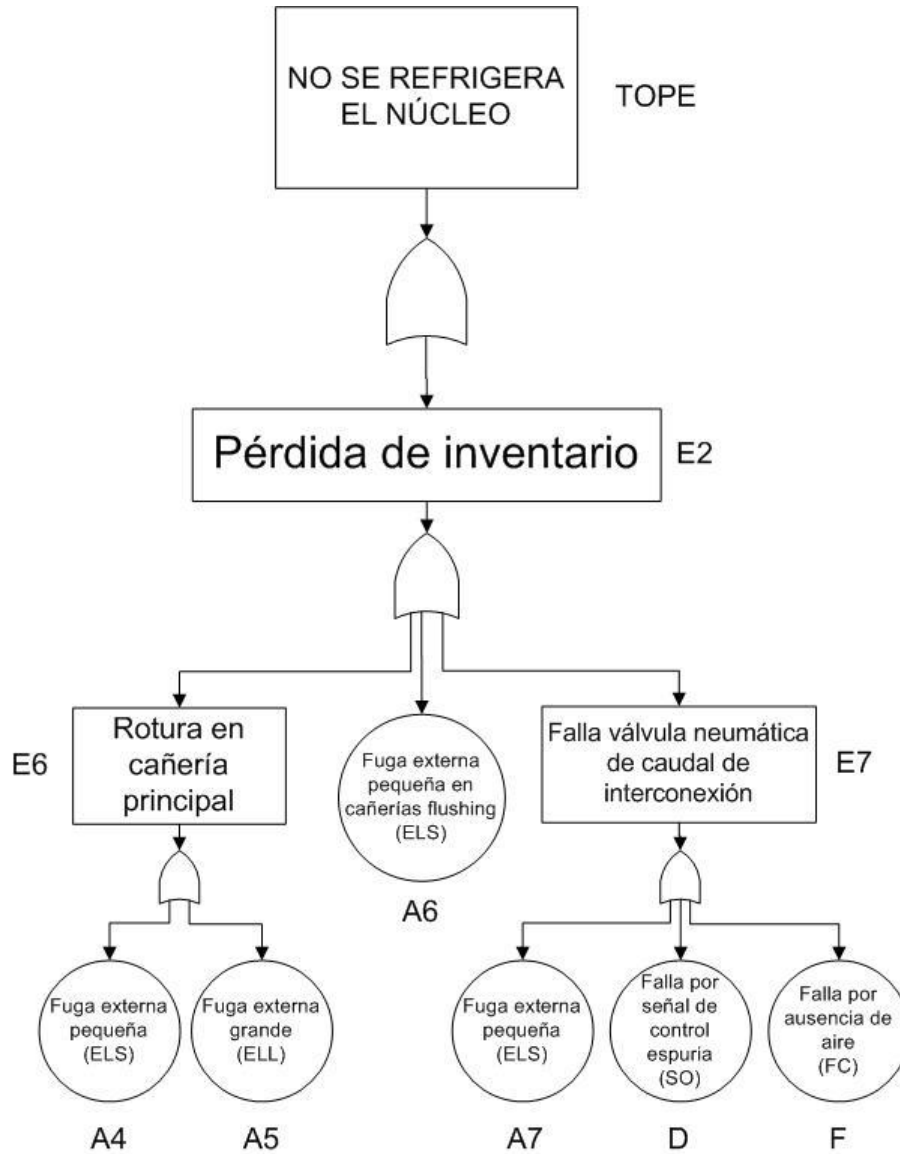


Figura 7: Rama del árbol correspondiente al evento E1.

Según el álgebra booleana los eventos se definen de acuerdo a las puertas lógicas que los relacionan.

$$E2 = E6 + A6 + E7$$

$$E6 = A4 + A5$$

$$E7 = A7 + D + F$$

Reemplazando E6 y E7 en E2, nos queda:

$$E2 = A4 + A5 + A6 + A7 + D + F$$

$$E2 = \{A4, A5, A6, A7, D, F\}$$

A4, A5, A6, A7, D y F son *conjuntos mínimos de corte* para el evento E1. Los datos de las probabilidades se obtuvieron del AMFE, correspondiente a la última columna de la Tabla 2, apartado [9.1].

E3: Pérdida de intercambiador de calor

Se postula la falla de Pérdida de Intercambiador de calor (E3). Los mismos tienen una redundancia 2/3, lo cual significa que dos de los tres eventos de la compuerta deben cumplirse para que ocurra E3.

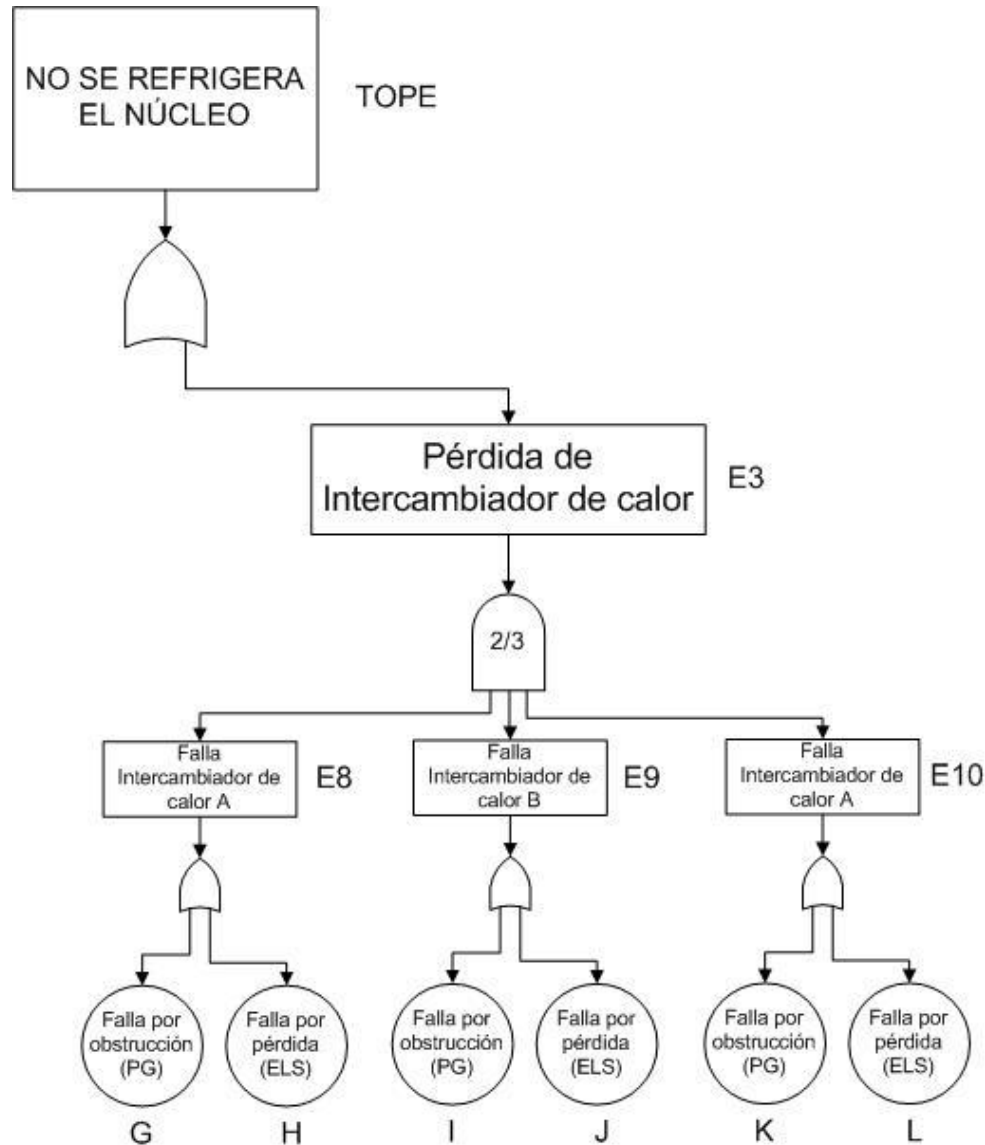


Figura 8: Rama del árbol correspondiente al evento E3.

Según el álgebra booleana los eventos se definen de acuerdo a las puertas lógicas que los relacionan.

$$E3 = E8 * E9 * E10$$

$$E8 = G + H$$

$$E9 = I + J$$

$$E10 = K + L$$

Reemplazando E8, E9 y E10 en E3, nos queda:

$$E3 = (G + H) * (I + J) * (K + L)$$

$$E2 = (GI) + (GJ) + (HI) + (HJ) + (GK) + (GL) + (HK) + (HL) + (IK) + (IL) + (JK) + (JL)$$

$$E1 = \{GI, GJ, HI, HJ, GK, GL, HK, HL, IK, IL, JK, JL\}$$

GI, GJ, HI, HJ, GK, GL, HK, HL, IK, IL, JK, JL son doce conjuntos mínimos de corte de dos elementos cada uno, para el evento E3. Los datos de las probabilidades se obtuvieron del AMFE, correspondiente a la última columna de la Tabla 3, apartado [10.1].

10.3 AMFE para el sistema SEC

Para la confección del AMFE, se analizaron todos los componentes que forman el sistema, teniendo en cuenta las condiciones iniciales descritas en el apartado [4]; a cada uno de los componentes analizados se les describió su función, su modo de falla, las probables causas de la misma, la tasa de fallas, la Confiabilidad e Inconfiabilidad, de acuerdo a lo descrito en el apartado [8.1].

En la Tabla 8, se pueden observar los resultados obtenidos.

TAG	COMPONENTES	DESCRIPCIÓN y FUNCIÓN	MODO DE FALLA	PROBABLES CAUSAS DE LA FALLA	METODO DE DETECCIÓN	HORAS POR CICLO	LONGITUD DE LA CAÑERÍA (ft)	TASA DE FALLAS (1/hs)	CONFIABILIDAD R(t)	INCONFIABILIDAD Q(t) = 1 - R(t)	NOMBRE DEL EVENTO PARA Adf
2120-AS-001A; 2120-AS-001B, 2120-AS-001C, 2120-AS-001D, 2120-AS-001E (Stand-by)	Torre de enfriamiento	Es de flujo contracorriente y tiro inducido, compuesta por cinco celdas idénticas, cuatro de las cuales están operativas y la	FTR	Falla interruptor o señal de control.	Tablero de control	684	-	6,0E-06	0,99590441	4,10E-03	U, X, A1, D1, H1
			FTR	Falla motor del ventilador	Tablero de control	684	-	6,0E-07	0,99589684	4,10E-04	V, Y, B1, F1, I1
			SO	Falla señal espuria al SCMR	Tablero de control	684	-	1,0E-06	0,999316234	6,84E-04	T, W, Z, C1, G1
650-AT-C-009, 700-AT-C-001/008, 600-AT-C-005/004, 450-AT-C-017/016/015/014, 40-AT-C-032/031/045/083, 200-AT-C-036/035/063/066/064/067, 400-AT-C-025/026/027/028, 65-AT-C-010/011, 250-AT-C-088/069/052/061, 150-AT-C-018/19/20/21, 80-AT-C-073/074/075/076, 100-AT-C-077	Cañería	La cañería interna a la PRE es la que conduce a todo el cuadal refrigerante desde la parte superior de la PRE, hasta el plenum inferior, el mismo pasa por el núcleo y sale por un lateral de la chimenea hacia fuera de la PRE.	ELL	Desgaste por corrosión. <i>Sismo</i> : tensión axial, pandeo local, pandeo tipo columna. <i>Incendio</i> : distorsión térmica, inicio de creep, oxidación rápida.	Inspección. Disminución en el caudal que pasa por la cañería.	684	1894,53	2,8E-07	0,99980564	1,94E-04	S
			ELS			684		1,3E-06	0,999093311	9,07E-04	R
2110-AB-001A, 2110-AB-001B	Bomba	Toma agua desde la pileta de la torre a razón de 4430 m3/h y conduce por medio de una cañería principal DN 700 a intercambiadores de calor.	FTR	Falla interruptor o señal eléctrica	Tablero de control	684	-	5,0E-06	0,996585842	3,41E-03	I, L
			SO	Falla señal espuria al SCMR	Tablero de control	684	-	1,0E-06	0,999316234	6,84E-04	J, M
			ELS	Desgaste por corrosión. <i>Sismo</i> : tensión axial, pandeo local, pandeo tipo columna. <i>Incendio</i> : distorsión térmica, inicio de creep, oxidación rápida.	Inspección. Disminución en el caudal que pasa por la cañería.	684	-	1,2E-07	0,999917923	8,21E-05	H, K
2110-AB-001C (Stand-by)	Bomba	Toma agua desde la pileta de la torre a razón de 4430 m3/h y conduce por medio de una cañería principal DN 700 a intercambiadores de calor.	FTR	Falla interruptor o señal eléctrica	Tablero de control	684	-	5,0E-06	0,996585842	3,41E-03	Q
			FTS	Falla al ser encendida	Tablero de control	684	-	4,0E-03	0,064829146	9,35E-01	P
			SO	Falla señal espuria al SCMR	Tablero de control	684	-	1,0E-06	0,999316234	6,84E-04	O
			ELS	Desgaste por corrosión. <i>Sismo</i> : tensión axial, pandeo local, pandeo tipo columna. <i>Incendio</i> : distorsión térmica, inicio de creep, oxidación rápida.	Inspección. Disminución en el caudal que pasa por la cañería.	684	-	1,2E-07	0,999917923	8,21E-05	N
1010-BI-001A; 1010-BI-001B, 1010-BI-001C (Stand-by)	Intercambiador de calor	Reciben el agua impulsada por las bombas principales del SEC, y enfrían el refrigerante que circula por el lado del PRI. Luego devuelven el agua a las torres de enfriamiento.	ELS	Desgaste por corrosión. <i>Sismo</i> : tensión axial, pandeo local, pandeo tipo columna. <i>Incendio</i> : distorsión térmica, inicio de creep, oxidación rápida.	Inspección. Disminución en el caudal que pasa por la cañería.	684	-	1,5E-08	0,99998974	1,03E-05	B, D, G
			PG	Falla por obstrucción en tapón.	Disminución de caudal.	684	-	6,0E-07	0,99589684	4,10E-04	A, C, F

Tabla 8: AMFE del Sistema SEC

Para el caso de cañerías, intercambiadores de calor y bombas, se realizó el mismo análisis que en el sistema PRI, por lo que resta analizar a las torres de enfriamiento.

10.3.1 Torre de enfriamiento

Para la torre de enfriamiento, los posibles modos de fallas son FTR (falla del motor de ventilación), FTR (falla del interruptor o señal eléctrica), y SO (falla por señal espuria del SCMR). A continuación, se calcula la confiabilidad para el caso de falla por FTR. La tasa de fallas λ para, tiene unidades de 1/hs. Las horas de operación corresponden al ciclo completo de 28,5 días de producción continua que se estableció para el RA-10, que son 684 hs por ciclo.

TAG	2120-AS-001A; 2120-AS-001B, 2120-AS-001C, 2120-AS-001D, 2120-AS-001E (Stand-by)
COMPONENTE	Torre de enfriamiento
DESCRIPCION Y FUNCION	Es de flujo contracorriente y tiro inducido, compuesta por cinco celdas idénticas, cuatro de las cuales están operativas y la restante en stand-by.
MODO DE FALLA	FTR
PROBLABLES CAUSAS DE LA FALLA	Falla motor del ventilador
METODO DE DETECCION	Tablero de control.
HORAS POR CICLO	684
TASA DE FALLAS : $\lambda(1/hs)$	6,0E-07
CONFIABILIDAD R(t)	$R(t) = e^{-\lambda t_m}$
INCONFIABILIDAD Q(t)	$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t_m}$

Tabla 9: AMFE PRI. Componente torre de enfriamiento.

$$R(t) = e^{-\lambda t_m}$$

$$R(t = 684 \text{ hs}) = e^{-6,0E-7 \left(\frac{1}{hs}\right) * 684 \text{ hs}}$$

$$R(t = 684 \text{ hs}) = 0,999589684$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t_m} \quad \text{Ó} \quad Q(t) = 1 - R(t)$$

$$Q(t) = 4,10E - 04$$

Entonces, la probabilidad de falla de la torre de enfriamiento por falla del motor del ventilador $4,10E-04$.

10.4 Árbol de fallas del sistema SEC

Para la realización del Árbol de fallas se consideró como Evento Principal, denominado *Evento Tope "Pérdida de sumidero de calor"*. Luego se analizaron las posibles causas, y como resultado se obtuvieron cuatro eventos intermedios, que terminan en eventos básicos.

Se determinaron tres eventos principales, potenciales causantes de la pérdida de refrigeración del núcleo.

- E1: Pérdida de intercambiador de calor
- E2: Pérdida de caudal
- E3: Pérdida de una celda en la torre de enfriamiento (TORREN)

A continuación, se muestra el resultado de la confección del árbol de fallas para el sistema PRI, y luego se desarrollarán cada uno de los eventos considerados en el mismo.

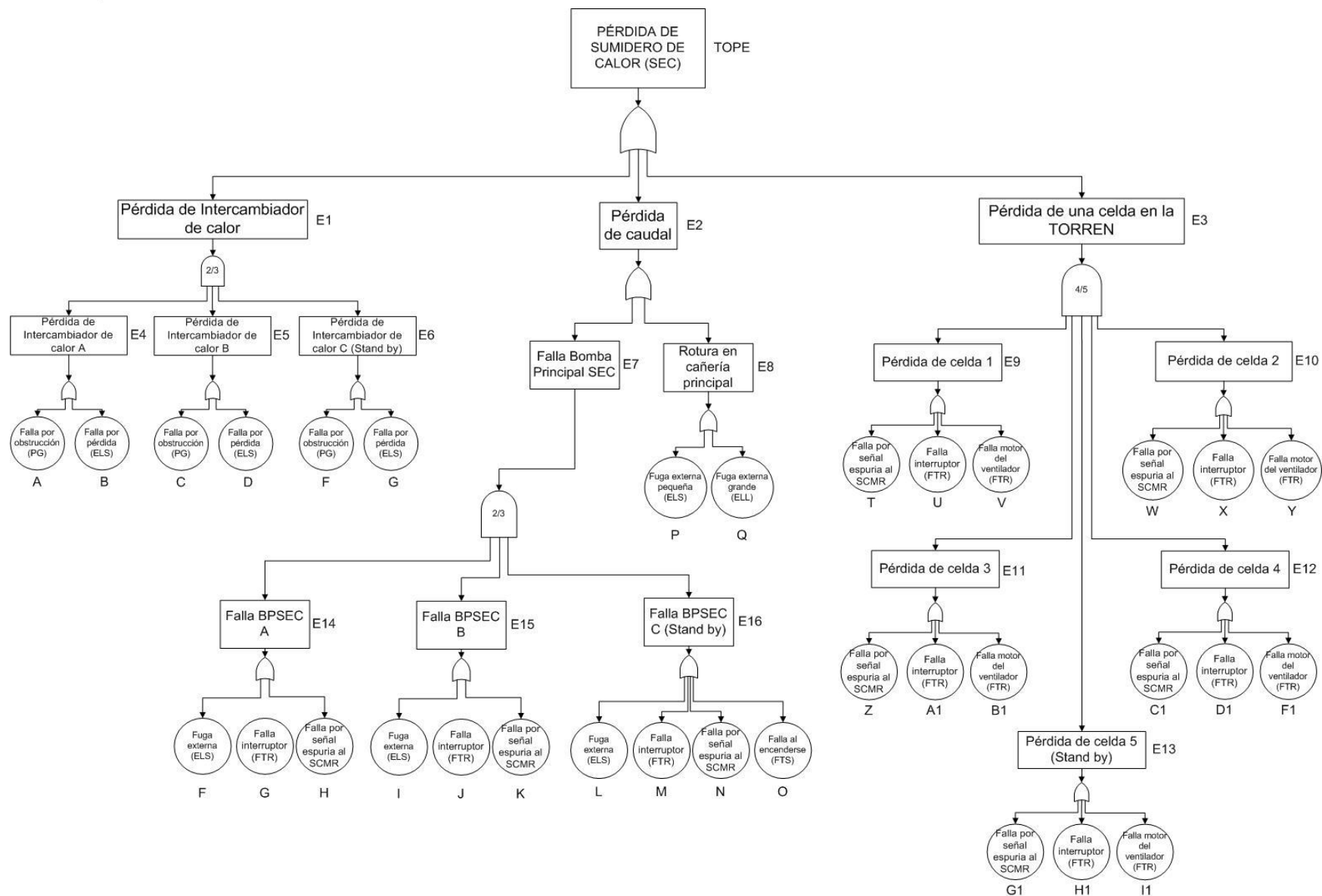


Figura 9:Árbol de fallas del PRI.

E1: Pérdida del Intercambiador de calor

Se postula la falla en operación por obstrucción (PG) y por fuga externa pequeña (ELS). Este evento intermedio puede observarse en la Figura 11. Los intercambiadores de calor tienen una redundancia 2/3, lo cual significa que dos de los tres eventos de la compuerta deben cumplirse para que ocurra E1.

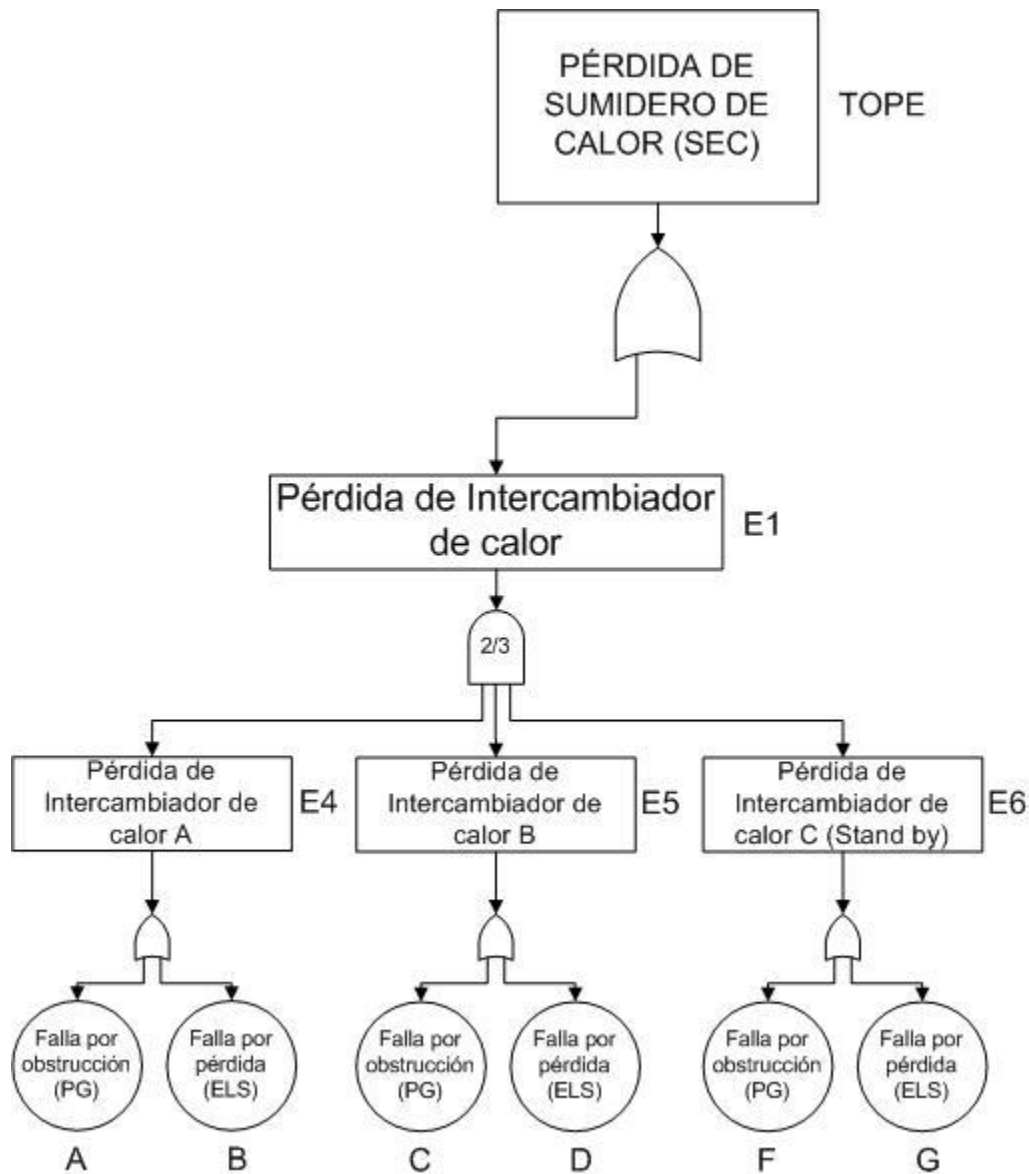


Figura 10: Rama del árbol correspondiente al evento E1.

$$E1 = E4 * E5 * E6$$

$$E4 = A + B$$

$$E5 = C + D$$

$$E6 = F + G$$

Reemplazando E4, E5 y E6 en E1, nos queda:

$$E1 = (A + B) * (C + D) * (F + G)$$

$$E2 = (AC) + (AD) + (BC) + (BD) + (AF) + (AG) + (BF) + (BG) + (CF) + (CG) + (DF) + (DG)$$

$$E1 = \{AC, AD, BC, BD, AF, AG, BF, BG, CF, CG, DF, DG\}$$

GI, GJ, HI, HJ, GK, GL, HK, HL, IK, IL, JK, JL son doce conjuntos mínimos de corte de dos elementos cada uno, para el evento E1. Los datos de las probabilidades se obtuvieron del AMFE, correspondiente a la última columna de la Tabla 3, apartado [9.3].

E2: Pérdida de caudal

Se postula la falla de pérdida de inventario (E2). Esto puede ocurrir por falla en bomba principal del SEC (E7), o por rotura en cañería principal (E8); a su vez cada uno de estos eventos intermediarios, están ligados a otras causas, como puede observarse en la Figura 12.

$$E2 = E7 + E8$$

$$E7 = (E14 * E15) + (E14 * E16) + (E15 * E16)$$

$$E8 = R + S$$

$$E14 = H + I + J$$

$$E15 = K + L + M$$

$$E16 = N + O + P + Q$$

Reemplazando E14, E15 y E16 en E7, nos queda:

$$E7 = [(H + I + J) * (C + D)] * [(H + I + J) * (N + O + P + Q)] * [(K + L + M) * (N + O + P + Q)]$$

$$E7 = (HK) + (HL) + (HM) + (IK) + (IL) + (IM) + (JK) + (JL) + (JM) + (HN) + (HO) + (HP) + (HQ) + (IN) + (IO) + (IP) + (IQ) + (JN) + (JO) + (JP) + (JQ) + (KN) + (KO) + (KP) + (KQ) + (LN) + (LO) + (LP) + (LQ) + (MN) + (MO) + (MP) + (MQ)$$

$$E2 = (HK) + (HL) + (HM) + (IK) + (IL) + (IM) + (JK) + (JL) + (JM) + (HN) + (HO) + (HP) + (HQ) + (IN) + (IO) + (IP) + (IQ) + (JN) + (JO) + (JP) + (JQ) + (KN) + (KO) + (KP) + (KQ) + (LN) + (LO) + (LP) + (LQ) + (MN) + (MO) + (MP) + (MQ) + R + S$$

$$E2 = \{HK, HL, HM, IK, IL, IM, JK, JL, JM, HN, HO, HP, HQ, IN, IO, IP, IQ, JN, JO, JP, JQ, KN, KO, KP, KQ, LN, LO, LP, LQ, MN, MO, MP, MQ, R, S\}$$

Son 35 conjuntos mínimos de corte de dos elementos cada uno, para el evento E2. Los datos de las probabilidades se obtuvieron del AMFE, correspondiente a la última columna de la Tabla 3, apartado [9.3].

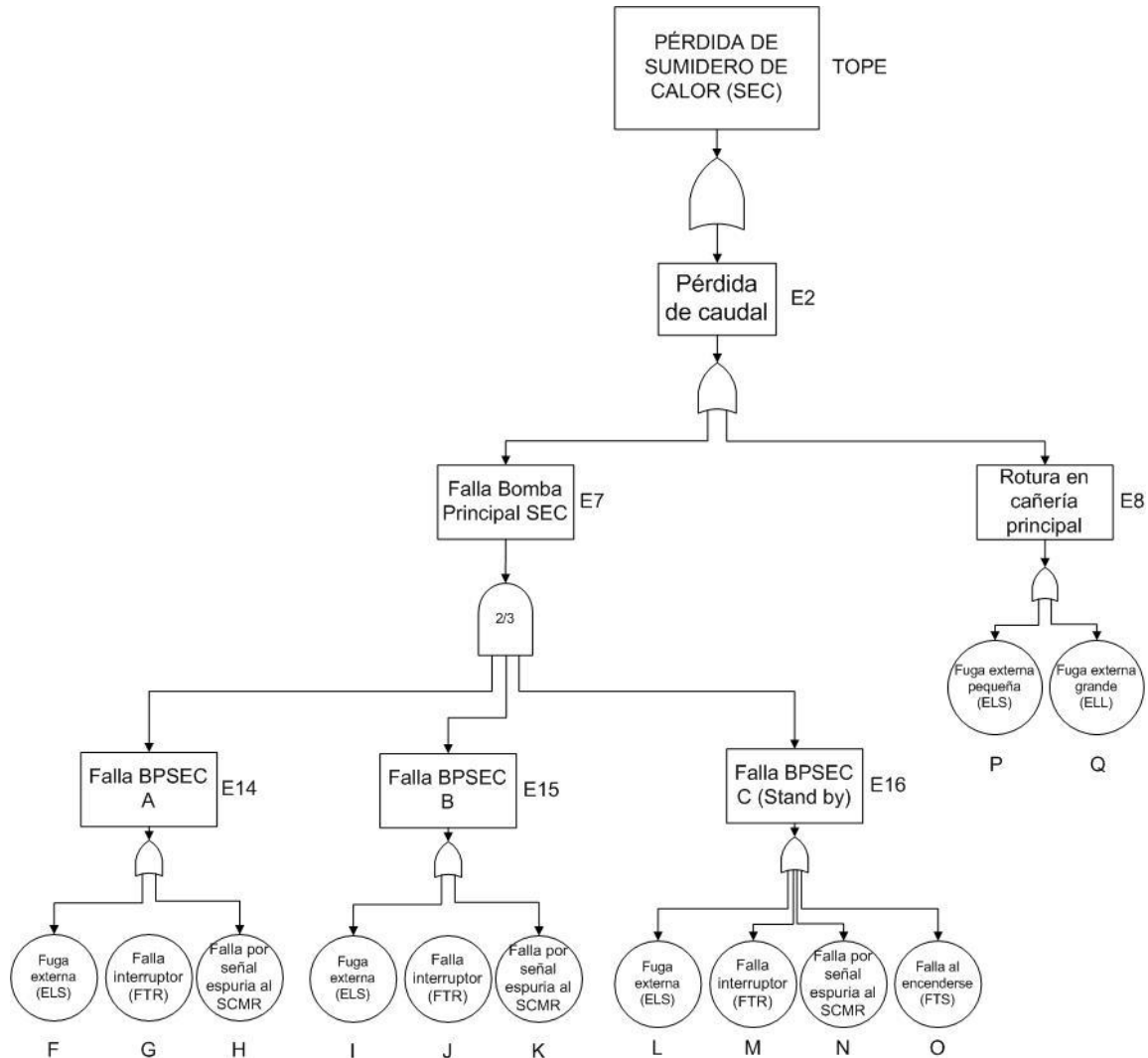


Figura 11: Rama del árbol correspondiente al evento E2.

E3: Pérdida de una celda en la torre de enfriamiento (TORREN)

Se postula la falla de pérdida de una celda en la torre de enfriamiento (E3). Los mismos tienen una redundancia 4/5, lo cual significa que cuatro de los cinco eventos de la compuerta deben cumplirse para que ocurra E3. A su vez cada uno de estos eventos intermedios, están ligados a otras causas, como puede observarse en la Figura 13.

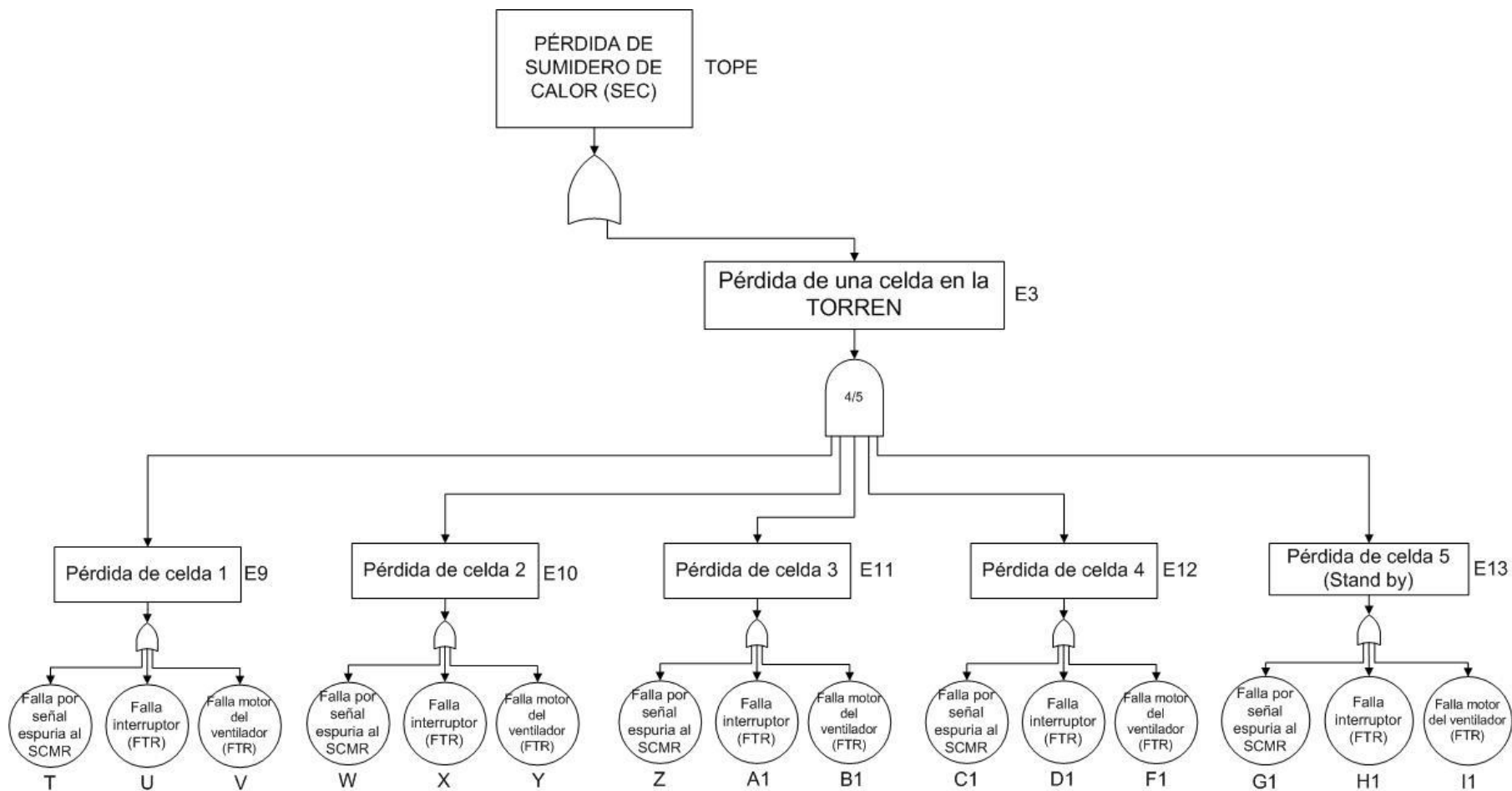


Figura 12: Rama del árbol correspondiente al evento E3.

De esta compuerta se derivan 135 conjuntos mínimos de corte que surgen de la combinación de los distintos eventos intermediarios y eventos básicos, como resulta engorroso realizar el desarrollo, se trabajó con una planilla de Excel que resuelve la relación de las diferentes variantes y arroja el resultado de la probabilidad de ocurrencia de los eventos E9, E10, E11, E12 y E13; consecuentemente se obtuvieron los resultados de la probabilidad de ocurrencia del evento E3. Los mismos serán expuestos en la sección [10].

11. RESULTADOS

11.1 Resultados del análisis del Sistema PRI

A continuación, se muestran los eventos básicos del árbol de fallas del sistema PRI, con cada una de las probabilidades de ocurrencia de cada evento. De acuerdo a la resolución del árbol, los mismos se relacionan de manera de obtener los conjuntos mínimos de corte para cada rama.

EVENTO	PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DEL EVENTO (1 ciclo)	PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DEL EVENTO (6 ciclos)	PROBABLES CAUSAS DE LA FALLA	MODO DE FALLA	COMPONENTE
A1	8,21E-05	4,92E-04	Fuga externa pequeña	ELS	bomba
A2	2,34E-05	1,40E-04	Fuga externa pequeña	ELS	cañería interna a la PRE
A3	5,01E-06	3,01E-05	Fuga externa grande	ELL	cañería interna a la PRE
A4	1,64E-04	9,83E-04	Fuga externa pequeña	ELS	cañería externa a la PRE (principal)
A5	3,51E-05	2,11E-04	Fuga externa grande	ELL	cañería externa a la PRE (principal)
A6	2,45E-05	1,47E-04	Fuga externa pequeña	ELS	cañería flushing
A7	1,03E-05	6,16E-05	Fuga externa pequeña	ELS	valvula neumatica
B	3,41E-03	2,03E-02	Falla interruptor	FTR	bomba
C	6,84E-04	4,10E-03	Señal espuria del SCMR	SO	bomba
D	2,74E-05	1,64E-04	Señal espuria del SCMR	SO	valvula neumatica
F	2,05E-03	1,22E-02	Falla por ausencia de aire	FC	valvula neumatica
G	4,10E-04	2,46E-03	Obstrucción	PG	intercambiador de calor
H	1,03E-05	6,16E-05	Fuga externa pequeña	ELS	intercambiador de calor
I	4,10E-04	2,46E-03	Obstrucción	PG	intercambiador de calor
J	1,03E-05	6,16E-05	Fuga externa pequeña	ELS	intercambiador de calor
K	4,10E-04	2,46E-03	Obstrucción	PG	intercambiador de calor
L	1,03E-05	6,16E-05	Fuga externa pequeña	ELS	intercambiador de calor

Tabla 10: Eventos del Árbol de fallas del PRI.

Las probabilidades de ocurrencia de los eventos básicos son obtenidas del AMFE realizado para el sistema PRI, y se corresponden con la última columna de la tabla 3. Cada componente, posee un valor de Inconfiabilidad $Q(t)$, y este valor se corresponde con la probabilidad de ocurrencia de la falla de dicho componente.

Luego mediante la resolución del árbol de fallas se obtienen los conjuntos mínimos de corte, que nos permiten obtener el porcentaje de importancia de cada evento en el sistema analizado.

La tabla 10 muestra los resultados obtenidos para el análisis del sistema primario, para ambos tiempos de misión, y como puede observarse, dentro del evento *E1: pérdida de caudal*, se destacan los eventos A1, B y C; dentro del evento *E2: pérdida de inventario*, se destacan los básicos A4 y F; mientras que el evento *E3: pérdida de intercambiador de calor*, no tiene relevancia en la refrigeración del núcleo, que fue denominado evento tope del análisis.

Núm.	Prob. CMC	Acum.	1	2	CMC	PORCENTAJE DE IMPORTANCIA de CMC (1 ciclo)	PORCENTAJE DE IMPORTANCIA de CMC (6 ciclos)	Eventos por cada rama
1	8,21E-05	8,21E-05	8,21E-05		A1	1,26%	1,73%	E1
2	3,41E-03	3,50E-03	3,41E-03		B	52,37%	71,22%	
3	6,84E-04	4,18E-03	6,84E-04		C	10,49%	14,36%	
4	2,34E-05	4,20E-03	2,34E-05		A2	0,36%	0,49%	
5	5,01E-06	4,21E-03	5,01E-06		A3	0,08%	0,11%	
6	1,64E-04	4,37E-03	1,64E-04		A4	2,51%	3,45%	E2
7	3,51E-05	4,40E-03	3,51E-05		A5	0,54%	0,12%	
8	2,45E-05	4,43E-03	2,45E-05		A6	0,38%	0,52%	
9	1,03E-05	4,44E-03	1,03E-05		A7	0,16%	0,22%	
10	2,74E-05	4,47E-03	2,74E-05		D	0,42%	0,58%	
11	2,05E-03	6,51E-03	2,05E-03		F	31,44%	7,19%	E3
12	4,21E-09	6,51E-03	4,10E-04	1,03E-05	GH	0,00%	0,00%	
13	4,21E-09	6,51E-03	4,10E-04	1,03E-05	GL	0,00%	0,00%	
14	4,21E-09	6,51E-03	1,03E-05	4,10E-04	HI	0,00%	0,00%	
15	1,05E-10	6,51E-03	1,03E-05	1,03E-05	HJ	0,00%	0,00%	
16	1,68E-07	6,51E-03	4,10E-04	4,10E-04	GK	0,00%	0,02%	
17	4,21E-09	6,51E-03	4,10E-04	1,03E-05	GL	0,00%	0,00%	
18	4,21E-09	6,51E-03	1,03E-05	4,10E-04	HK	0,00%	0,00%	
19	1,05E-10	6,51E-03	1,03E-05	1,03E-05	HL	0,00%	0,00%	
20	1,68E-07	6,51E-03	4,10E-04	4,10E-04	IK	0,00%	0,00%	
21	4,21E-09	6,51E-03	4,10E-04	1,03E-05	IL	0,00%	0,00%	
22	4,21E-09	6,51E-03	1,03E-05	4,10E-04	JK	0,00%	0,00%	
23	1,05E-10	6,51E-03	1,03E-05	1,03E-05	JL	0,00%	0,00%	

Tabla 11: Resultados del análisis del sistema PRI.

A modo de síntesis, se muestra una tabla con los resultados más relevantes en cuanto a porcentaje de importancia. La *pérdida de caudal* se ve principalmente afectada por la falla del interruptor o señal eléctrica de la bomba, o por una señal espuria del SCMR. Por otro lado, la *pérdida de inventario* se ve afectada por la falla de ausencia de aire en la válvula de regulación del caudal de interconexión y en menor medida por una fuga externa pequeña en la cañería principal.

CMC	Probable causa de la falla	PORCENTAJE DE IMPORTANCIA de CMC (1 ciclo)	PORCENTAJE DE IMPORTANCIA de CMC (6 ciclos)	Eventos por cada rama
A1	Fuga externa pequeña en bomba	1,26%	1,73%	E1
B	Falla interruptor	52,37%	71,22%	
C	Señal espuria del SCMR	10,49%	14,36%	
A4	Fuga externa pequeña en cañería principal	2,51%	3,45%	E2
F	Falla por ausencia de aire en válvula neumática de regulación de caudal de interconexión	31,44%	7,19%	

Tabla 12: Síntesis de resultados del análisis del sistema PRI.

A continuación, se muestra el resultado de la confiabilidad del sistema primario, teniendo en cuenta el evento tope planteado.

11.1.1 Confiabilidad para un ciclo de operación

La probabilidad de ocurrencia del evento tope es la Inconfiabilidad del sistema primario para la situación planteada, como los eventos básicos en el desarrollo del árbol de fallas no se repiten, no fue posible aplicar una reducción booleana; entonces la confiabilidad del evento tope es la suma de las probabilidades de ocurrencia de los conjuntos mínimos de corte.

$$Q(TOPE) = Q(E1) + Q(E2) + Q(E3)$$

$$Q(TOPE) = 6,52E - 03$$

La Confiabilidad es entonces:

$$R(t) = 1 - Q(t)$$

$$R(t) = 1 - 6,52E - 03$$

$$R(t) = 0,993480$$

$$R(t) = 99,35\% \quad (\text{Para un ciclo de operación})$$

11.1.2 Confiabilidad para seis ciclos de operación

La Inconfiabilidad para seis ciclos de operación sin tener en cuenta las paradas entre ciclos, es:

$$Q(TOPE) = Q(E1) + Q(E2) + Q(E3)$$

$$Q(TOPE) = 2,85E - 02$$

La Confiabilidad es entonces:

$$R(t) = 1 - Q(t)$$

$$R(t) = 1 - 2,85E - 02$$

$$R(t) = 0,971482$$

$$R(t) = 97,15\% \quad (\text{Para seis ciclos de operación})$$

11.2 Resultados del análisis del Sistema SEC

A continuación, se muestran los eventos básicos del árbol de fallas del sistema SEC, con cada una de las probabilidades de ocurrencia de cada evento. De acuerdo a la resolución del árbol, los mismos se relacionan de manera de obtener los conjuntos mínimos de corte para cada rama.

La probabilidad de ocurrencia del evento tope es la Inconfiabilidad del sistema secundario para la situación planteada, como los eventos básicos en el desarrollo del árbol de fallas no se repiten, no fue posible aplicar una reducción booleana; entonces la confiabilidad del evento tope es la suma de las probabilidades de ocurrencia de los conjuntos mínimos de corte.

$$Q(TOPE) = Q(E1) + Q(E2) + Q(E3)$$

$$Q(TOPE) = 1,19E - 02$$

La Confiabilidad es entonces:

$$R(t) = 1 - Q(t)$$

$$R(t) = 1 - 1,19E - 02$$

$$R(t) = 0,988141$$

$$R(t) = 98,81\% \quad (\text{Para un ciclo de operación})$$

EVENTO	PROBABILIDAD DE FALLA	PROBABLES CAUSAS DE LA FALLA	MODO DE FALLA	COMPONENTE
A	4,10E-04	Obstrucción	PG	Intercambiador de calor
B	1,03E-05	Fuga externa pequeña	ELS	intercambiador de calor
C	4,10E-04	Obstrucción	PG	Intercambiador de calor
D	1,03E-05	Fuga externa pequeña	ELS	intercambiador de calor
F	4,10E-04	Obstrucción	PG	Intercambiador de calor
G	1,03E-05	Fuga externa pequeña	ELS	intercambiador de calor
H	8,21E-05	Fuga externa pequeña	ELS	bomba
I	3,41E-03	Falla interruptor o señal eléctrica	FTR	bomba
J	6,84E-04	Señal espuria al SCMR	SO	bomba
K	8,21E-05	Fuga externa pequeña	ELS	bomba
L	3,41E-03	Falla interruptor o señal eléctrica	FTR	bomba
M	6,84E-04	Señal espuria al SCMR	SO	bomba
N	8,21E-05	Fuga externa pequeña	ELS	bomba stand by
O	6,84E-04	Falla interruptor o señal eléctrica	FTR	bomba stand by
P	9,35E-01	Señal espuria al SCMR	SO	bomba stand by
Q	3,41E-03	Falla al encenderse	FTS	bomba stand by
R	9,07E-04	Fuga externa pequeña	ELS	cañería principal
S	1,94E-04	Fuga externa grande	ELL	cañería principal
T	6,84E-04	Señal espuria al SCMR	SO	torre de enfriamiento
U	4,10E-03	Falla interruptor o señal eléctrica	FTR	torre de enfriamiento
V	4,10E-04	Falla motor de ventilador	FTR	torre de enfriamiento
W	6,84E-04	Señal espuria al SCMR	SO	torre de enfriamiento
X	4,10E-03	Falla interruptor o señal eléctrica	FTR	torre de enfriamiento
Y	4,10E-04	Falla motor de ventilador	FTR	torre de enfriamiento
Z	6,84E-04	Señal espuria al SCMR	SO	torre de enfriamiento
A1	4,10E-03	Falla interruptor o señal eléctrica	FTR	torre de enfriamiento
B1	4,10E-04	Falla motor de ventilador	FTR	torre de enfriamiento
C1	6,84E-04	Señal espuria al SCMR	SO	torre de enfriamiento
D1	4,10E-03	Falla interruptor o señal eléctrica	FTR	torre de enfriamiento
F1	4,10E-04	Falla motor de ventilador	FTR	torre de enfriamiento
G1	6,84E-04	Señal espuria al SCMR	SO	torre de enfriamiento
H1	4,10E-03	Falla interruptor o señal eléctrica	FTR	torre de enfriamiento
I1	4,10E-04	Falla motor de ventilador	FTR	torre de enfriamiento

Tabla 13: Eventos del Árbol de fallas del SEC.

Al igual que con el sistema primario, se obtuvieron los porcentajes de importancia de cada evento.

Núm.	Prob. CMC	Acum.	1	2	CMC	PORCENTAJE DE IMPORTANCIA de CMC	Eventos por cada rama
1	1,68E-07	1,68E-07	4,10E-04	4,10E-04	AC	0,00%	E1
2	4,21E-09	1,73E-07	4,10E-04	1,03E-05	AD	0,00%	
3	4,21E-09	1,77E-07	1,03E-05	4,10E-04	BC	0,00%	
4	1,05E-10	1,77E-07	1,03E-05	1,03E-05	BD	0,00%	
5	1,68E-07	3,45E-07	4,10E-04	4,10E-04	AF	0,00%	
6	4,21E-09	3,49E-07	4,10E-04	1,03E-05	AG	0,00%	
7	4,21E-09	3,54E-07	1,03E-05	4,10E-04	BF	0,00%	
8	1,05E-10	3,54E-07	1,03E-05	1,03E-05	BG	0,00%	
9	1,68E-07	5,22E-07	4,10E-04	4,10E-04	CF	0,00%	
10	4,21E-09	5,26E-07	4,10E-04	1,03E-05	CG	0,00%	
11	4,21E-09	5,31E-07	1,03E-05	4,10E-04	DF	0,00%	
12	1,05E-10	5,31E-07	1,03E-05	1,03E-05	DG	0,00%	
13	6,74E-09	5,37E-07	8,21E-05	8,21E-05	HK	0,00%	E2
14	2,80E-07	8,18E-07	8,21E-05	3,41E-03	HL	0,00%	
15	5,61E-08	8,74E-07	8,21E-05	6,84E-04	HM	0,00%	
16	2,80E-07	1,15E-06	3,41E-03	8,21E-05	IK	0,00%	
17	1,17E-05	1,28E-05	3,41E-03	3,41E-03	IL	0,13%	
18	2,33E-06	1,51E-05	3,41E-03	6,84E-04	IM	0,03%	
19	5,61E-08	1,52E-05	6,84E-04	8,21E-05	JK	0,00%	
20	2,33E-06	1,75E-05	6,84E-04	3,41E-03	JL	0,03%	
21	4,68E-07	1,80E-05	6,84E-04	6,84E-04	JM	0,01%	
22	6,74E-09	1,80E-05	8,21E-05	8,21E-05	HN	0,00%	
23	5,61E-08	1,81E-05	8,21E-05	6,84E-04	HO	0,00%	
24	7,68E-05	9,48E-05	8,21E-05	9,35E-01	HP	0,86%	
25	2,80E-07	9,51E-05	8,21E-05	3,41E-03	HQ	0,00%	
26	2,80E-07	9,54E-05	3,41E-03	8,21E-05	IN	0,00%	
27	2,33E-06	9,77E-05	3,41E-03	6,84E-04	IO	0,03%	
28	3,19E-03	3,29E-03	3,41E-03	9,35E-01	IP	35,59%	
29	1,17E-05	3,30E-03	3,41E-03	3,41E-03	IQ	0,13%	
30	5,61E-08	3,30E-03	6,84E-04	8,21E-05	JN	0,00%	
31	4,68E-07	3,30E-03	6,84E-04	6,84E-04	JO	0,01%	
32	6,39E-04	3,94E-03	6,84E-04	9,35E-01	JP	7,13%	
33	2,33E-06	3,94E-03	6,84E-04	3,41E-03	JQ	0,03%	
34	6,74E-09	3,94E-03	8,21E-05	8,21E-05	KN	0,00%	
35	5,61E-08	3,94E-03	8,21E-05	6,84E-04	KO	0,00%	
36	7,68E-05	4,02E-03	8,21E-05	9,35E-01	KP	0,86%	
37	2,80E-07	4,02E-03	8,21E-05	3,41E-03	KQ	0,00%	
38	2,80E-07	4,02E-03	3,41E-03	8,21E-05	LN	0,00%	
39	2,33E-06	4,02E-03	3,41E-03	6,84E-04	LO	0,03%	
40	3,19E-03	7,20E-03	3,41E-03	9,35E-01	LP	35,59%	
41	1,17E-05	7,21E-03	3,41E-03	3,41E-03	LQ	0,13%	
42	5,61E-08	7,21E-03	6,84E-04	8,21E-05	MN	0,00%	
43	4,68E-07	7,21E-03	6,84E-04	6,84E-04	MO	0,01%	
44	6,39E-04	7,85E-03	6,84E-04	9,35E-01	MP	7,13%	
45	2,33E-06	7,85E-03	6,84E-04	3,41E-03	MQ	0,03%	
46	9,07E-04	8,75E-03	9,07E-04		R	10,11%	
47	1,94E-04	8,94E-03	1,94E-04		S	2,17%	
48	7,23E-10	8,94E-03	7,23E-10		E10 E11 E12 E13	0,00%	E3
49	7,23E-10	8,94E-03	7,23E-10		E9 E11 E12 E13	0,00%	
50	7,23E-10	8,94E-03	7,23E-10		E9 E10 E12 E13	0,00%	
51	7,23E-10	8,94E-03	7,23E-10		E9 E10 E11 E13	0,00%	
52	7,23E-10	8,94E-03	7,23E-10		E9 E10 E11 E12	0,00%	

Tabla 14: Resultados del Análisis del Sistema SEC.

A modo de síntesis, se muestra una tabla con los resultados más relevantes en cuanto a porcentaje de importancia. La *pérdida de caudal* se ve principalmente afectada por la falla del interruptor o señal eléctrica de la bomba A, combinada con la falla por señal espuria del SCMR de la bomba en stand by; y la falla del interruptor o señal eléctrica de la bomba B, combinada con la falla por señal espuria del SCMR de la bomba en stand by, y en menor porcentaje una fuga pequeña en la cañería principal. Por otro lado, ni la *pérdida de intercambiador de calor*, ni la *perdida de una celda en la torre de enfriamiento*, tienen influencia en la pérdida de sumidero de calor.

CMC	Probable causa de la falla	PORCENTAJE DE IMPORTANCIA de CMC	Eventos por cada rama
IP	Falla interruptor o señal eléctrica de la <i>bomba principal A</i> , combinado a la falla por señal espuria de la bomba en stand by	35,59%	E2
JP	Falla por señal espuria de la <i>bomba principal A</i> , combinado a la falla por señal espuria de la bomba en stand by	7,13%	
LP	Falla interruptor o señal eléctrica de la <i>bomba principal B</i> , combinado a la falla por señal espuria de la bomba en stand by	35,59%	
MP	Falla por señal espuria de la <i>bomba principal B</i> , combinado a la falla por señal espuria de la bomba en stand by	7,13%	
R	Fuga externa pequeña en cañería principal	10,11%	
S	Fuga externa grande en cañería principal	2,17%	

Tabla 15: Síntesis de Resultados del Análisis del Sistema SEC.

12. CONCLUSIONES

Se alcanzó el objetivo principal del trabajo, que consistió en realizar el proceso de análisis de cada sistema de refrigeración obteniéndose las probabilidades de fallas de los mismos. Esto permitió obtener el resultado de la confiabilidad en el estado operacional de Convección Forzada.

En cuanto al sistema primario, se lograron resultados para dos tiempos de misión propuestos, con el fin de poder realizar una comparación, donde se puede observar que para un ciclo de operación la probabilidad de falla es menor que para seis ciclos.

En un ciclo de operación la confiabilidad resultó del 99,35%, mientras que para seis ciclos 97,15%; en ambos casos para enfrentar la pérdida de refrigeración del núcleo. Para el segundo caso, el porcentaje de importancia de las fallas aumenta en el caso de la falla en el interruptor de la bomba principal, lo cual es un indicio de que habrá que realizar el mantenimiento correspondiente entre paradas operacionales, la bomba principal es un componente crítico del sistema, debido a que los resultados expresaron que es la falla de mayor relevancia. Por lo que se concluye que las bombas principales del sistema son los componentes críticos del mismo.

Para el sistema secundario, la confiabilidad resultó del 98,87% para hacer frente a la pérdida de sumidero, donde se observó que los componentes críticos del sistema son las bombas principales, que impulsan el refrigerante desde las torres de enfriamiento hasta los intercambiadores de calor que conectan hidráulicamente el sistema primario y secundario de refrigeración del reactor. Los modos de fallas que conducen a una mayor probabilidad de ocurrencia de los eventos son, la falla del interruptor o señal eléctrica en el componente, combinado con la señal espuria al SCMR. Por otro lado, una fuga pequeña externa en la cañería principal del sistema secundario, también es relevante para el evento tope de la pérdida de sumidero de calor.

Los resultados logrados para los eventos tope planteados en cada caso, son coherentes debido a que sus valores son altos, aunque permite inferir que para aumentar la confiabilidad de los sistemas es necesario la implementación correcta de ensayos, inspecciones y un correcto plan de mantenimiento.

13. BIBLIOGRAFÍA

- [1].NUREG/CR-6928 INL/EXT-06-11119. Industry-Average Performance for Components and Initiating Events at U.S. Commercial Nuclear Power Plants.
- [2].Soporte al diseño de sistemas en instalaciones nucleares mediante las técnicas HAZOP y FMEA desde el área de seguridad nuclear. Quiroga, D; Grinberg, M; Braidá, I; Garay, C; López, C; García Espiño, M; Campreggher, M; Aramayo, C; Domanski, D; Laiglecia, J; Maturana, R; García, M; Ilardo, P; Hegoburu, P; Giménez, M.
- [3].Applied Reliability Engineering. Volumen II. Fifth edition. Marvin L. Roush. Willie M. Webb.
- [4].Memoria descriptiva Sistema de refrigeración Primario RA10. MD-INV-RA-10-1000-3-003.
- [5].Diagrama de procesos e instrumentación del Sistema de refrigeración primario RA10. DPI-INV-RA-10-1000-3-001-0.
- [6].Memoria descriptiva Sistema de refrigeración Secundario RA10. MD -INV-RA-10-2100-3-003-0.
- [7].Diagrama de procesos e instrumentación del Sistema de refrigeración Secundario RA10. DPI-INV-RA-10-2100-3-001-0.
- [8].Informe de Seguridad del RA10. Capítulo 1: Introducción y descripción general de la instalación. IS-40/RA-10/7230-2-001.
- [9].Informe de Seguridad del RA10. Capítulo 2: Objetivos de seguridad y requerimientos de diseño. IS-40/RA-10/7230-2-002.
- [10]. Informe de Seguridad del RA10. Capítulo 6: Sistemas de refrigeración del reactor y sistemas conectados. IS-40/RA-10/7230-2-006.
- [11]. Informe de Seguridad del RA10. Capítulo 16: Análisis de seguridad. IS-40/RA-10/7230-2-016.