

**“ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE COMPONENTES IMPORTANTES PARA LA
SEGURIDAD DEL REACTOR RA-6”**

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

Alumno: Micaela Marisel Fernandez

Director: Ing. Roberto Hilal
Analista de Seguridad Nuclear CNEA-CAC

Co-director: Ing. Iván Braida
Departamento Seguridad Nuclear CNEA-CAB

Noviembre 2017



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

INDICE

RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	5
ABREVIATURAS.....	6
GLOSARIO.....	7
1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL REACTOR RA-6	8
1.2. SISTEMAS DE SEGURIDAD	10
1.2.1 SISTEMA DE EXTINCIÓN	11
1.2.2 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR CONVECCIÓN NATURAL	14
1.2.3 SISTEMA DE ROMPESIFONES.....	15
1.2.4 SISTEMA DE PROTECCIÓN DEL REACTOR (SPR).....	16
1.2.5 SISTEMA DE VENTILACIÓN	21
1.3. ÁRBOL DE FALLAS.....	25
1.4. ANÁLISIS CUALITATIVO-ALGEBRA BOOLEANA – CONJUNTO MÍNIMO DE CORTE	27
1.5. ANÁLISIS CUANTITATIVO-CONFIABILIDAD.....	30
1.5.1. FALLA.....	30
1.5.2. CLASIFICACIÓN DE FALLA SEGÚN CONDICIÓN DE CONTORNO DEL COMPONENTE ...	31
1.5.3. CLASIFICACIÓN DE FALLA SEGÚN MODELO DE FALLA.....	31
1.5.4. CLASIFICACIÓN DE FALLA SEGÚN ESTADO FUNCIONAL.....	31
1.5.5. CALCULO DE CONFIABILIDAD.....	31
1.6. OBJETIVO	35
1.7. ALCANCE	35
2. ARBOL DE FALLAS.....	36
2.1 ÁRBOL DE FALLA DE LOS SISTEMAS DE SEGURIDAD DEL REACTOR RA-6	36
2.1.1 SISTEMA DE EXTINCIÓN	36
2.1.2 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR CONVECCIÓN NATURAL	37
2.1.3 SISTEMA DE ROMPESIFONES.....	37
2.1.4 SISTEMA DE PROTECCIÓN DEL REACTOR (SPR).....	37

2.1.5	SISTEMA DE VENTILACIÓN	38
3	PROBABILIDAD DE FALLA – TASA DE FALLA.....	41
3.1	DETERMINACIÓN DE PROBABILIDAD DE FALLA – TASA DE FALLA.....	41
3.1.1	SISTEMA DE EXTINCIÓN	41
3.1.2.	SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR CONVECCIÓN NATURAL	42
3.1.3	SISTEMA DE ROMPESIFONES.....	42
3.1.4	SISTEMA DE PROTECCIÓN DEL REACTOR (SPR).....	42
3.1.5	SISTEMA DE VENTILACIÓN	42
4	ANÁLISIS CUALITATIVOS Y CUANTITATIVOS	44
4.1.	SISTEMA DE EXTINCIÓN	44
4.2.	SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR CONVECCIÓN NATURAL	45
4.3.	SISTEMA DE ROMPESIFONES.....	46
4.4.	SISTEMA DE PROTECCIÓN DEL REACTOR (SPR).....	47
4.5.	SISTEMA DE VENTILACIÓN	49
5	RESULTADOS.....	53
5.1.	CONJUNTO MÍNIMO DE CORTE	53
5.1.1.	SISTEMA DE EXTINCIÓN	53
5.1.2.	SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR CONVECCIÓN NATURAL	53
5.1.3.	SISTEMA DE ROMPESIFONES.....	54
5.1.4.	SISTEMA DE PROTECCIÓN	54
5.1.5.	SISTEMA DE VENTILACIÓN	55
5.2.	CONFIABILIDAD	56
	CONCLUSIONES.....	58
	BIBLIOGRAFÍA.....	59

RESUMEN

El Reactor Nuclear Argentino RA-6 está ubicado en la ciudad de San Carlos de Bariloche. Entre las actividades que lleva a cabo se encuentra la investigación y desarrollo en física de reactores e ingeniería nuclear, docencia y entrenamiento. También Terapia por Captura Neutrónica en Boro (BNCT), Análisis por Activación Neutrónica, Radiografía de Neutrones, Ensayos de Instrumentación y Control e irradiación de materiales, entre otros.

Cuenta con cinco sistemas que cumplen las funciones de seguridad para prevenir o mitigar las consecuencias resultantes de una falla, mal función o mala operación. Estos sistemas son: Sistema de Extinción, Sistema de Refrigeración por Convección Natural, Sistema de Rompesifones, Sistema de Protección del Reactor y Sistema de Ventilación.

Estudiando el funcionamiento de cada sistema se evaluó para cada uno de estos las posibles causas que llevan a la falla y, consecuentemente, al no cumplimiento de las funciones de seguridad - extinción de potencia, refrigeración de combustible y confinamiento - para las que fueron diseñados dichos sistemas. Para ello se determinó el Conjunto Mínimo de eventos no deseados de Corte (CMC) que llevan a que se produzca la falla en el funcionamiento en cada uno de los sistemas para su posterior cálculo de confiabilidad. Debido a que el análisis se realiza en base a sistemas de seguridad es que se consideran las fallas a la demanda y a la espera, este último principalmente bajo el modelo No Reparable.

Los datos arrojados demuestran que contemplan una alta confiabilidad dado que fueron considerados criterios de diseño como ser falla segura, falla única, redundancia entre otros.

La falla de los sistemas pasivos está dada por la falla de los componentes que conforman cada sistema. Es así que la falla en la apertura de la clapeta contribuye en un 100% y la falla en la apertura de las válvulas rompesifones un 50% cada una para los sistemas de Refrigeración por Convección Natural y Rompesifones respectivamente.

En cuanto a los sistemas activos el Sistema de Protección puede incurrir en una falla debido al mal funcionamiento de la fuente de alimentación de instrumentación y control en un 50% en cada tren. El Sistema de Extinción presenta una alta influencia del Sistema de Protección por lo que su falla puede deberse en un 90% a la generación y transporte de señales que realizan el pedido de SCRAM. Y en cuanto al Sistema de Ventilación la fuente de alimentación es la que contribuye en un 99.8% a la falla del sistema quedando en segunda instancia la falla del funcionamiento de los filtros de carbón activado de los Sistemas de Recirculación y Extracción con una contribución del 0.052%.

ABSTRACT

The Argentine Nuclear Reactor RA-6 is located in the city of San Carlos de Bariloche. Among the activities carried out is research and development in reactor physics and nuclear engineering, teaching and training. Also Boron Neutron Capture Therapy (BNCT), Neutron Activation Analysis, Neutron Radiography, Instrumentation and Control Tests and irradiation of materials, among others.

It has five systems that comply with security functions to prevent or mitigate the consequences resulting from a failure, bad function or bad operation. These systems are: Extinction System, Natural Convection Cooling System, Romsiphon System, Reactor Protection System and Ventilation System.

By studying the operation of each system, the possible causes that lead to the development of an undesired event were evaluated for each of these, in this case the non-compliance of the functions of safety-power extinction, fuel cooling and confinement-for those that were designed such systems. To do this, the Minimum Set of undesirable events of Cutting (CMC) was determined, leading to the failure of the operation in each of the systems for its subsequent calculation of reliability. Because the analysis is carried out based on security systems, it is considered that the demand and waiting failures are mainly considered under the non-repairable item model.

The data show that they contemplate a high reliability since they were considered design criteria such as safe failure, single failure and redundancy among others.

The failure of passive systems is due to the failure of the components that make up each system. Thus, the failure in the opening of the clapper contributes 100% and the failure in the opening of the ruptured valves 50% each for the systems of Natural Convection Cooling and Romesiphones respectively.

As for the active systems, the Protection System can incur a failure due to the malfunctioning of the instrumentation and control power supply by 50% in each train. The Extinction System has a high influence of the Protection System, so its failure can be due 90% to the generation and transport of signals that perform the SCRAM order. And as for the Ventilation System, the power supply is the one that contributes 99.8% to the failure of the system, leaving in the second instance the failure of the operation of the activated carbon filters of the Recirculation and Extraction Systems with a contribution of 0.052. %.

ABREVIATURAS

RA: Reactor Argentino.

CAB: Centro Atómico Bariloche.

BNCT: Terapia por Captura Neutrónica en Boro.

MTR: Reactor de Ensayo de Materiales - Material Test Reactor.

EC: Elemento combustible.

ECN: Elemento Combustible Normal.

ECC: Elemento Combustible de Control.

ARN: Autoridad Regulatoria Nuclear.

SPR: Sistema de Protección del Reactor.

SegM: Seguridad en Marcha.

CMC: Conjunto Mínimo de Corte.

GLOSARIO

Falla segura: la falla de uno o más dispositivos importantes para la seguridad hacen pasar a la planta a un estado seguro sin requerirse acciones correctoras

Redundancia: dos o más subsistemas de la misma naturaleza e independientes entre sí, cada uno de los cuales puede llevar a cabo la función del sistema por sí solo

Criterio de Falla Única: admite la ocurrencia de una falla única en cualquier subsistema o componente del mismo sin que por ello deje de prestar la función que le compete

Evento: condición que se desvía de la operación normal.

Conjunto: reunión de objetos o elementos definidos y diferenciables entre sí.

Proposición: enunciado lógico al que se le puede asignar un valor de verdad (1) o falsedad (0).

Sistema: conjunto finito de elementos físicos discretos que desempeñan una o varias funciones de interés.

Componente: partición conveniente del sistema que facilita su estudio.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL REACTOR RA-6

El Reactor Nuclear Argentino RA-6 se halla ubicado dentro del Centro Atómico Bariloche (CAB) en la ciudad de San Carlos de Bariloche, provincia de Río Negro. Entre las actividades que lleva a cabo y para las que fue creado se cuentan la investigación y desarrollo en física de reactores e ingeniería nuclear, enseñanza y entrenamiento. También para Terapia por Captura Neutrónica en Boro (BNCT), Análisis por Activación Neutrónica, Radiografía de Neutrones, Ensayos de Instrumentación y Control e irradiación de materiales, entre otros.[24]

Las características técnicas del reactor según el capítulo 5 [19] y 6 [20] del Informe de seguridad del RA-6 son descriptas a continuación.

El reactor es de tipo piscina con una potencia de operación de 1 MW térmico. Los elementos combustibles denominados MTR (Reactor de Ensayo de Materiales - Material Test Reactor) son de siliciuro de uranio (U_3Si_2) con un enriquecimiento del 19.7% en peso de uranio 235 y una densidad de uranio en el núcleo combustible de 4.8 g/cm^3 . Constan de dos tipos de elementos combustibles (EC) denominados Elemento Combustible Normal (ECN) y Elemento Combustible de Control (ECC) ambos de sección rectangular (80mm x 76mm) de longitudes 915mm y 1611mm respectivamente. La diferencia entre estos también radica en la cantidad de placas combustible que contienen, 19 para ECN y 14 para ECC permitiendo éste último el deslizamiento de placas de control de reactividad en su interior además de contener alambres de cadmio que permite reducir la reactividad en exceso inicial. Este arreglo de combustibles tipo placa se encuentra dentro de un tanque de acero inoxidable de 2.40 m de diámetro y 10.40 m de profundidad a 6.60 m bajo el nivel de agua reposando sobre una grilla. (Fig.1)

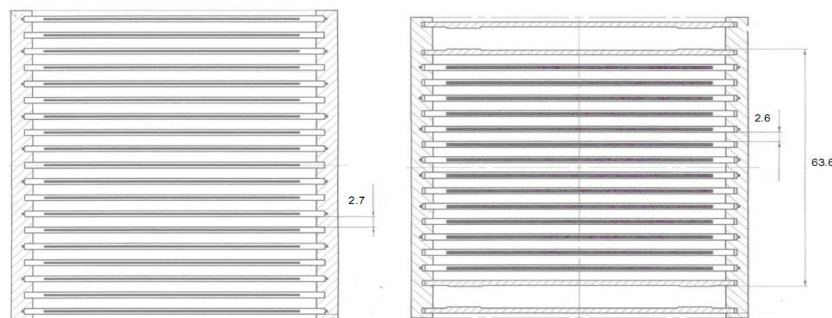


Fig.1: Sección transversal de ECN y ECC respectivamente.[19]

En la boca de pileta del reactor se encuentra un puente de mecanismos que mueven las barras de control en dirección vertical. Dichas barras tienen un material absorbente de neutrones formado por una aleación de Plata (80%), Indio (15%) y Cadmio (5%) y son las que se insertan o extraen de la zona del núcleo-específicamente entre los ECC para regular la potencia del reactor o para apagarlo. La regulación gruesa de reactividad así como el apagado del reactor lo realizan 4 barras que son denominadas barras de seguridad,

mientras que una quinta barra realiza la regulación fina de reactividad compensando pequeñas variaciones de ésta. (Fig.2)

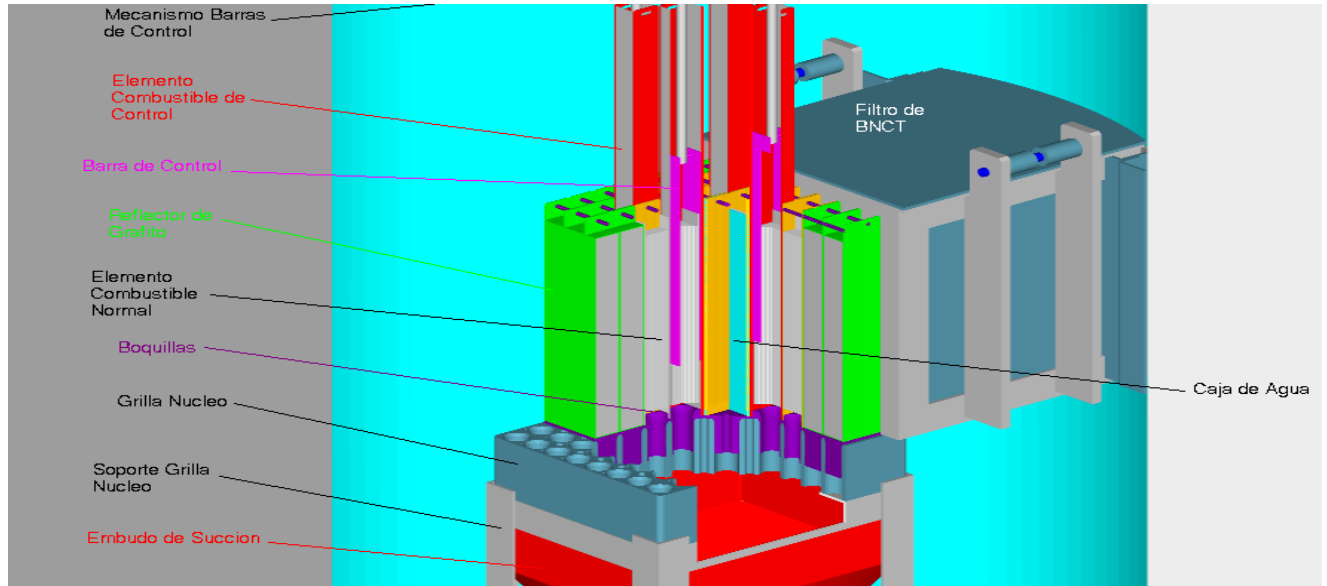


Fig. 2: Diseño del núcleo RA-6. (Fuente: capacitación dictada por personal del RA-6)

El núcleo del RA-6 es moderado por agua liviana, reflejado en dirección axial por agua liviana y en dirección radial por grafito.

El recambio de un EC se realiza cada 96 días de operación del reactor a plena potencia. Debido a la estrategia utilizada para esta tarea el ciclo dura 384 días resultando en el desplazamiento de todos los combustibles del núcleo. Se contempla además que la extracción de dichos elementos deben tener un quemado promedio de al menos un 40%.

La refrigeración del reactor se lleva a cabo por dos sistemas, el Sistema Primario y el Secundario. El Sistema Primario extrae el calor generado en el núcleo, producto de los procesos de fisión en cadena, y lo cede al Sistema Secundario manteniendo la operatividad del reactor bajo las condiciones accidentales previstas. El Sistema Secundario se encarga de extraer el calor del Primario y cederlo al ambiente a través de tres torres de enfriamiento, las cuales tienen un caudal nominal de 100 m³/h cada una equipada con ventilador de tiro inducido y pileta recolectora individual. El caudal de cada torre es recolectada por su propia pileta para ser luego descargada a una cisterna colectora de hormigón semienterrada en el edificio de compresores. El fluido de enfriamiento es succionado desde esta cisterna hasta el edificio del reactor hasta la admisión de la bomba cerrando el circuito. (Fig.3)

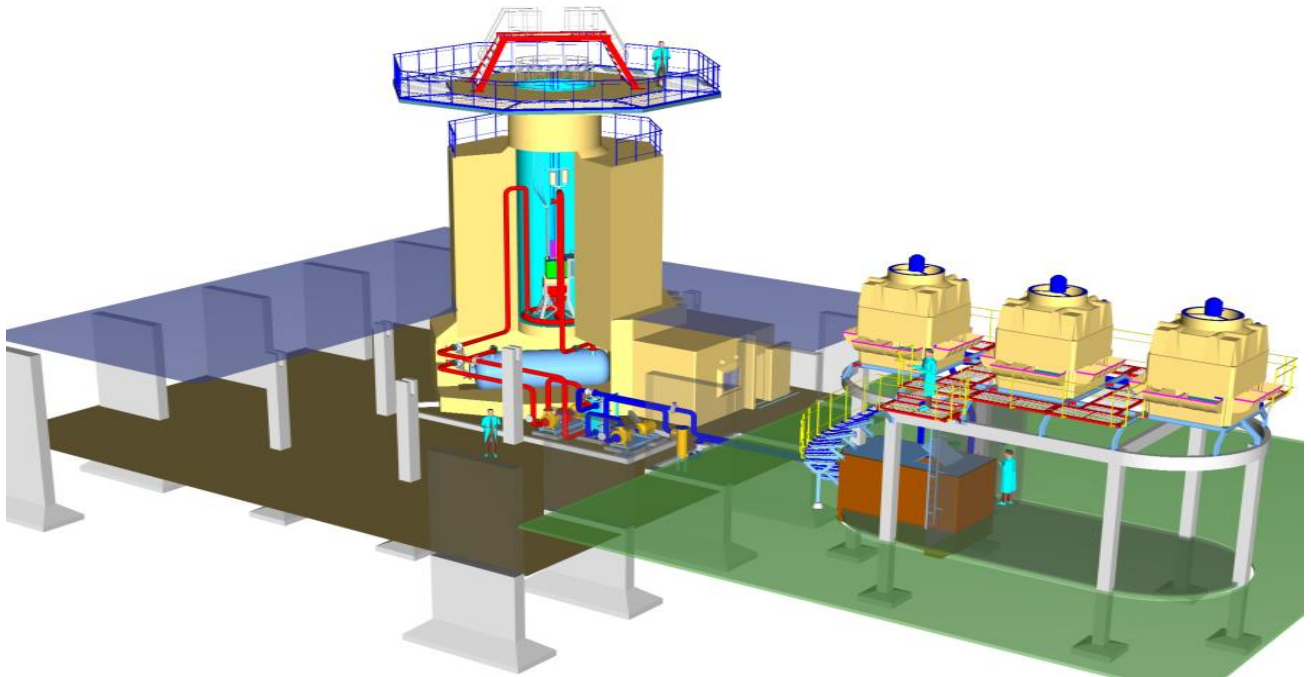


Fig.3: Sistema Primario (cañería roja) y Sistema Secundario (cañería azul). (Fuente: capacitación dictada por personal del RA-6)

En operación normal el circuito primario refrigera por convección forzada pasando por el núcleo en sentido descendente con un caudal de $150 \text{ m}^3/\text{h}$ y luego se dirige al tanque de decaimiento que tiene por función reducir la actividad¹ del fluido antes de que ingrese a la sala de bombas. El refrigerante pasa por un intercambiador de calor y es devuelta al tanque del reactor a través de cañerías similares a la de salida concluyendo su recorrido en un toroide en el fondo de éste que evitar la turbulencia del agua.

En caso de parada del reactor, la bomba se detiene y la refrigeración del núcleo se produce por convección natural en sentido ascendente como consecuencia de la apertura de la clapeta e inversión de caudal debido a los gradientes térmicos.

La bomba también cuenta con un volante de inercia planteado como criterio de seguridad ya que al detenerse la bomba se produce la disminución abrupta de extracción de calor del núcleo. El volante de inercia tiene por finalidad retardar la detención de la bomba evitando que la temperatura máxima de la placa combustible no supere el valor de inicio de ebullición nucleada. En función a diferentes estudios tomó por valor de diseño $2 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ el momento de inercia del volante y 5 segundos el tiempo de apertura de la clapeta.

1.2. SISTEMAS DE SEGURIDAD

De acuerdo a las definiciones enmarcadas en la norma AR 4.2.2: Diseño de Reactores de Investigación [21], un sistema de seguridad es un “sistema que lleva a cabo una función de seguridad para prevenir o mitigar las consecuencias resultantes de una falla, mal función o mala operación”.

¹ Actividad debida a la reacción $O^{16}(n,p)N^{16}$ decayendo por emisión gamma de 6 Mev con una vida media de 7.13 seg.

Se entiende por funciones básicas de seguridad a la extinción de la potencia, refrigeración del combustible y al confinamiento de las sustancias radiactivas. [8]

Los Sistemas de seguridad del RA-6 que se estudiarán en este trabajo son: [22]

- ✓ Sistema de Extinción
- ✓ Sistema de Refrigeración por Convección Natural
- ✓ Sistema de Rompesifones
- ✓ Sistema de Protección del Reactor (SPR)
- ✓ Sistema de Ventilación

1.2.1 SISTEMA DE EXTINCIÓN

El funcionamiento del Sistema de Extinción que se describe a continuación se toma de los capítulos 5 [19] y 7 [22] del Informe de Seguridad.

La función de seguridad que cumple es la de extinguir la reacción en cadena del reactor cuando lo requiera el Sistema de Protección (accionamiento automático debido a la lógica de SCRAM) o se lo comande desde sala de control (accionamiento manual), asegurando que el sistema es capaz de mantener al reactor en condiciones sub-crítica tanto en condiciones operacionales como accidentales previstas por el diseño.

El Sistema de Extinción está compuesto por cuatro de las cinco barras de control de reactividad. Estas cuatro barras son denominadas barras de seguridad ya que ante una señal de actuación del sistema de extinción se introducen totalmente en el núcleo (SCRAM). [23]

Cada una de estas 4 barras de seguridad está compuesta por dos placas adsorbentes (aleación de plata 80% - indio 15% - cadmio 5%) ubicadas en distintas posiciones en el núcleo y que coincide con las posiciones de los elementos combustibles de control. Como se mencionó anteriormente los ECC están constituidos por catorce placas combustibles y espacios equivalentes a cuatro placas combustibles que permiten el deslizamiento de las dos placas absorbentes. El par de placas más su soporte superior es lo que se denomina barra de seguridad y se utilizan también para realizar la regulación gruesa de reactividad. (Fig.4)

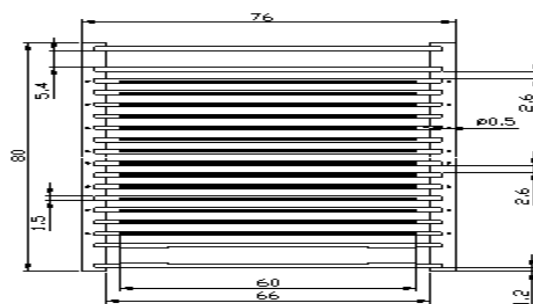


Fig. 4: Sección transversal de un elemento combustible de control (ECC). (Fuente: capacitación dictada por personal del RA-6)

Las placas absorbentes están cubiertas por una vaina con un tapón inferior y una placa tope superior de acero inoxidable. Los compuestos de la aleación de la que están hechas los absorbentes se deben a motivos neutrónicos ya que la plata tiene una alta sección eficaz de absorción de neutrones epitérmicos y en segunda instancia el indio, mientras que el cadmio es un buen absorbedor de neutrones térmicos. (Fig.5)

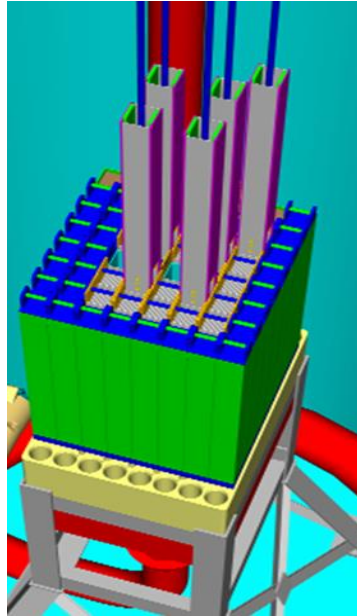


Fig.5: Placas absorbentes en el núcleo. (Fuente: capacitación dictada por personal del RA-6)

Los mecanismos de accionamiento de las barras de control se encuentran alojados en el puente de mecanismos ubicado por encima de boca de tanque. Cada barra de seguridad tiene un mecanismo y cada mecanismo está constituido por un motor de accionamiento paso a paso, eje sin fin y buje que transforma el movimiento rotativo en lineal, un electroimán cuya desenergización produce SCRAM, eje sostén de la barra, microinterruptores de posiciones finales, indicador de posición de mecanismo, pistón de freno que actúa en el último 20 % de recorrido para disminuir la velocidad de la barra que cae ante un SCRAM, y la parte estructural como el cuerpo principal y tubo guía.

Debido a que el sistema de extinción forma parte del sistema de control de reactividad del reactor, es decir, se utilizan componentes del sistema de extinción para control de reactividad, es que se definen tres estados de operación:

1. Parada: las barras de seguridad se encuentran insertadas en el núcleo en su totalidad debido a la interrupción de la corriente que energiza los electroimanes de las barras de seguridad y los motores paso a paso de los mecanismos provocando la caída de las barras por efecto de la gravedad.
2. Operación: durante la operación las barras se encuentran parcialmente insertadas en el núcleo, es decir que los electroimanes se mantienen energizados permitiendo mover las placas de control cuando se acciona el motor paso a paso. Cada barra cuenta con un indicador de posición de mecanismos cuya señal es monitoreada por el sistema de control del reactor.

3. SCRAM: la generación de señal de SCRAM del sistema de protección provoca la desenergización de electroimanes perdiendo vinculación entre las barras de seguridad y los mecanismos independientemente de la posición del mecanismo y del estado operativo del motor paso a paso.

Las condiciones o señales que dan como resultado el pedido de SCRAM son:

- ✓ Flujo en 2 de los 3 canales de arranque fuera de rango normal
- ✓ Permiso de marcha después
- ✓ Pérdida de la señal SegM
- ✓ Flujo en 2 de los 3 canales de marcha fuera de rango normal
- ✓ Tasa de crecimiento en 2 de los 3 canales de marcha fuera de rango normal
- ✓ Lineal en 2 de los 3 canales de marcha fuera de rango normal
- ✓ Nivel en 2 de los 3 monitores de área fuera de rango normal
- ✓ Nivel sísmico en uno de los 3 sensores sobre nivel máximo
- ✓ Caudal del primario en 2 de los 3 sensores por debajo del mínimo
- ✓ Lineal del canal de marcha obtenida en salida 2 excedió el nivel 3 o se encuentra debajo del mínimo de precaución (lógica 2 de 3)
- ✓ Clapetas o rompesifones abiertos
- ✓ Temperatura de salida del núcleo fuera de los parámetros normales (lógica 2 de 3)
- ✓ Diferencia de temperatura entre entrada y salida del núcleo fuera de los parámetros normales (lógica 2 de 3)
- ✓ Diferencia de presión entre entrada y salida del núcleo fuera de los parámetros normales.
- ✓ Pedido Manual de SCRAM
- ✓ Nivel de agua del tanque del reactor se encuentra por debajo de un mínimo
- ✓ Falla simultánea de las dos lógicas SCRAM 1 y SCRAM2

Luego de un SCRAM se deben llevar todos los mecanismos a su posición inferior y una vez que las condiciones que produjeron el SCRAM vuelvan a la normalidad se habilita la operación nuevamente energizando los electroimanes de las barras de regulación gruesa.

El diseño seguro de los comandos de sala de control asegura que no pueda extraerse más de una barra por vez.

La falla en la alimentación de cualquiera de los motores de los mecanismos o de un electroimán de la barra de seguridad resulta en la completa inserción de la barra afectada (Falla segura²). No hay alimentación de emergencia para los mecanismos de barra.

En el Ra-6 la inserción completa de al menos 3 barras de seguridad es suficiente para llevar al reactor a una condición de apagado seguro (Redundancia³ y criterio de Falla única⁴). Por diseño el sistema asegura que la

² Falla segura: la falla de uno o más dispositivos importantes para la seguridad hacen pasar a la planta a un estado seguro sin requerirse acciones correctoras.[8]

³ Redundancia: dos o más subsistemas de la misma naturaleza e independientes entre sí, cada uno de los cuales puede llevar a cabo la función del sistema por sí solo.[8]

⁴ Criterio de falla única: admite la ocurrencia de una falla única en cualquier subsistema o componente del mismo sin que por ello deje de prestar la función que le compete.[8]

función de extinción no pueda ser impedida por la función de regulación de reactividad. Los mecanismos no tienen ningún impedimento para la caída libre de la barra al igual que los electroimanes ya que si éstos pierden su alimentación eléctrica las barras de seguridad caen por gravedad.

1.2.2 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR CONVECCIÓN NATURAL

La caracterización de este sistema estará dada en base al capítulo 5 [19], 6 [20] y 7 [22] del Informe de Seguridad del reactor.

Tiene por función extraer el calor de decaimiento del núcleo durante la parada del reactor y durante las condiciones accidentales previstas por diseño. (Fig.6)



Fig.6: Clapeta. (Fuente: capacitación dictada por personal del RA-6)

El Sistema de Refrigeración por Convección Natural se encuentra dentro de la pileta del reactor sumergido en el refrigerante. Es un sistema pasivo, es decir que no necesita de la actuación de otro sistema para mantener la circulación del refrigerante.

La refrigeración por convección natural es un modo de operación del Sistema Primario - debido a que el circuito de refrigeración primario del reactor se encuentra conectado con el refrigerante de la pileta a la altura de la válvula clapeta - y ejecuta su función durante los estados de parada del reactor o durante una condición accidental. Cuando la bomba centrífuga que proporciona la refrigeración forzada del circuito primario se para, se produce una pérdida de diferencia de presión entre el interior del circuito primario y la pileta que la generaba la bomba provocando que la clapeta se abra por efecto de la gravedad. Un gradiente térmico debido al calor producido en el núcleo provoca una diferencia de densidades en el refrigerante generando su ascenso a través de éste. Entonces mientras una parte del agua pasa por el núcleo y asciende debido al aumento de temperatura y consiguiente disminución de densidad, otra parte del agua de la pileta que no asciende como el primero por tener menor temperatura y mayor densidad es tomada por el circuito a través de la válvula clapeta. De este modo el refrigerante con menor temperatura pasa a través del núcleo para luego ser depositado nuevamente en la pileta del reactor estableciendo la convección natural y concluyendo el circuito de refrigeración. (Fig.7)

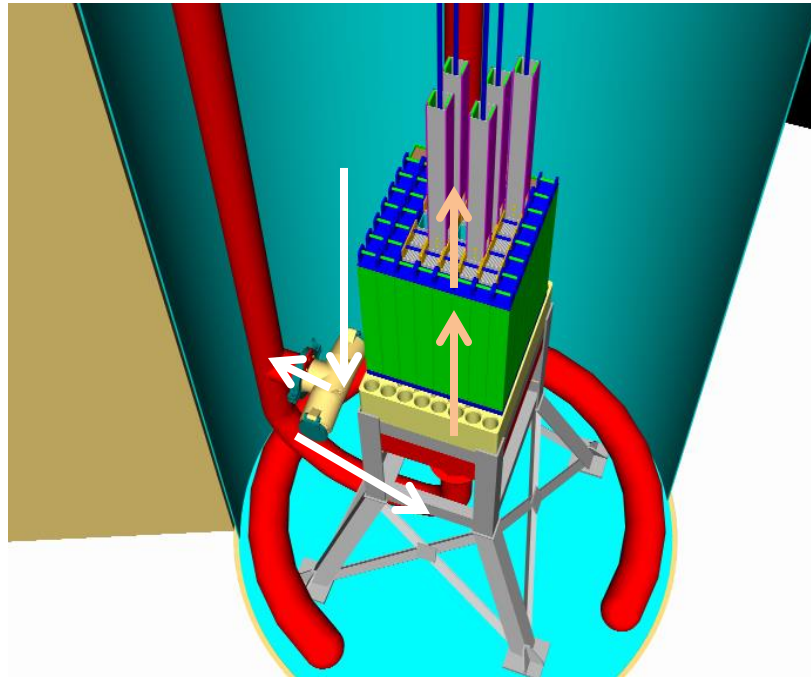


Fig.7: Sistema de Refrigeración por Convección Natural. (Fuente: capacitación dictada por personal del RA-6)

Para que este sistema pueda cumplir con su función sin producir daño alguno al núcleo - debido a la potencia que es capaz de refrigerar - es necesario que la reacción en cadena sea extinguida y esto se logra mediante la actuación del Sistema de Protección a través del pedido de SCRAM. Automáticamente se desencadena este pedido cuando se pierde la señal de válvula clapeta cerrada, es decir que la refrigeración del núcleo por convección natural sin producir daño se efectúa cuando la válvula está abierta.

Cuando la bomba del primario se pone en funcionamiento nuevamente se produce una diferencia de presión entre el interior del circuito de refrigeración del primario y la pileta del reactor que ocasiona el cierre de la clapeta dejando el circuito ininterrumpido estableciéndose el caudal de refrigeración de núcleo de operación normal a través de las cañerías del sistema primario.

La válvula clapeta posee un pisto que desplaza el refrigerante dentro de un cilindro perforado asegurando que el cierre sea suave y no daña el sello de la válvula.

1.2.3 SISTEMA DE ROMPESIFONES

La siguiente descripción fue realizada en función del capítulo 5 [19], 6 [20] y 7 [22] del Informe de Seguridad del reactor.

La función es la de evitar que a través de las cañerías del sistema primario el nivel de agua de la pileta llegue por debajo de un nivel determinado durante condiciones accidentales.

Es un sistema pasivo de dos válvulas redundantes que se cierran por flotación si tiene un nivel normal de agua (nivel por encima de las válvulas). Pero ante una condición accidental donde el agua de la pileta

desciende por debajo de un nivel dado (3.5 m por debajo del nivel nominal del refrigerante), los flotadores conectados a la tubería de refrigeración primaria mediante una conexión en “T” pierden sustentación hidrostática. Como consecuencia, las válvulas rompesifones se abren permitiendo la entrada de aire dentro de la cañería del primario interrumpiendo el efecto sifón y evitando el vaciado de la pileta. El diseño garantiza su funcionamiento aún con la bomba del primario en funcionamiento y con la falla de uno de los dos flotadores (criterio de falla única). (Fig. 8 y 9)

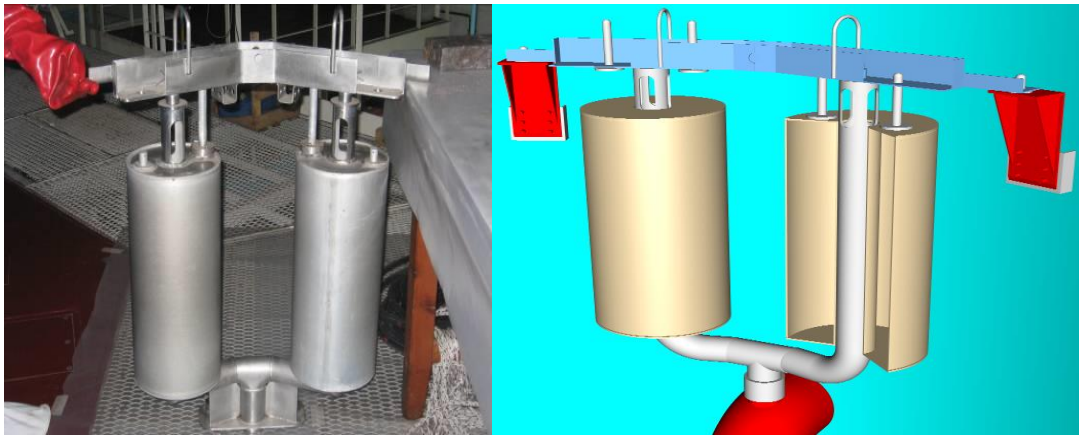


Fig.8: Sistema de Rompesifones. (Fuente: capacitación dictada por personal del RA-6)

En caso hipotético que falle la apertura de la válvula, el sistema de protección automáticamente realiza el pedido de SCRAM extinguiendo el reactor con la posterior actuación del sistema de refrigeración por convección natural.

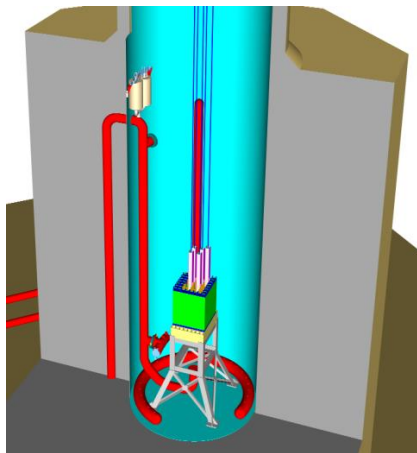


Fig.9: Vista del sistema de rompesifones en pileta.

1.2.4 SISTEMA DE PROTECCIÓN DEL REACTOR (SPR)

A continuación se define el SPR a partir del capítulo 7 [22] del Informe de Seguridad, la guía de estudio [25] proporcionada en la capacitación brindada por el personal del reactor RA-6 y el informe técnico [26].

Es el sistema encargado de iniciar automáticamente las acciones protectivas necesarias para llevar siempre al reactor a un estado seguro manteniéndolo así durante condiciones accidentales previstas por el diseño.

En operación normal todas las señales requeridas se encuentran presentes por lo que el sistema de protección no requiere realizar ningún tipo de acción. En cambio, en condiciones accidentales faltan una o más señales provocando la actuación automática del sistema de protección y la consecuente acción protectora de pedido de SCRAM.

La lógica de SCRAM tiene por función la desenergización de los electroimanes que acoplan las barras de control con los mecanismos produciendo la extinción rápida del reactor. (Fig. 10 y Tabla.1)

Físicamente la lógica de SCRAM está construida en una serie de módulos NIM, montados sobre un bastidor BIN-NIM específico situado en sala de control, con su correspondiente fuente de alimentación de baja tensión según normas NIM.

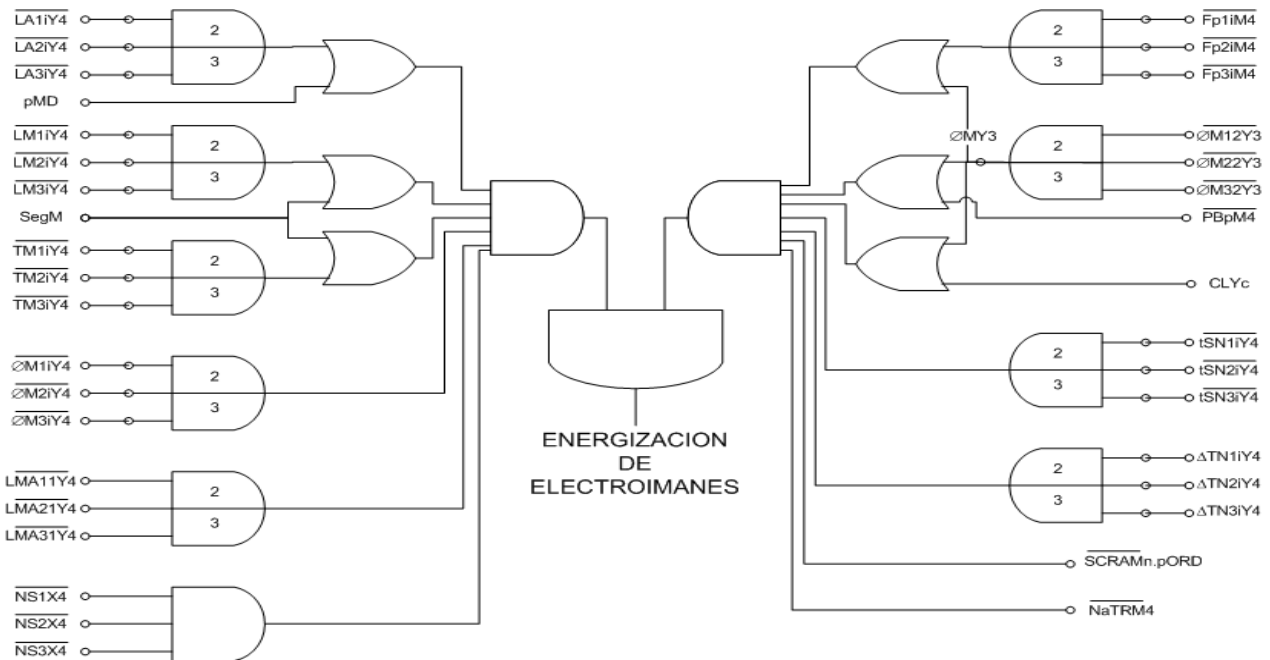


Fig. 10: Lógica de SCRAM

SEÑALES	
Parámetros neutrónicos del Núcleo	
$\overline{LA_{ij}Y4}$	Logarítmico de flujo en el canal de arranque número i que es procesado por la lógica de SCRAM j se encuentra dentro de

	parámetros normales
pMD	Permiso de marcha después
$\overline{LMijY4}$	Logarítmico de flujo en el canal de marcha número i que es procesado por la lógica de SCRAM j se encuentra dentro de parámetros normales
$\overline{TMijY4}$	Tasa de crecimiento del canal de marcha número i obtenida de la salida j se encuentra dentro de parámetros normales
$\varnothing \overline{MijY4}$	Lineal del canal de marcha i obtenida de la salida j se encuentra dentro de parámetros normales
$\overline{LMAi1Y4}$	Logarítmico monitor de área i se encuentra dentro de parámetros normales.
$\varnothing \overline{Mi2Y3}$	La salida lineal del canal de marcha i obtenida de la salida 2 no excedió el nivel 3 y no se encuentra por debajo de un mínimo de precaución
Parámetros termohidráulicos del Núcleo	
$\overline{tSNijY4}$	La temperatura de salida del núcleo medida por la cadena i y procesada por la lógica de SCRAM número j se encuentra dentro de los parámetros normales
$\Delta \overline{TNijY4}$	La diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del núcleo medida por la cadena i y procesada por la lógica de SCRAM número j se encuentra dentro de parámetros normales
Evento externo – Sismo	
$\overline{NSiX4}$	Nivel Sísmico no se encuentra por sobre un máximo.
Señales de parámetros del Sistema Primario	
$\overline{FpijM4}$	Caudal del primario medido por la cadena i y procesado por la lógica de

	SCRAM j se encuentra por encima del caudal mínimo requerido.
Parámetros del subsistema de Clapetas y Rompesifones	
CLYc	Clapetas y Rompesifones Activos cerrados
Señales de parámetros de la Pileta del Reactor	
$\overline{\text{NaTRM4}}$	El nivel de agua en el tanque del reactor se encuentra debajo del nivel mínimo permitido
Lógica	
$\overline{\text{SCRAM}}$ pOrd	No hay SCRAM pedido

Tabla 1: Señales de la Lógica de SCRAM.

Tanto la lógica de SCRAM como la lógica de enclavamiento son señales de parámetros negados puesto que se considera que los niveles normales son altos (+12 V) y los de alarma o pedido de SCRAM bajos (0 V), para una máxima seguridad. Estas señales provienen de distintas cadenas de instrumentación que miden los parámetros de interés para mantener la seguridad del reactor.

El circuito de la lógica de SCRAM comprende 2 lógicas o trenes independientes entre sí actuando en paralelo denominadas SCRAM 1 y SCRAM 2 por lo que la falla de un tren redundante no implica SCRAM. Dicha lógica está compuesta por los siguientes módulos: (Fig. 11)

- ✓ *Fuente de alimentación (0V-12V-24V)*
- ✓ *Módulo 501(A): Circuito generador de secuencia:* es el encargado de generar todas las señales necesarias para chequear todos los módulos del sistema de protección. Las señales que genera son un set de 40 señales que alimentan las entradas de chequeo de los módulos bajo testeo y una base temporal de 1 milisegundo de período. La base temporal se utiliza como reloj de todos los módulos del sistema de protección que necesiten sincronismo⁵. Las 40 señales presentan un patrón determinado que en conjunto con el patrón de chequeo de los módulos del sistema de protección generan la forma de onda que espera el módulo detector de SCRAM.
- ✓ *Módulo 511(C-D-I-H): Lógica 2/3:* recibe la base temporal y un set reducido de las 40 señales generadas en el módulo 501. Este set reducido consta de doce señales agrupadas en cuatro conjuntos de tres señales y este módulo es el encargado de realizar una votación en la mayoría de las señales que están

⁵ circuitos secuenciales sincrónicos: son aquellos los que la salida depende únicamente de las transiciones del reloj. En este contexto llamaremos sincrónico al circuito comandado por un reloj (clock).

redundadas. Es decir que cada conjunto conforma la lógica 2/3 y cuando dos de las tres entradas caen por bajo nivel el módulo entrega una señal por alto nivel a través de compuertas.

✓ *Módulo 521(E-G): Lógica AND y circuito detector de SCRAM (lógica 1/1):* recibe como entrada la base temporal, un set reducido de las 40 señales generadas y las señales proveniente de la votación 2/3. Procesa estas señales y genera la señal de pedido de SCRAM que produce el módulo 531.

✓ *Módulo 531(L): Energización de electroimanes:* procesa las señales de salida de los detectores de SCRAM en paralelo generando señales indicadoras de las condiciones que generaron la acción de SCRAM y dando origen al accionamiento sobre los electroimanes desenergizándolo en caso de no cumplir con los requisitos de funcionamiento seguro del reactor.

Si sucediera que una falla en la lógica del sistema y una vez reparado el bloque defectuoso se procede a una reposición manual en el módulo 521 del tren correspondiente al bloque lógico fallado para llevar a la normalidad el funcionamiento del circuito de detección de SCRAM.

En líneas generales la lógica SCRAM indica acciones protectivas si:

- En módulo/s 511 (lógica 2/3) al menos dos de las tres entradas está en nivel bajo.
- En módulo/s 521 (lógica "Y") una o más entradas están en nivel bajo.
- Existe al menos un módulo fallado en cada tren redundante.
- Falla cualquiera de los dos canales que procesa la señal de salida del detector de SCRAM.

Por diseño el SPR debe cumplir con los criterios de redundancia, diversidad, independencia y de falla única para asegurar una apropiada confiabilidad de los sistemas importantes para la seguridad. Al igual que la tasa de falla por demanda del sistema de protección debe ser inferior a $10E-3$.

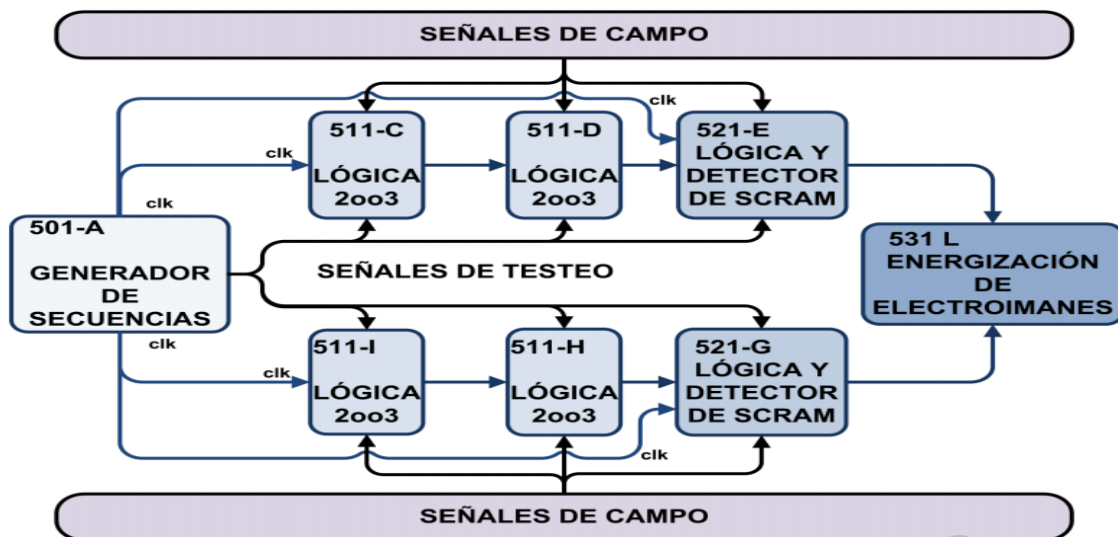


Fig.11: SPR del reactor RA-6

1.2.5 SISTEMA DE VENTILACIÓN

El sistema de ventilación será detallado contemplando el capítulo 7 [22] y 10 [27] del Informe de seguridad, así como también el Procedimiento de Ensayo Funcional [28] y el Manual de Operación-Procedimiento Aplicativo [29].

Las funciones de seguridad que lleva a cabo son:

- 1) Controlar que la concentración de isótopos en el ámbito del reactor sea lo suficientemente bajo mediante el control de caudal de aire.
- 2) Mantener la depresión del reactor en 17 mm.c.a. respecto al medio ambiente asegurando la no fuga hacia el exterior proporcionando de esta manera una defensa en profundidad.
- 3) Acondicionar y purificar el aire del hall del reactor reteniendo los isótopos radiactivos mediante filtrado del aire extraído.
- 4) Remover los productos de fisión en caso de presencia de éstos en boca de tanque y chimenea de expulsión.

El sistema de ventilación está compuesto a su vez por otros sistemas o subsistemas:

- I. Sistema de Inyección de aire
- II. Sistema de Recirculación de aire
- III. Sistema de Extracción de aire

SISTEMA DE INYECCION

Es el encargado de filtrar y acondicionar el aire proveniente del exterior ($1500 \text{ m}^3/\text{h}$) y el cual es inyectado al hall ($1500 \text{ m}^3/\text{h}$) del reactor.

El aire que ingresa del exterior pasa por un conjunto de prefiltro y filtros finos que remueven las partículas en suspensión. Los mismos están contenidos en gabinetes con presostatos que miden el diferencial de presión que permite dar cuenta el grado de colmatación o rotura de los filtros. En situación normal el aire sigue su curso a través de un sistema de calefacción cuyo termostato controla la temperatura de ingreso al hall. El ventilador impulsa el aire a pasar por el humidificador y clapeta para luego regular su inyección al reactor por medio de una persiana motorizada controlada en forma automática a través del sistema de control de depresión del hall del reactor.

También existe un by pass al ventilador con una clapeta que se habilita en caso de fallar el ventilador de inyección.

Las dos clapetas - una en la rama del ventilador y la otra en el by pass - clausuran el sistema de inyección en estado de emergencia.

Cuando por alguna circunstancia la depresión del hall es menor a 15 mm.c.a el ventilador se detiene automáticamente.

Según la Guía de Procedimiento de Ensayo Funcional se considera como criterio de éxito del sistema de inyección en estado de emergencia por actividad en boca de tanque cuando no circula aire por ninguna rama y esto se evidencia con el: (Fig. 12)

- Cierre de clapeta de cierre hermético FV006
- Cierre de clapeta de cierre hermético FV009
- Detención del ventilador de inyección V101

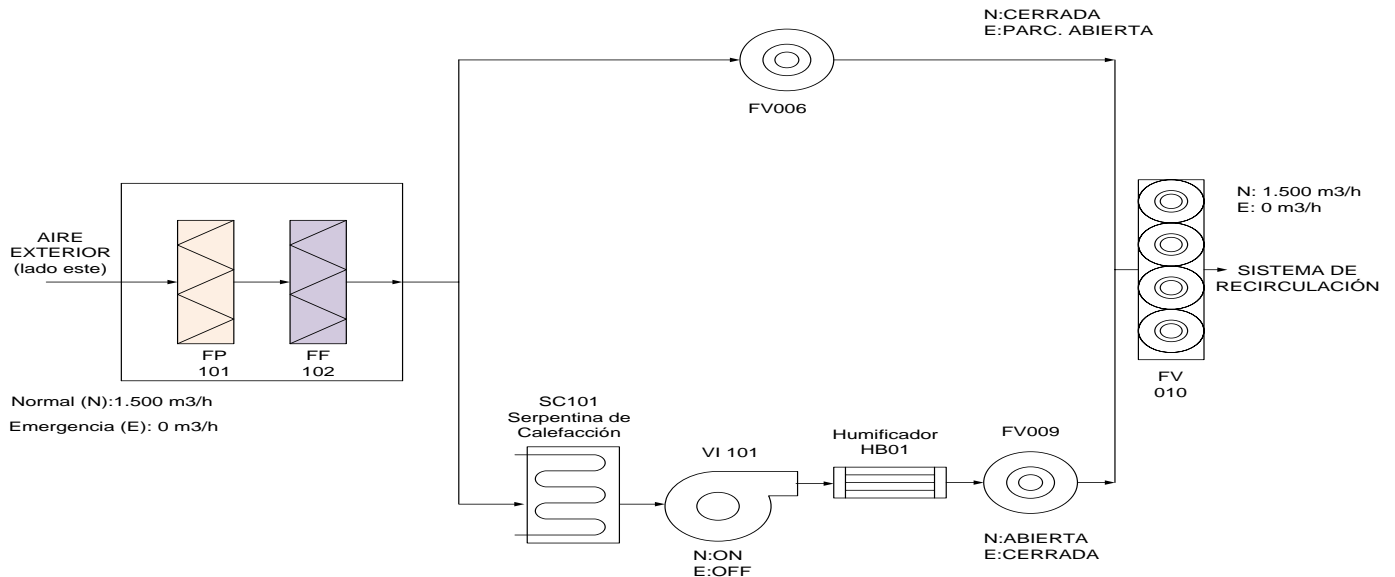


Fig.12: Sistema de Inyección.

SISTEMA DE RECIRCULACIÓN

Tiene por función la de retornar al hall del reactor el aire que proviene del hall y del sótano.

En condiciones normales la clapeta FV1020 está cerrada evitando el ingreso de aire a los filtros de carbón activado. El aire proveniente del sistema de inyección recircula por el hall del reactor y su caudal nominal de $6500 \text{ m}^3/\text{h}$ es regulado por medio de la persiana FV035 regulada manualmente en forma remota desde sala de control. Luego el aire sigue su curso por una o ambas ramas de persianas y ventiladores que permiten su recirculación.

Cuando se detecta actividad en boca de tanque- estado de emergencia- la clapeta y persianas de la rama de circulación en estado normal se cierran parcialmente y se conmuta el ventilador de recirculación a alta velocidad para compensar el aumento de pérdida de presión del sistema ya que una parte del aire pasa por los filtros y otra recircula en la mismas condiciones que entra. En este estado se filtran aproximadamente $2600 \text{ m}^3/\text{h}$ de los $6500 \text{ m}^3/\text{h}$ que son recirculados por el sistema. Esto se logra mediante la apertura de la clapeta FV1020 permitiendo la circulación de aire ($2600 \text{ m}^3/\text{h}$) a través de conjuntos de prefiltros y filtros absolutos-con la presencia de sus respectivos presóstastos para control de colmatación y/o rotura- luego de lo cual la mitad del caudal pasa por un calefactor para mejorar la eficiencia de los filtros, permitiendo precalentar el aire que ingresa a los mismos cuando su temperatura está por debajo de los $22 \text{ }^\circ\text{C}$, pasando

luego, una parte, por filtros de carbón activado mientras que la otra mitad circula por el by pass de los filtros. La persiana del by pass regula el caudal que pasa por los filtro y por el mismo by pass mediante ajuste manual. Luego el aire sigue su curso por una o ambas ramas de persianas y ventiladores que permiten su recirculación. (Fig. 13)

El funcionamiento en emergencia puede ser habilitado en forma manual desde sala de control o sala de repliegue y en forma automática por indicación de los detectores en boca de tanque.

La pérdida del nivel de depresión requerido dentro del confinamiento, sea por falla del sistema de ventilación o por error de configuración en alguna de las puertas de exclusiva de entrada al Edificio del Reactor, resulta en el disparo de SCRAM por el Sistema de Protección. En este caso, el reactor no podrá volver a arrancarse hasta que se restituyan las condiciones de depresión en el interior del confinamiento ya que al no haber la depresión requerida se mantendrá la señal de disparo de SCRAM.

Según la Guía de Procedimiento de Ensayo Funcional se considera como criterio de éxito del sistema de Recirculación en estado de emergencia por actividad en boca de tanque cuando existe una circulación aproximada de 2.600 m³/h por el sistema de filtrado y 2.500 m³/h restantes por la línea de by-pass. Lo que implicaría:

- Apertura de la clapeta de cierre hermético FV1 020
- Filtrado a través de dos baterías de filtros colocadas en paralelo integradas cada una por prefiltro y filtro absoluto.
- Circulación de aprox. 1.300 m³/h por la rama que contiene los filtros de carbón activado por la cual eventualmente puede circular un caudal mayor al especificado.
- Circulación de aprox.1.300 m³/h por la rama de by-pass a los filtros de carbón activado por la cual eventualmente puede circular un caudal menor al especificado.
- Apertura de la clapeta de cierre hermético FV2 020
- Cierre parcial de la persiana FV 034
- Ventilador de recirculación conmutado a estado de alta velocidad
- Apertura total de las persianas de entrada y salida del ventilador de recirculación que se encuentra operando.
- Cierre total de las persianas correspondientes al ventilador de recirculación de reserva.

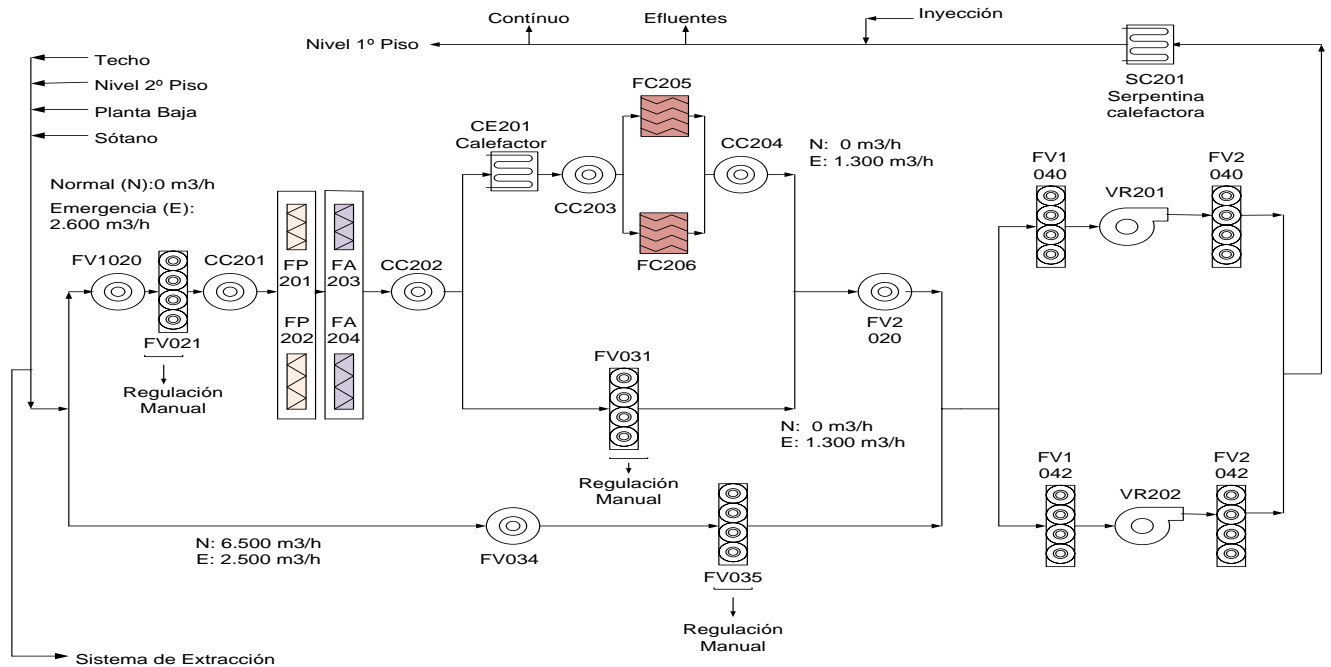


Fig. 13: Sistema de Recirculación

SISTEMA DE EXTRACCIÓN

Cumple la función de filtrar y expulsar parcialmente a la atmósfera el aire que se extrae del hall, boca de tanque, áreas de experimentación y recinto de desmineralización continuo.

El aire que se extrae del recinto del reactor, boca de tanque, tubos de irradiación y sector de desmineralización (3200m³/h) ingresa por la clapeta de cierre hermético FV60 para luego pasar por la batería de prefiltro y filtro absoluto donde cada filtro dispone de su presóstato que indica señales de colmatación y/o rotura de los mismos. Dicho caudal sigue curso atravesando la persiana FV68 de accionamiento manual desde sala de control de ser requerida. A partir de aquí puede tomar dos caminos según el estado en el que se encuentre: (Fig.14)

En estado normal se habilita de forma automática la clapeta FV073 y las persianas y ventilador de extracción que esté en funcionamiento permaneciendo cerradas las del ventilador de reserva.

En situación de emergencia, es decir cuando los monitores de área de boca de tanque detectan actividad gamma en chimenea de extracción superior al 100% del valor de operación normal o lo que es lo mismo 200-250 cuentas/10 segundos aproximadamente, el caudal del aire extraído se reduce a 1500 m³/h dado que al deshabilitarse el sistema de inyección es necesario extraer menos caudal para mantener la depresión en 17 mm.c.a. En este estado se cierra la clapeta FV073 permitiendo la circulación de aire por el calentador eléctrico evitando su ingreso con temperaturas inferiores a los 22°C además de evitar la condensación o adsorción de vapor mejorando la eficiencia del filtro de carbón activado. Entonces, se abre la persiana FV070 y el aire atraviesa el filtro de carbón activado y las persianas y ventilador de extracción que esté en funcionamiento permaneciendo cerradas las del ventilador de reserva.

Si se detecta actividad en chimenea de expulsión se cierra manualmente la clapeta FV060 para que ese aire recircule por los filtros de carbón activado del sistema de recirculación evitando o limitando las emisiones por chimenea.

Según la Guía de Procedimiento de Ensayo Funcional se considera como criterio de éxito del sistema de Extracción en estado de emergencia por actividad en boca de tanque cuando el caudal nominal se reduce a aproximadamente 1.500 m³/h circulando la totalidad del mismo a través de los filtros de carbón activado. Esto implica:

- Cierre de la clapeta de cierre hermético FV 073
- Ventilador de extracción (sin cambio en su estado operativo)
- Apertura total de las persianas de entrada y salida del ventilador de extracción que se encuentra operando.
- Cierre total de las persianas correspondientes al ventilador de extracción de reserva.

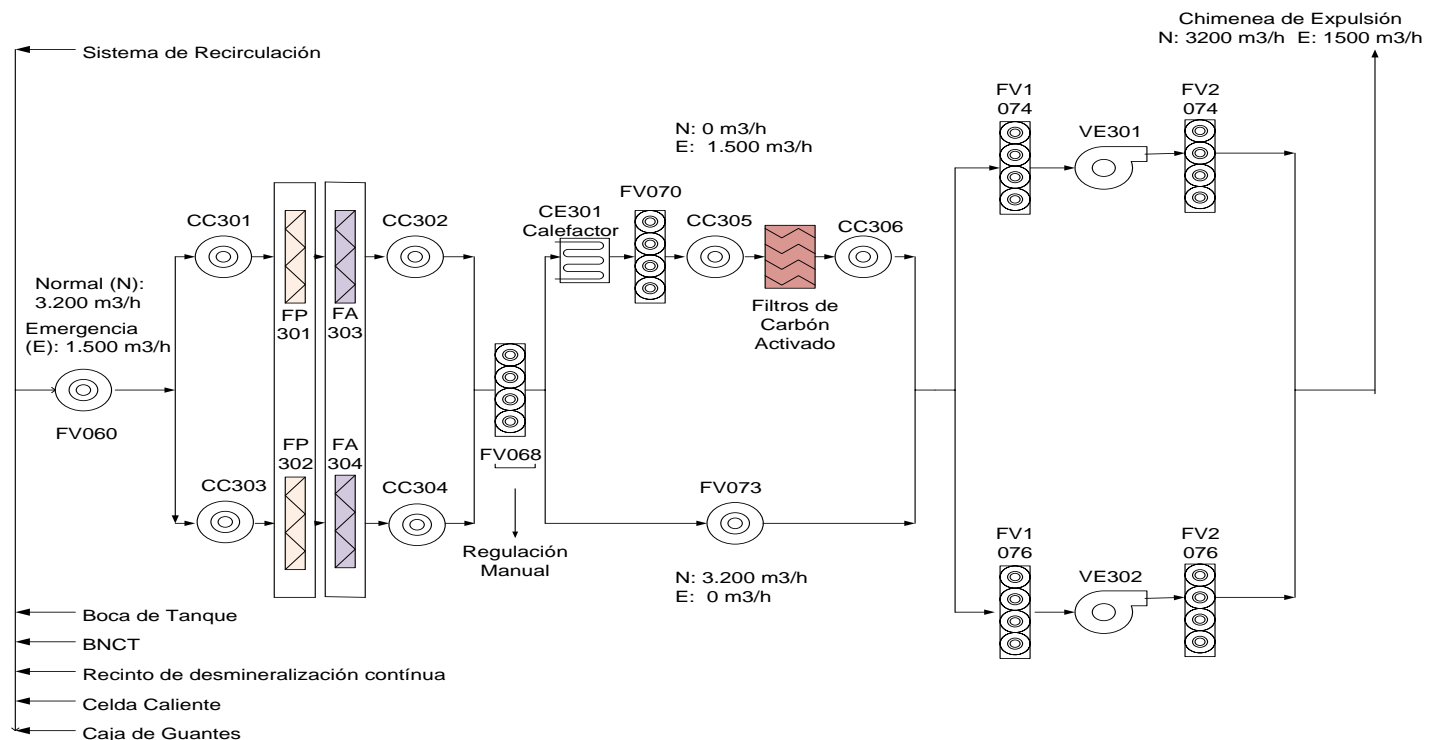


Fig.14: Sistema de Extracción.

1.3. ÁRBOL DE FALLAS

Luego de estudiar los sistemas de seguridad para lograr entender cómo podrían fallar es necesario elaborar los árboles de fallas para cada sistema de seguridad con el fin de obtener la confiabilidad de los mismos. De esta manera definimos árbol de fallas como un método lógico-deductivo que permite estudiar las posibles causas o eventos básicos que lleven al desarrollo de un evento no deseado[8] [11].

Cada uno de los eventos básicos o combinaciones de eventos que contribuyen a desencadenar el mal funcionamiento del sistema o evento tope, queda plasmado gráficamente en el árbol de fallas estableciendo un orden jerárquico de ocurrencia de dichos eventos a través de operadores lógicos.[7]

En este trabajo los escalafones descienden desde el evento tope a sucesos intermedios, básicos o no desarrollados por medio de ramificaciones y compuertas⁶ AND y OR. (Fig. 15)



Fig. 15: Compuertas AND y OR

Si el evento a analizar comprende una compuerta AND, para que éste suceda, todos los eventos desarrollados debajo de la misma deben ocurrir. [11] Este tipo de puerta se utiliza cuando existen redundancias o cuando los sucesos ocurren en simultáneo. [7] Por el contrario, la puerta OR se utiliza cuando para que falle el sistema debe fallar a menos un elemento. [12] También existen las puertas K/N (número de fallos que produce la falla del sistema/número de fallos totales del sistema) que especifican a partir de que cantidad de fallos consecutivos se produce el fallo del sistema global.[7]

Los eventos evaluados, en orden creciente, en los árboles de cada sistema fueron:[13][8] (Fig. 16)

- ✓ Eventos Básicos los cuales no requieren de mayor desarrollo debido a que llegaron a su límite de resolución por lo que se consideran sucesos de fallo básico;
- ✓ Evento Intermedio que resulta de la falla de una combinaciones de eventos de distintos niveles jerárquicos; y
- ✓ Evento Tope que representa la falla del sistema.

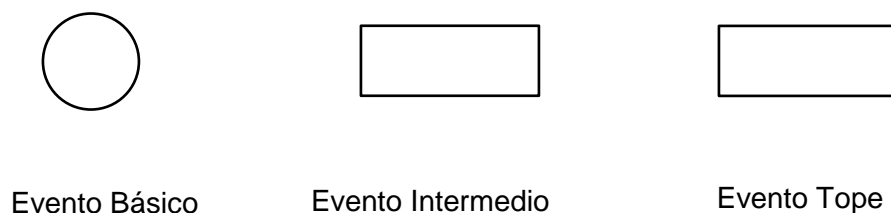


Fig.16: Eventos del Árbol de Fallas en orden creciente.

Una vez construido el árbol se pueden realizar análisis cualitativos y cuantitativos. El primero consiste en aplicar álgebra booleana para reducir a un mínimo conjunto de fallas críticas (CMC – Conjuntos Mínimos de

⁶ Compuertas Lógicas son dispositivos electrónicos que realizan funciones booleanas y no contienen contactos móviles. [14]

Corte) que al producirse hacen que se produzca el evento tope, y el segundo caso consiste en calcular la probabilidad de ocurrencia del evento tope a partir de la probabilidad de ocurrencia de los eventos básicos y no desarrollados postulados en el árbol.[15] La evaluación cuantitativa será detallada en el apartado 1.5 y la cualitativa será explicada a continuación.

1.4. ANÁLISIS CUALITATIVO-ALGEBRA BOOLEANA – CONJUNTO MÍNIMO DE CORTE

A partir del árbol de falla que se desea estudiar se realiza un análisis cualitativo para determinar la mínima combinación de sucesos que produzcan el evento que se desea evitar. Esto se logra utilizando el álgebra de Boole que convierte la estructura del árbol a ecuaciones lógicas.[15] (Tabla 2)

El Álgebra booleana es un sistema matemático constituido por: [16] [17]

- ✓ un conjunto –por ejemplo “B”- con al menos 2 elementos.
- ✓ dos operaciones binarias que son: la suma u operación OR y el producto u operación AND.
- ✓ una operación unitaria, la complementación.

Los elementos que conforman el conjunto “B” deben cumplir con los siguientes axiomas o proposiciones:

La suma y el producto lógico son operaciones conmutativas	$x + y = y + x;$ $x y = y x$	leyes conmutativas
Cada operación es distributiva respecto a la otra	$x + y z = (x + y) (x + z);$ $x (y + z) = x y + x z$	leyes distributivas
El conjunto B tiene dos elementos 0 y 1, tal que:	$x + 0 = x;$ $x \cdot 1 = x$	leyes modulativas
Toda “x” tiene un complemento o negación	$x + x' = 1;$ $x \cdot x' = 0$	leyes del complemento

Tabla 2: Axiomas a cumplir un conjunto.

Para un mejor entendimiento de la aplicación del álgebra de Bool se puede hacer una analogía con el álgebra de conjuntos⁷ y el álgebra de proposiciones⁸ en lógica ya que todas éstas cumplen con las mismas leyes en cuanto a la aplicación de sus operaciones: [16] (Tabla 3)

⁷ Conjunto: reunión de objetos o elementos definidos y diferenciables entre sí. [18]

⁸ Proposición: enunciado lógico al que se le puede asignar un valor de verdad (1) o falsedad (0). [18]

Álgebra booleana	Suma $x + y$	Producto $x * y$
Conjuntos	Unión $A \cup B$	Intersección $A \cap B$
Lógica	Disyunción $p \vee q$	Conjunción $p \wedge q$
Compuertas lógicas	OR	AND

Tabla 3: Analogía del álgebra de Bool con álgebra de conjuntos y lógicas.

Entonces, como se dijo en un principio, la suma o el producto están asociados al tipo de compuerta propuesta en el árbol. Las operaciones que se contemplan en este trabajo son: [16]

-Operación OR también llamada *suma* lógica corresponde a las operaciones de unión de conjuntos y disyunción en álgebra de proposiciones, es decir que todos los eventos que están colgados de una compuerta OR deben sumarse.[12]

-Operación AND o *producto* lógico correspondiente a las operaciones de intersección de conjuntos y de conjunción de proposiciones en lógica. Quiere decir que los sucesos que conformen una compuerta AND deben multiplicarse entre sí.[12]

En función de cada compuerta del árbol se definen grupos de eventos que siguiendo las ramificaciones conformaran el evento tope. Por ejemplo, siguiendo el árbol de la Fig.17 [8]

1. El evento tope (T) ocurre por los evento que se encuentran bajo la compuerta OR los cuales son el evento básico A1, el grupo de eventos G1 y el evento básico A2, es decir $T = A1 + G1 + A2$
2. El grupo de eventos G1 ocurre debido al conjunto de eventos G2 o el conjunto G3, bajo una compuerta OR $G1 = G2 + G3$
3. Para que ocurra el evento G1 se deben definir los grupos G2 y G3, ambos ocurren por sucesos básicos unidos a través de compuertas AND, esto es $G2 = A3 * A4$; $G3 = A1 * A5$
4. Reemplazando todos los grupos, el evento tope se produce debido a la ocurrencia de los siguientes sucesos $T = A1 + A3 * A4 + A1 * A5 + A2$

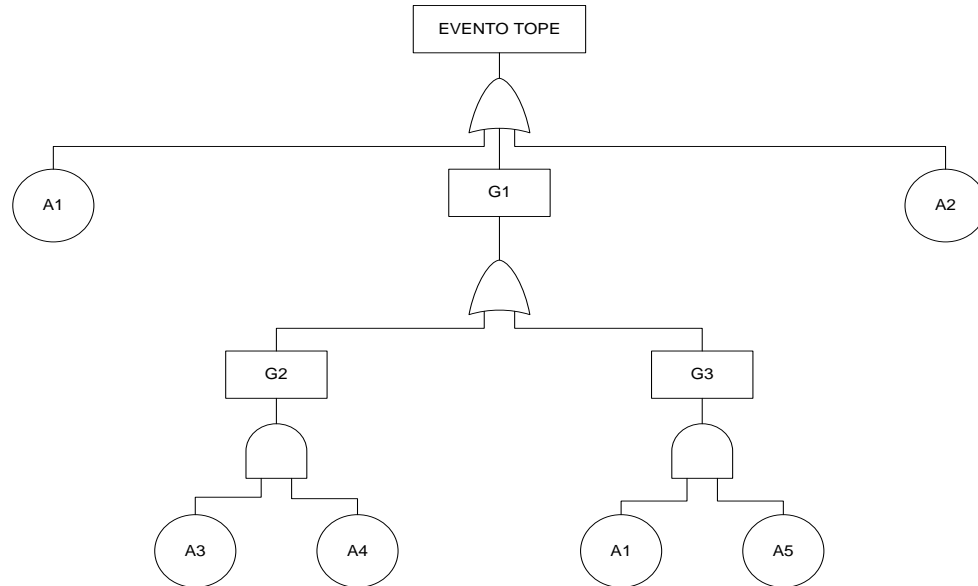


Fig.17: Ejemplo de árbol de falla.

Todos los eventos postulados en el árbol que va a producir el evento tope ($T = A1 + A3 * A4 + A1 * A5 + A2$) pueden ser reducidos a un conjunto que contenga el mínimo número de eventos básicos posibles que hagan que ocurra el evento tope o falla del sistema. Este número mínimo de eventos básicos es llamado Conjunto Mínimo de Corte (CMC) y pueden ser estimados a partir de propiedades o leyes del álgebra booleana [12][16][17](Tabla 4)

Leyes asociativas	$x+(y+z) = (x+y)+z = x+y+z$
	$x(y*z) = (x*y)z = x*y*z$
Leyes de idempotencia	$x+x = x$
	$x*x = x$
Leyes de acotación	$x+1 = 1$
	$x*0 = 0$
Leyes de absorción	$x+x*y = x$
	$x(x+y) = x$

Leyes de involución	$(x')' = x$
	$(0')' = 0$
	$(1')' = 1$
Leyes de D'Morgan	$(x+y)' = x' * y'$
	$(x * y)' = x' + y'$

Tabla 4: Propiedades del Álgebra de Bool.

Entonces a partir del ejemplo planteado, donde la falla del sistema es $T = A1 + A3 * A4 + A1 * A5 + A2$, aplicando para este caso la ley de absorción el CMC quedaría conformado por $T = A1 + A3 * A4 + A2 =$ CMC. [12]

Luego, solo queda calcular las probabilidades o tasas de falla para comenzar con la evaluación cuantitativa explicada en el siguiente apartado.

1.5. ANÁLISIS CUANTITATIVO-CONFIABILIDAD

1.5.1. FALLA

Cuando un sistema⁹ o componente¹⁰ no realiza la función para la que fue diseñado de manera satisfactoria, bajo determinadas condiciones de contorno y en relación a un tiempo especificado, se dice que ese ítem *Falla* y el tiempo de falla (T) es el tiempo que transcurre hasta que se produjo la falla del mismo (Fig. 18). [2] [4]

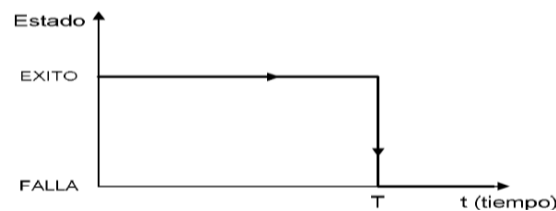


Fig.18: Transición de Éxito a Falla de un componente.

Las distintas clasificaciones de falla se pueden superponer parcialmente.

⁹ Sistema: conjunto finito de elementos físicos discretos que desempeñan una o varias funciones de interés. [8]

¹⁰ Componente: partición conveniente del sistema que facilita su estudio.[8]

1.5.2. CLASIFICACIÓN DE FALLA SEGÚN CONDICIÓN DE CONTORNO DEL COMPONENTE

Ya que no sabemos en qué momento va a ocurrir la falla de un equipo, esa transición de un estado bueno a uno fallado ocurre en un tiempo aleatorio indicando cuanto vive un componente, por lo tanto es necesario especificar sus condiciones de contorno. Se diferencia en condiciones Primarias, Secundarias y de Comando. [4] [5]

- ✓ Las *Primarias* son fallas que ocurren cuando el dispositivo está funcionando dentro de sus condiciones nominales de trabajo.
- ✓ Las *Secundarias* son fallas que suceden cuando el funcionamiento del dispositivo es fuera de sus condiciones nominales provocando su degradación e imposibilidad de recuperación a su estado original.
- ✓ Y las de *Comando* son fallas por señal inadecuada de comando.

1.5.3. CLASIFICACIÓN DE FALLA SEGÚN MODELO DE FALLA

Se pueden discriminar en Reparables y No Reparables. [10]

- ✓ *Reparable* son sistemas o componentes que una vez que funcionan y fallan puede ser restaurados o recuperados mediante técnicas de mantenimiento. No se considera dentro de éste el reemplazo del componente o sistema completo.
- ✓ *No Reparable* son sistemas o componentes que ante la falla deben ser descartados [6] puesto que pueden sufrir solamente una única falla a lo largo de su vida ya sea por razones técnicas, económicas o porque dadas las circunstancias de la falla, ésta puede devenir en un daño aún mayor por lo que no tiene sentido repararla.

1.5.4. CLASIFICACIÓN DE FALLA SEGÚN ESTADO FUNCIONAL

El estado funcional en el que se produce la falla, o lo que es lo mismo, el intervalo de tiempo en el que ocurren es otra manera de discriminarlas. Estas pueden ser:[2] [4]

- ✓ Falla mientras están *en espera* listo para funcionar o entrar en operación.
- ✓ Falla durante el tiempo de *operación*, dado que el arranque tuvo éxito.
- ✓ Falla cuando se les *demanda* su actuación o cambio de estado (ej. de espera pasa a operación fallando en arranque, estando en funcionamiento se demanda que pare etc.)

1.5.5. CALCULO DE CONFIABILIDAD

1.5.5.1. HIPÓTESIS DEL MODELO PARA EL CÁLCULO DE CONFIABILIDAD

Considera: [4]

- ✓ Modelo de dispositivos bivalente, es decir que presentan estados funcionales basados en el éxito o falla del mismo.
- ✓ Existencia de independencia entre dispositivos.

- ✓ Dispositivos que para su actuación necesitan de una fuente de energía externa y/o señal de entrada contemplando además las condiciones de contorno-Dispositivos Activos- y dispositivos que no necesitan de dicha fuente-Dispositivos Pasivos-.
- ✓ Componente en estado de éxito en el instante inicial ($t=0$).
- ✓ No se consideran fallas de cusa común

1.5.5.2. DESARROLLO DE CONCEPTOS

Un sistema o componente además de cumplir con las especificaciones técnicas para la que fue diseñado, debe desempeñarse de manera eficiente a lo largo de su vida útil. Para ello es preciso estudiar la *Confiabilidad* ($R(t)$) del mismo, definiéndose a éste como la probabilidad de que un ítem o dispositivo-llámese sistema o componente-logre cumplir su función requerida de manera satisfactoria durante un intervalo de tiempo establecido-llamado tiempo de misión (t)- y bajo condiciones de uso definidas. [1]

Entonces se puede definir Inconfiabilidad ($F(t)$) como la probabilidad que un componente falle antes del tiempo de misión (t) [4]:

$$F(t) = P(T \leq t)$$

Y a la Confiabilidad como la probabilidad que falle después del tiempo de misión:

$$R(t) = P(T > t) \quad (1)$$

Dado que ($T \leq t$) y ($T > t$) son sucesos que no tienen elementos en común (disjunto), entonces:

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

Siendo la *Densidad de Probabilidad de Falla* ($f(t)$) la probabilidad de que un ítem falle en un intervalo de tiempo entre “ t y $t+dt$ ”, [9]

$$f(t) \equiv \frac{dF(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P(t < T \leq t + \Delta t) \quad (2)$$

Recordando que,

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

Entonces la Función de Densidad de falla queda simplificada a:

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (3)$$

Ahora bien, si un el dispositivo llega al instante “ t ” - período de tiempo referenciado respecto al cero [6] - en perfecto funcionamiento y falla en el período siguiente entre “ t y $t+dt$ ”, la probabilidad condicional de falla dado el éxito se denomina *Tasa de falla* (λ) y se entiende como el número de fallas que ocurren durante un tiempo transcurrido. [1][4] [7]

$$\lambda(t) \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P \frac{(t < T \leq t + \Delta t)}{T > t} \quad (4)$$

Reordenando y reemplazando 1, 2, 3 en 4:

$$\lambda(t) \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P(t < T \leq t + \Delta t) * \frac{1}{P(T > t)}$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = - \frac{\frac{dR(t)}{dt}}{R(t)}$$

En este trabajo se analiza el modelo No Reparable. En función de ello y volviendo a la fórmula de tasa de falla, al integrar y considerar que para $t=0$ $R(t)=1$ =componente nuevo, y por lo tanto en el instante inicial $t=0$ el componente se encuentra en estado de éxito [8], puedo calcular la confiabilidad:

$$\lambda(t) = - \frac{dR(t)}{dt} * \frac{1}{R(t)}$$

Despejando:

$$\lambda(t)dt = - \frac{dR(t)}{R(t)}$$

Integrando ambos miembros:

$$- \int_0^t \lambda(t)dt = \int_1^{R(t)} \frac{dR(t)}{R(t)}$$

$$-\lambda * t = \ln R(t)$$

Obtengo la función de confiabilidad:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (5)$$

Si $\lambda t \ll 1$:

$$R(t) \equiv 1 - \lambda t \quad (6)$$

Y por ende:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \equiv \lambda t$$

Donde:

$R(t)$: Confiabilidad de un equipo en un tiempo t dado.

$F(t)$: Inconfiabilidad de un equipo en un tiempo t dado.

e : constante Neperiana

λ : tasa de falla

t: tiempo

La *Disponibilidad* ($A(t)$) es la confianza de un sistema o componente que sufrió mantenimiento para operar satisfactoriamente en un tiempo dado. [1] Su complemento es la *Indisponibilidad* ($Q(t)$) entendida como la probabilidad de que el equipo falle quedando no disponible en un cierto instante de tiempo y además no se realice la reparación dentro del tiempo establecido. [3] [7]

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

Es decir que en líneas generales la Confiabilidad depende de características tecnológicas del componente y la Disponibilidad de la logística para su reparación verificándose que la Disponibilidad siempre será mayor que la Confiabilidad dado que producto del mantenimiento que se realice en el componente éste puede desarrollar su función de manera adecuada por más tiempo. La única salvedad que no sigue esta premisa es en el caso de componentes No Reparables ya que dado a que no existe la posibilidad de mantenimiento y poner el componente en servicio la Confiabilidad y la Disponibilidad son equivalentes. [4]

$$R(t) = A(t)$$

Entonces, para calcular la confiabilidad de componentes No Reparables: [10]

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

Expresado de otro modo:

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

La indisponibilidad ($Q(t)$) en los distintos estados funcionales y bajo la condición de componente no reparable se calcula de la siguiente manera: [3]

✓ *En espera*

$$Q(tm) = 1 - e^{-\lambda_e * tm} \cong \lambda_e * tm$$

$Q(tm)$: Indisponibilidad de un equipo en espera.

λ_e : tasa de falla en estado de espera, es decir, número de fallos que tiene un equipo que está en espera dividido en el tiempo de espera en el que suceden los fallos.

tm : tiempo de misión

✓ *en operación*

$$Q(tm) = 1 - e^{-\lambda_o * tm} \cong \lambda_o * tm$$

$Q(tm)$: Indisponibilidad de un equipo en operación.

λ_o : tasa de falla en operación, es decir, número de fallos que tiene un equipo cuando está en operación dividido en el tiempo de operación en el que suceden los fallos.

tm : tiempo de misión

- ✓ cuando se demanda su actuación.

$$Q(d) = p$$

Q(tm): Indisponibilidad por demanda, o dicho de otro modo, es el número de fallos que tiene un equipo al ser demandada su actuación dividido por el número de demandas efectuadas.

Es decir que una vez calculada la indisponibilidad para cada ítem o dispositivo y en función del conjunto mínimo de corte determinado para cada sistema se calcular la indisponibilidad o inconfiabilidad de dicho sistema.

1.6. OBJETIVO

- ✓ Análisis de Confiabilidad a través del método de árbol de falla de sistemas importantes para la seguridad del reactor RA-6, los cuales son:
 - Sistema de Extinción
 - Sistema de Refrigeración por Convección Natural
 - Sistema de Rompesifones
 - Sistema de Protección del Reactor
 - Sistema de Ventilación

1.7. ALCANCE

Este trabajo refiere al análisis cualitativo y cuantitativo del cumplimiento de las funciones de seguridad en el marco de diseño conceptual de los sistemas importantes para la seguridad del reactor RA-6.

CAPÍTULO 2

2. ARBOL DE FALLAS

2.1 ÁRBOL DE FALLA DE LOS SISTEMAS DE SEGURIDAD DEL REACTOR RA-6

A partir del estudio de los distintos sistemas de seguridad el reactor RA-6 se desarrolla para cada uno de éstos un árbol de fallas definiendo como evento tope no deseado el incumplimiento del criterio de éxito de cada sistema.

Dado que los sistemas de seguridad están para prevenir o mitigar las consecuencias resultantes de una falla, mal función o mala operación del reactor (AR 4.2.2), la falla de estos sistemas es estudiada principalmente al ser demandados o a la espera de su ejecución.

2.1.1 SISTEMA DE EXTINCIÓN

Según el Informe de Seguridad (capítulo 5, sección 4.5) la parada segura del reactor RA-6 es suficiente con la inserción de al menos tres de las cuatro barras de seguridad, es decir que el sistema puede fallar si fallan al menos dos barras.

El siguiente árbol describe los eventos que podrían ocasionar la falla del sistema de extinción considerando que dos de las cuatro barras fallan - simbolizadas en compuerta OR del tipo K/N - no permitiendo la parada segura. Las fallas postuladas que lleva a que se desencadene el evento tope son para cada barra de control la falla en su inserción al núcleo o la falla en la generación y transporte de señal del Sistema de Protección del Reactor (SPR) que altere el pedido de SCRAM representada bajo una compuerta OR (Fig.19).

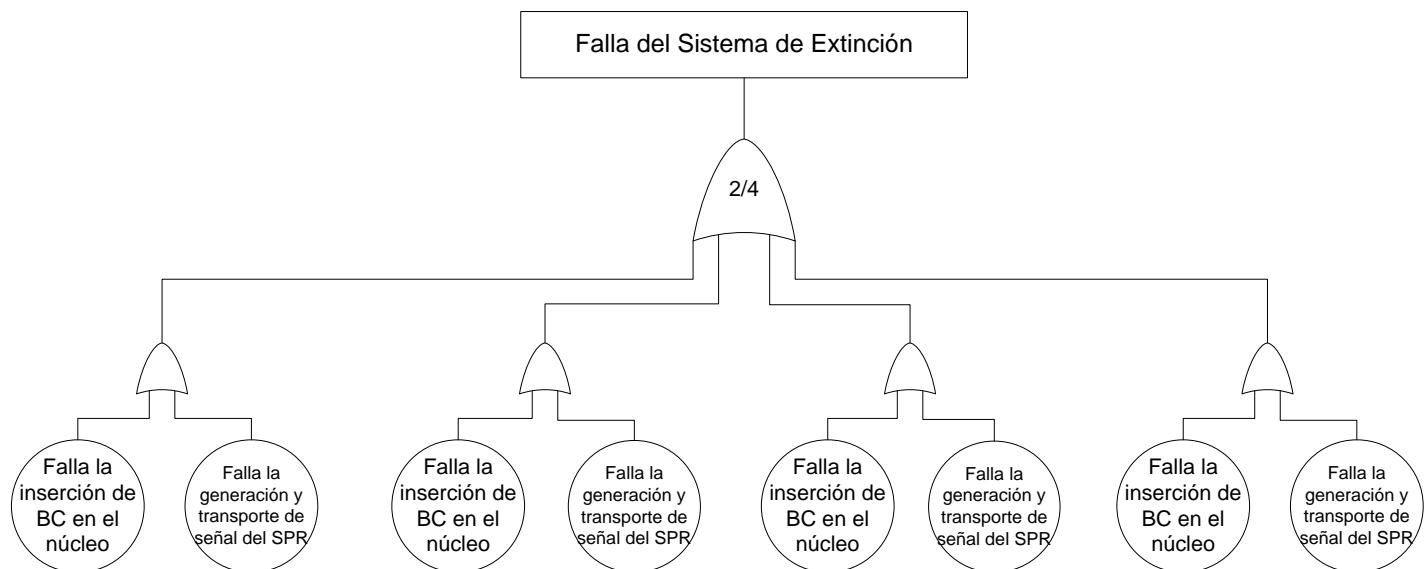


Fig.19: Árbol de falla del Sistema de Extinción.

2.1.2 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR CONVECCIÓN NATURAL

La Refrigeración por convección natural falla si la clapeta no se abre. De esta manera no permite la inversión de caudal que favorezca la refrigeración a baja potencia (menor a 200 kW) o cuando está detenido el reactor. Al ser un componente pasivo no cuenta con más ramificación que complemente su falla (Fig.20).

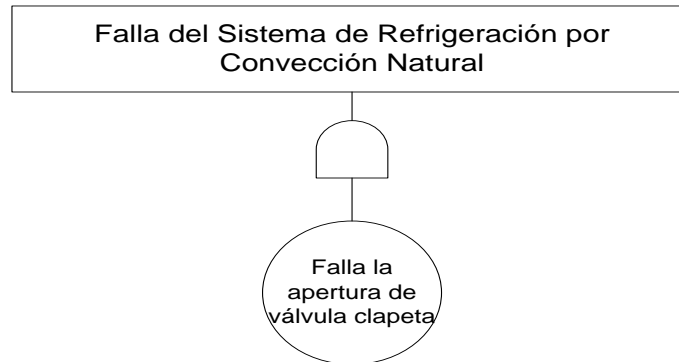


Fig.20: Árbol de falla del Sistema de Refrigeración por Convección Natural.

2.1.3 SISTEMA DE ROMPESIFONES

El Sistema de Rompesifones es un sistema pasivo y redundado representado por una compuerta AND ya que dicha redundancia permite la actuación en simultáneo de las válvulas frente a un evento accidental evitando la pérdida del nivel de inventario biológico. La pasividad permite la no ramificación en la base del árbol (Fig. 21).

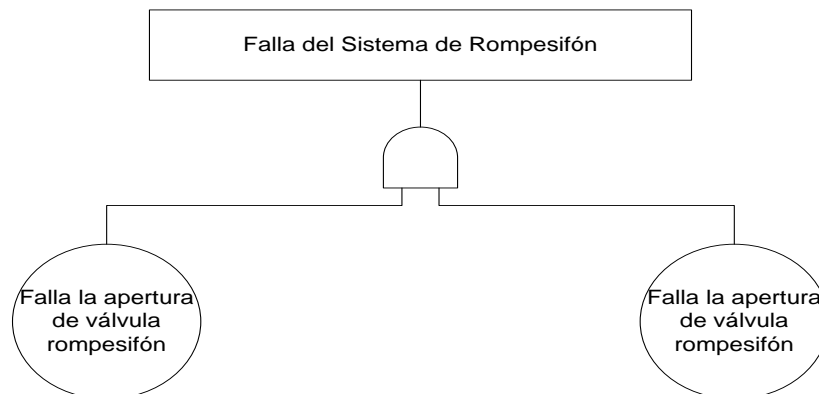


Fig.21: Árbol de Falla del Sistema de Rompesifones.

2.1.4 SISTEMA DE PROTECCIÓN DEL REACTOR (SPR)

La arquitectura del Sistema de Protección del Reactor cuenta con dos trenes independientes y la falla de un Tren no implica SCRAM según IT-06NBX-463 Rev.0. Ambos trenes comparten los módulos 501 Generador

de Secuencia y módulo 531 Energización de Electroimanes. Además cada Tren está conformado por dos módulos 511 que realizan votación 2/3 y un módulo 521 detector de SCRAM en lógica 1/1.

El modelo de árbol de falla propuesto contempla la falla del SPR bajo una compuerta AND debido a la independencia de los trenes. Los eventos que provocan la falla tope son debidos a los módulos compartidos por ambos trenes - Generador de Secuencias y energización de electroimanes - con la denominación "Falla en la generación y Transporte de señal del Tren I/II". Para cada tren se estudia las fallas en las señales de entrada y salida del módulo 511 de votación 2/3. Estas señales están representadas en una compuerta OR por la falla en la fuente de alimentación de Instrumentación y Control y por la falla en el funcionamiento del instrumental de campo.

No se incluye el efecto de la falla del módulo detector de SCRAM porque actúa en lógica 1/1, es decir que aunque éste falle el SPR se ejecutará satisfactoriamente (Fig. 22).

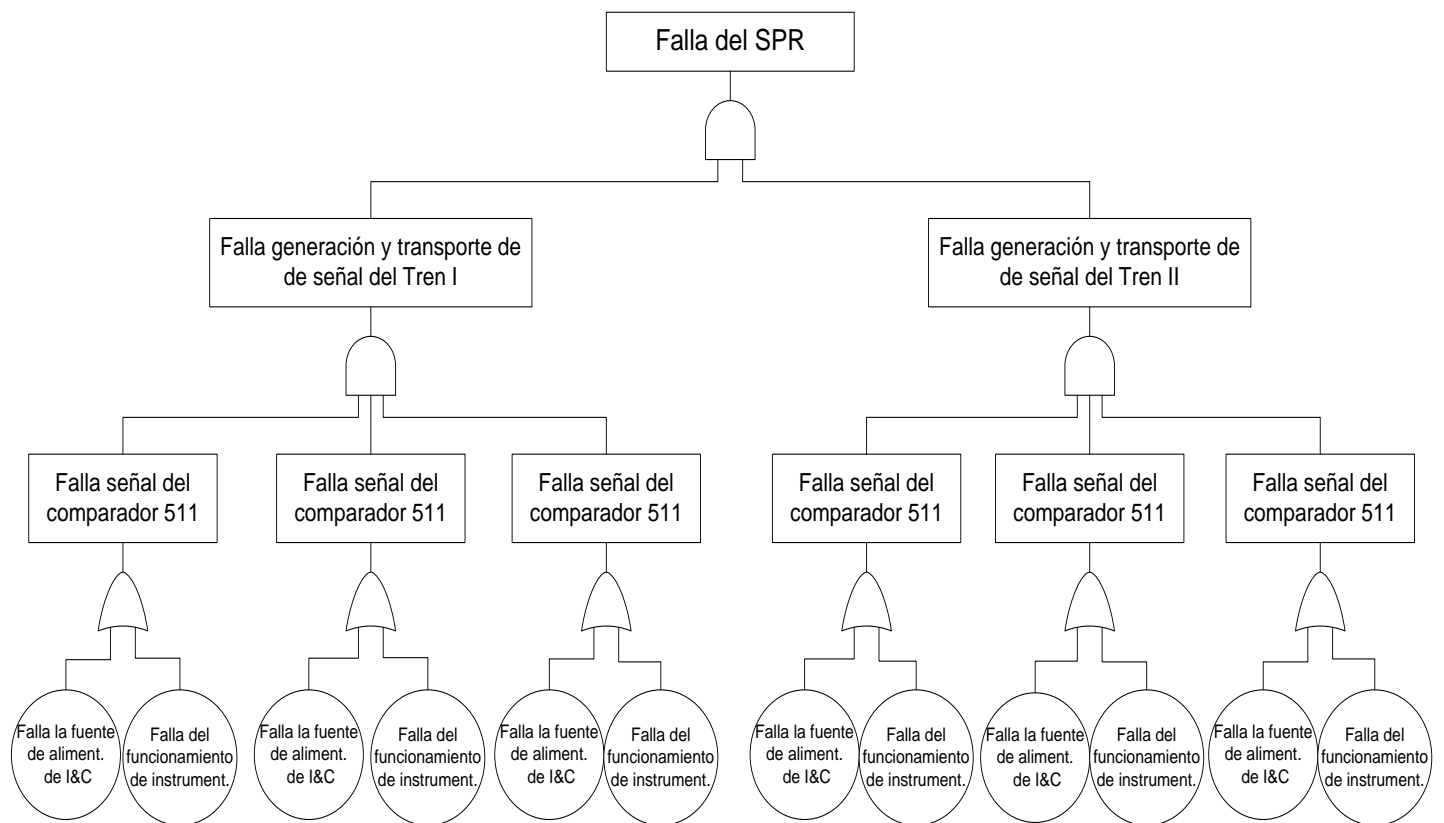


Fig. 22: Árbol de Falla del Sistema de Protección del Reactor (SPR).

2.1.5 SISTEMA DE VENTILACIÓN

La falla del Sistema de Ventilación se analiza en estado de emergencia y se considera como el producto de las fallas en los Sistemas de Recirculación y de Extracción ya que en este estado el sistema de Inyección se detiene automáticamente (Fig. 23).

Dado que en caso de detectarse alta tasa en chimenea el aire se recircula y luego es extraído, se simboliza en una compuerta AND la falla de ambos sistemas.

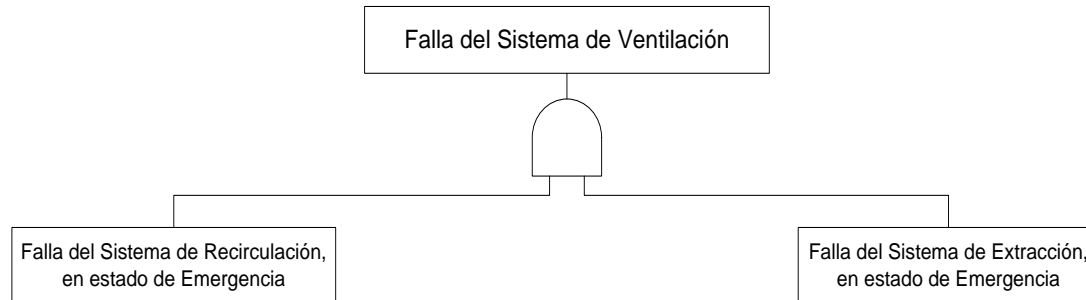


Fig.23: Árbol de falla del Sistema de Ventilación

La falla del Sistema de Recirculación por la falla de al menos algunos -compuerta OR- componentes tales como clapetas, persianas, filtros de carbón activado y ventilador. Las clapetas y persianas que actúan neumáticamente pueden fallar debido al mal funcionamiento de la fuente de alimentación y del compresor-compuerta AND-.

El ventilador puede no generar un aumento de velocidad del aire que circula por los conductos de ventilación como consecuencia de que la fuente de alimentación falle o porque el contenedor o carcasa del ventilador falla -Compuerta OR- (Fig. 24).

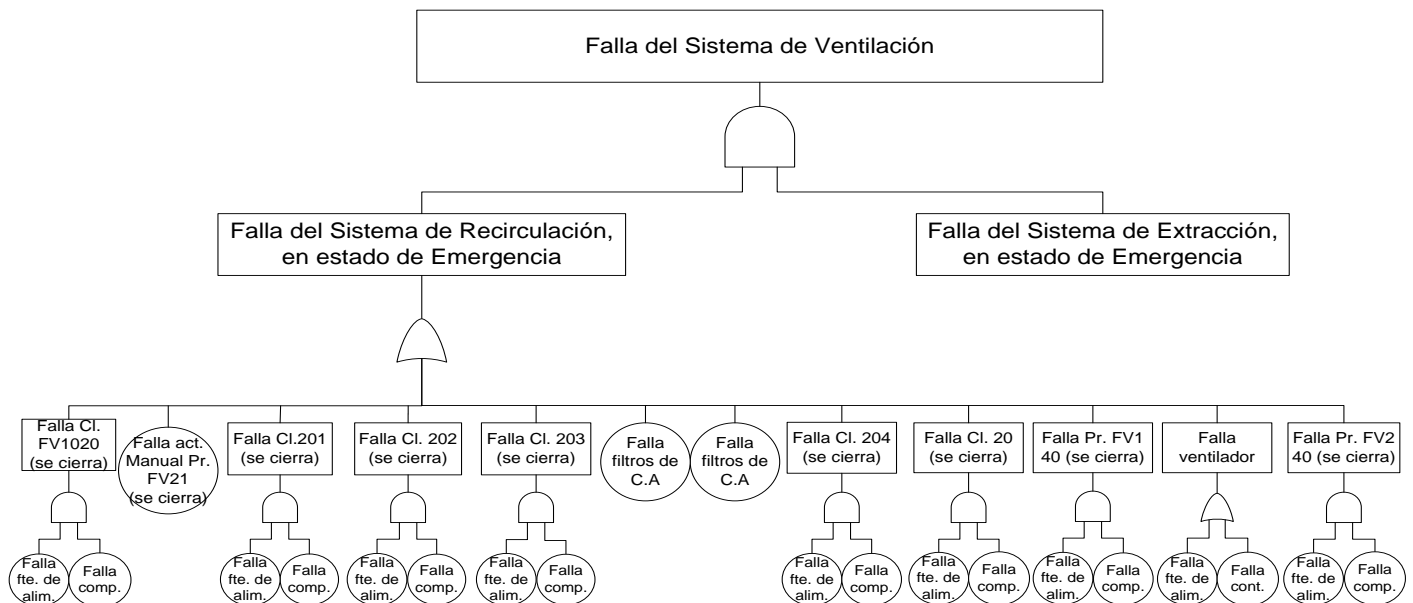


Fig.24: Árbol de falla del Sistema de Ventilación-Sistema de Recirculación.

De igual modo, la falla del sistema de Extracción en estado de emergencia puede suceder por la falla de al menos algunos de los siguientes componentes, clapetas, persianas, filtros de carbón activado y ventilador

(Fig. 25). Las clapetas y persianas de actuación neumática así como el ventilador, fallan contemplando los mismos eventos citados en el Sistema de Recirculación.

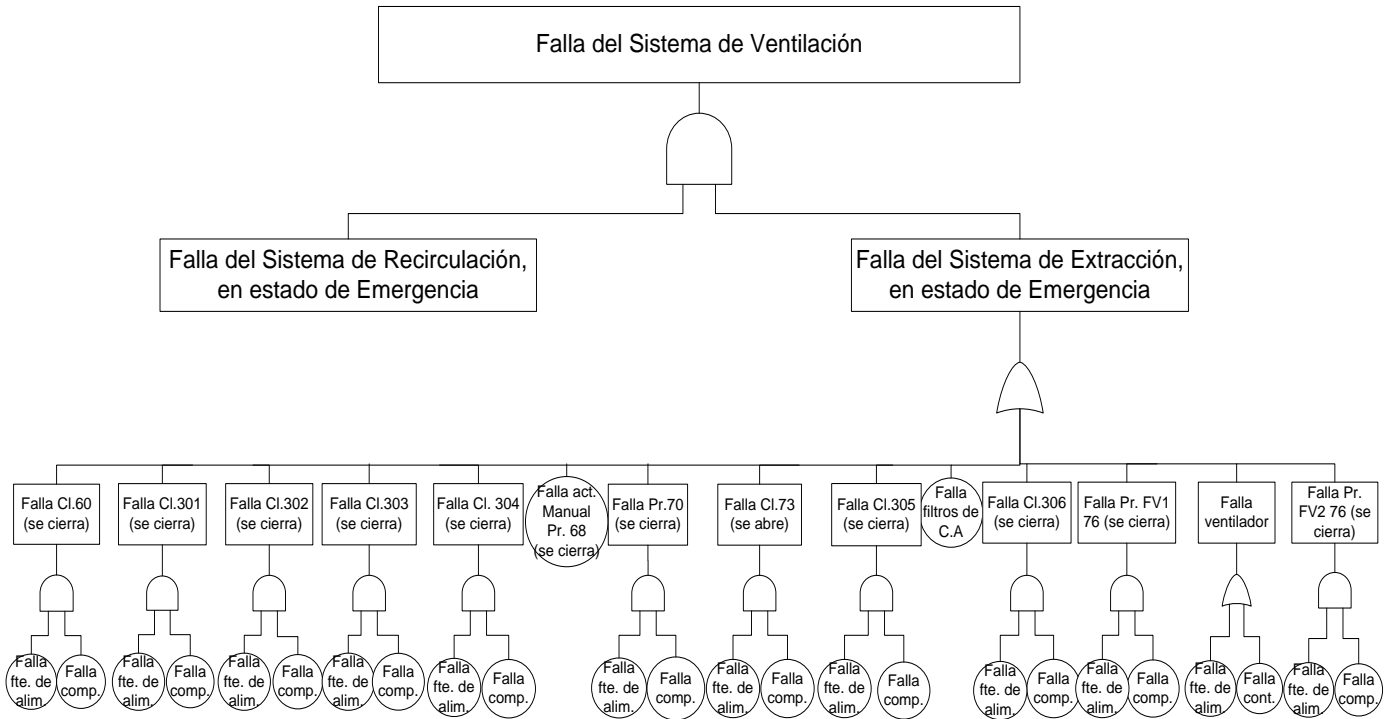


Fig. 25: Árbol de falla del Sistema de Ventilación-Sistema de Extracción.

Si bien los calefactores cumplen con la función de aumentar la eficiencia de los filtros de carbón activado no fueron considerados en el análisis ya que su falla no afecta directamente la seguridad radiológica y nuclear en situación de emergencia. Por el mismo motivo no se contempló el banco de prefiltros y filtros absolutos.

Para ambos sistemas se analizó una de las dos ramas redundantes de persianas y ventiladores ya que con un ventilador y una persiana antes y posterior a éste es suficiente para cumplir con la función de regular el caudal de aire de circulación además de simplificar el estudio.

CAPÍTULO 3

3 PROBABILIDAD DE FALLA – TASA DE FALLA

3.1 DETERMINACIÓN DE PROBABILIDAD DE FALLA – TASA DE FALLA

Con el árbol de falla desarrollado para cada sistema de seguridad del reactor RA-6 se puede determinar la tasa de falla o probabilidad de falla de los componentes o sistemas. Para esto es necesario el uso de tablas tales como TECDOC 930¹¹ para reactores experimentales y en caso de no llegar a una aproximación con ésta se recurre a la tabla PSA Pack¹² para reactores de potencia.

La primera tabla brinda información de la falla del componente o sistema al ser demandado y la segunda proporcionar información de fallas en los distintos estados operacionales además de fallas a la demanda.

Cada tabla cuenta con un formato distinto pero en términos generales los ítems analizados en las tablas fueron categoría, grupo o tipo, subgrupo o subtipo, modelo de reactor, modos de falla, descripción de detalles, modo de operación y modos de falla según corresponda.

CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LA VARIABLE TASA O PROBABILIDAD DE FALLA SON:

- Utilizar, en primera instancia, la tabla TECDOC 930 y en caso de no lograr caracterizar el componente o sistema con la misma se recurre a la tabla PSA Pack.
- Analizar el estado en que se produce la falla de los componentes. En caso de contar con varias opciones de falla de un mismo sistema o componente - o de características similares - como principal aproximación se considera la falla al ser demandada la ejecución del mismo. En caso que esta opción no sea posible, una variante sería optar por la falla generada en espera de cumplir su función y en último lugar se consideraría la falla en operación dado el éxito del arranque.
- Para ser más conservativo el modelo de estado que se contempla en espera u operación es no reparable.
- Se toma generalidades en cuanto a especificaciones técnicas de diseño.
- De ser posible se discrimina en tipo de reactor MTR.
- Entre opciones similares de tasa o probabilidad de falla se selecciona el de mayor valor para aplicar un criterio conservativo.

3.1.1 SISTEMA DE EXTINCIÓN

Inserción de Barras de Control en el núcleo

Se considera que al ser demandada la actuación del sistema de extinción las barras de control falla en su inserción, por tal motivo se utilizó el modelo para el estado operativo a la demanda y se determinará la probabilidad de falla con la tabla TEDOC 930.

Generación y Transporte de la señal del SPR

¹¹ IAEA.TECDOC-930. Generic component reliability data for research reactor PSA.

¹² IAEA. TECDOC-478. Component reliability data for use in probabilistic safety assessment.

La falla en la generación y transporte de la señal del SPR está determinada en función de la falla en los módulos computacionales involucrados para tal fin para lo cual se recurrió a la tabla PSA. No fue posible separar la falla producida en la generación de la falla de su transporte debido a los escasos de datos. Si bien la tabla PSA Pack presenta el mismo valor para los distintos estados de falla, se considera “falla en espera” puesto que es uno de los criterios antes mencionados.

3.1.2. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR CONVECCIÓN NATURAL

La clapeta actúa de modo pasivo por efecto de gravedad al ser apagadas las bombas del circuito primario. Por tal motivo la falla que se evalúa es la de apertura ante la demanda según TECDOC 930.

3.1.3 SISTEMA DE ROMPESIFONES

Las dos válvulas rompesifones actúan de modo pasivo y la falla fue determinada como falla a la apertura cuando es demandada según TECDOC 930.

3.1.4 SISTEMA DE PROTECCIÓN DEL REACTOR (SPR)

El alcance considerado del sistema de protección es desde los canales de activación hasta la demanda de la señal de desenergizar electroimanes.

Instrumentación

Con la tabla PSA Pack se estimó la falla de la instrumentación en operación.

Fuente de alimentación de instrumentación y control

La probabilidad de falla de las fuentes de alimentación se determinó a partir de la tabla TECDOC 930 analizando los ítems tales como otros equipos eléctricos, fuente de alimentación de instrumentación y control.

3.1.5 SISTEMA DE VENTILACIÓN

Se toma como criterio de unificación a las clapetas y las persianas como mismo componente ya que no se cuenta con datos para estas últimas. Si bien ambas presentan distinto funcionamiento, la primera obturando o dejando libre el paso de aire y la segunda regulando el caudal, se consideraron a estas como válvulas que solo se diferencian en su modo de accionamiento sea manual o neumático.

Clapetas y Persianas de actuación neumática

Las clapetas y persiana actuadas de manera neumática se considera que puede fallar debido a la falla de la fuente de alimentación y el compresor, el primero se obtuvo de la tabla TECDOC 930 y la segunda de la tabla PSA Pack y ambos fallan a la demanda.

Persianas actuadas manualmente

Para las persianas actuadas manualmente se consideró la tabla PSA Pack donde la falla es en el cambio de posición al ser demandada.

Ventiladores

Se postula que la falla de los ventiladores puede producirse por la falla en la fuente de alimentación obtenida de la tabla TECDOC 930 o por la falla del contenedor o carcasa del ventilador utilizando la tabla PSA Pack, ambos bajo el modo de falla a la demanda.

Filtros

En cuanto a los filtros, éstos fueron analizados en base a PSA Pack fallando al ser demandado ya sea por colmatación o taponado.

CAPÍTULO 4

4 ANÁLISIS CUALITATIVOS Y CUANTITATIVOS

Una vez analizada las fallas de los sistemas y componentes se procede a calcular la indisponibilidad de los mismos según el estado y el modo en que se produzca la falla.

CONSIDERACIONES

- ✓ En función de las compuertas del árbol de falla y aplicando la lógica de Bool se estiman los conjuntos mínimos de corte (CMC) de cada sistema de seguridad.
- ✓ Con los CMC se calcula la indisponibilidad de cada evento. En principio se logra diferenciando el estado en el que se produce la falla-de acuerdo al árbol desarrollado para cada sistema descrito en el Capítulo 2- para identificar la fórmula a utilizar.
- ✓ Se considera para todos los estados funcionales en los que se produce la falla el modo no reparable como criterio conservativo.
- ✓ Cuando se requiera la tasa de falla (λ) para el cálculo de indisponibilidad se estima un tiempo de misión de 24 horas que es el tiempo promedio en el que el reactor está operando.
- ✓ Con los valores de indisponibilidad del CMC se procede a calcular la indisponibilidad del evento tope.

4.1. SISTEMA DE EXTINCIÓN

Para calcular la indisponibilidad del sistema se considera la siguiente función:

$$Q_s = 6 * Q_r^2$$

Q_s : Indisponibilidad del sistema de extinción

Q_r : Indisponibilidad de una rama (una barra de control) del árbol de falla del sistema de extinción

La Indisponibilidad de una rama (Q_r) del árbol de falla se evalúa en función de las compuertas del árbol y de la propia indisponibilidad de los eventos. Donde FBC es la falla en la inserción de la barra de control, evento que se suma a la falla en la generación y transporte de señal del SPR (FGT) a través de una compuerta OR que une ambas fallas.

$$Q_r = (FBC + FGT) = \mathbf{CMC} \quad (1)$$

Luego analizando el estado funcional en el que se produce la falla calculo la indisponibilidad de cada CMC (Tabla 5).

EVENTOS DEL ÁRBOL DE FALLAS	ESTADO FUNCIONAL	FUNCION	PROBABILIDAD DE FALLA / TASA DE FALLA	TIEMPO DE MISION (hs)	INDISPONIBILIDAD
Falla la inserción de barra de control en el núcleo (FBC)	En demanda	$Q = p$	3.0E-06	-	3.0E-06
Falla la generación y el transporte de señal del SPR (FGT)	En espera	$Q(t) = \lambda * t$	1.2E-06/hs	24	2.9E-05

Tabla 5: Indisponibilidad de componentes del Sistema de Extinción

Entonces, la indisponibilidad de una rama del árbol de falla del Sistema de Extinción:

$$Q_r = FBC + FGT$$

Reemplazando las variables por lo valores calculados en la tabla:

$$Q_r = 3.0E - 06 + 2.9E - 05$$

$$Q_r = 3.2E - 05$$

Reemplazando éste valor en la función de indisponibilidad del Sistema de Extinción:

$$Q_s = 6 * Q_r^2$$

$$Q_s = 6 * 3.2E - 05^2$$

$$Q_s = 6.1E - 09$$

4.2. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR CONVECCIÓN NATURAL

La indisponibilidad de este sistema se ve afectada solamente por la falla en la apertura de la clapeta, conformando esta variable el CMC (Tabla 6).

EVENTOS DEL ÁRBOL DE FALLAS	ESTADO FUNCIONAL	FUNCION	PROBABILIDAD DE FALLA	INDISPONIBILIDAD
Falla la apertura de la válvula clapeta	En demanda	$Q = p$	5.0E-04	5.0E-04

Tabla 6: Indisponibilidad del componente del Sistema de Refrigeración por Convección Natural

Al ser un sistema pasivo no redundado la indisponibilidad del sistema está dada por la indisponibilidad del componente, en este caso la válvula clapeta.

$$Q_s = 5.0E - 04$$

4.3. SISTEMA DE ROMPESIFONES

Si bien este sistema cumple con un funcionamiento pasivo está redundado, por consiguiente el CMC está conformado por la falla en la apertura en la válvula rompesifón I (FVR I) y la falla de la válvula rompesifón II (FVR II). La conexión de ambos componentes es una compuerta AND (Tabla 7).

$$Q_s = FVR I * FVR II = CMC$$

EVENTOS DEL ÁRBOL DE FALLAS	ESTADO FUNCIONAL	FUNCION	PROBABILIDAD DE FALLA	INDISPONIBILIDAD
Falla en la apertura en la válvula rompesifón I (FVR I)	En demanda	$Q = p$	5.0E-04	5.0E-04
Falla en la apertura en la válvula rompesifón II (FVR II)	En demanda	$Q = p$	5.0E-04	5.0E-04

Tabla 7: Indisponibilidad de los componentes del Sistema de Rompesifones

La indisponibilidad del sistema es entonces:

$$Q_s = (5.0E - 04 * 5.0E - 04)$$

$$Q_s = 2.5E - 07$$

4.4. SISTEMA DE PROTECCIÓN DEL REACTOR (SPR)

Según el esquema de árbol de falla planteado en el capítulo 2, se estima que la falla del SPR es consecuencia de la falla del Tren I (FT I) y Tren II (FT II). Cada uno de estos puede fallar por la falla de la fuente de alimentación de Instrumentación y Control (FFAI&C) o por la falla en el funcionamiento de la instrumentación que brinda señales de campo (Flx¹³) siendo ambas el efecto de la falla en la señal del comparador 511 (FSCx¹⁴).

La indisponibilidad del sistema se puede calcular de la siguiente manera:

$$Q_s = (FT I * FT II) \quad (1)$$

$$FT I = FSCa * FSCb * FSCc \quad (2)$$

$$FT II = FSCd * FSCe * FSCf \quad (3)$$

Reemplazando 2 y 3 en 1:

$$Q_s = (FSCa * FSCb * FSCc) * (FSCd * FSCe * FSCf) \quad (4)$$

Cada tren cuenta con alimentación independiente, es decir que tienen la misma alimentación los componentes de cada uno de estos, por tal motivo no se simboliza con un subíndice dicho evento. Por el contrario la falla de la instrumentación (Flx) si cumple con dicha salvedad. Entonces la falla en la señal del comparador 511:

$$FSCx = FFAI\&C + Flx \quad (5)$$

Reemplazando 5 en 4:

$$Q_s = [(FFAI\&Ca + FIa) * (FFAI\&C + F1b) * (FFAI\&C + F1c)] * [(FFAI\&C + F1d) * (FFAI\&C + F1e) * (FFAI\&C + F1f)]$$

Aplicando la operación distributiva:

$$Q_s = [(FFAI\&C * FFAI\&C) + (FFAI\&C * F1b) + (FFAI\&C * FFAI\&C) + (FFAI\&C + F1c) + (FIa * FFAI\&C) + (FIa * F1b) + (FIa * FFAI\&C) + (FIa * F1c) + (FFAI\&C * FFAI\&C) + (FFAI\&C * F1c) + (F1b * FFAI\&C) + (F1b * F1c)] * [(FFAI\&C * FFAI\&C) + (FFAI\&C * F1e) + (FFAI\&C * FFAI\&C) + (FFAI\&C + F1f) + (F1d * FFAI\&C) + (F1d * F1e) + (F1d * FFAI\&C) + (F1d * F1f) + (FFAI\&C * FFAI\&C) + (FFAI\&C * F1f) + (F1e * FFAI\&C) + (F1e * F1f)]$$

¹³ X=instrumentación que manda señal a un determinado comparador. Ej. Instrumento "a" manda señal al comparador "a".

¹⁴ X=señal que recibe un determinado comparador por parte de un dado instrumental. Ej. Comparador "a".

Por la ley de Idempotencia:

$$Q_s = [(FFAI\&C * FFAI\&C) + (FFAI\&C * Fib) + (FFAI\&C * FFAI\&C) + (FFAI\&C + Fic) + (Fia * FFAI\&C) + (Fia * Fib) + (Fia * FFAI\&C) + (Fia * Fic) + (FFAI\&C * FFAI\&C) + (FFAI\&C * Fic) + (Fib * FFAI\&C) + (Fib * Fic)] * [(FFAI\&C * FFAI\&C) + (FFAI\&C * Fie) + (FFAI\&C * FFAI\&C) + (FFAI\&C + Fif) + (Fid * FFAI\&C) + (Fid * Fie) + (Fid * FFAI\&C) + (Fid * Fif) + (FFAI\&C * FFAI\&C) + (FFAI\&C * Fif) + (Fie * FFAI\&C) + (Fie * Fif)]$$

Se simplifica a:

$$Q_s = [FFAI\&C + (FFAI\&C * Fib) + (FFAI\&C + Fic) + (Fia * FFAI\&C) + (Fia * Fib) + (Fia * FFAI\&C) + (Fia * Fic) + (FFAI\&C * Fic) + (Fib * FFAI\&C) + (Fib * Fic)] * [FFAI\&C + (FFAI\&C * Fie) + (FFAI\&C + Fif) + (Fid * FFAI\&C) + (Fid * Fie) + (Fid * FFAI\&C) + (Fid * Fif) + (FFAI\&C * Fif) + (Fie * FFAI\&C) + (Fie * Fif)]$$

Y por la ley de Adsorción:

$$Q_s = [FFAI\&C + (FFAI\&C * Fib) + (FFAI\&C + Fie) + (Fia * FFAI\&C) + (Fia * Fib) + (Fia * FFAI\&C) + (Fia * Fic) + (FFAI\&C * Fie) + (Fib * FFAI\&C) + (Fib * Fic)] * [FFAI\&C + (FFAI\&C * Fie) + (FFAI\&C + Fif) + (Fid * FFAI\&C) + (Fid * Fie) + (Fid * FFAI\&C) + (Fid * Fif) + (FFAI\&C * Fif) + (Fie * FFAI\&C) + (Fie * Fif)]$$

Se reduce a:

$$Q_s = [FFAI\&C + (Fia * Fib) + (Fia * Fic) + (Fib * Fic)] * [FFAI\&C + (Fid * Fie) + (Fid * Fif) + (Fie * Fif)]$$

Hasta ahora las fuentes de alimentación de cada tren se diferenciaban por estar separadas por los corchetes-ya que son independientes entre si-pero como el paso siguiente es aplicar distributiva entre los trenes para discriminarlas se adiciona al final de las siglas el número 1 para la fuente del tren I y 2 para la fuente del tren II.

$$Q_s = [FFAI\&C1 + (Fia * Fib) + (Fia * Fic) + (Fib * Fic)] * [FFAI\&C2 + (Fid * Fie) + (Fid * Fif) + (Fie * Fif)]$$

Entonces aplicando nuevamente distributiva:

$$Q_s = (FFAI\&C1 * FFAI\&C2) + (FFAI\&C1 * Fid * Fie) + (FFAI\&C1 * Fid * Fif) + (FFAI\&C1 * Fie * Fif) + (Fia * Fib * FFAI\&C2) + (Fia * Fib * Fid * Fie) + (Fia * Fib * Fid * Fif) + (Fia * Fib * Fie * Fif) + (Fia * Fic * FFAI\&C2) + (Fia * Fic * Fid * Fie) + (Fia * Fic * Fid * Fif) + (Fia * Fic * Fie * Fif) + (Fib * Fic * FFAI\&C2) + (Fib * Fic * Fid * Fie) + (Fib * Fic * Fid * Fif) + (Fib * Fic * Fie * Fif)$$

La multiplicación de más de dos términos arroja un resultado muy chico por lo que no tiene sentido evaluar indisponibilidades tan pequeñas. Por tal motivo y en base a un criterio conservativo se anulan los mismos.

$$Q_s = (FFAI\&C1 * FFAI\&C2) + (FFAI\&C1 * Fid * Fie) + (FFAI\&C1 * Fid * Fif) + (FFAI\&C1 * Fie * Fif) + (Fia * Fib * FFAI\&C2) + (Fia * Fib * Fid * Fie) + (Fia * Fib * Fid * Fif) + (Fia * Fib * Fie * Fif) + (Fia * Fic * FFAI\&C2) + (Fia * Fic * Fid * Fie) + (Fia * Fic * Fid * Fif) + (Fia * Fic * Fie * Fif) + (Fib * Fic * FFAI\&C2) + (Fib * Fic * Fid * Fie) + (Fib * Fic * Fid * Fif) + (Fib * Fic * Fie * Fif)$$

Y la indisponibilidad del sistema queda reducida a dos eventos (Tabla 8):

$$Q_s = (FFAI\&C1 * FFAI\&C2) = CMC$$

EVENTOS DEL ÁRBOL DE FALLAS	ESTADO FUNCIONAL	FUNCION	PROBABILIDAD DE FALLA-TASA DE FALLA	INDISPONIBILIDAD
Falla de la fuente de alimentación de Instrumentación y Control (FFAI&C1)	En demanda	$Q = p$	1.0E-03	1.0E-03
Falla de la fuente de alimentación de Instrumentación y Control (FFAI&C2)	En demanda	$Q = p$	1.0E-03	1.0E-03

Tabla 8: Indisponibilidad de los componentes del SPR

Por lo tanto:

$$Q_s = (1.0E - 03 * 1.0E - 03)$$

$$Q_s = 1.0E - 6$$

4.5. SISTEMA DE VENTILACIÓN

La falla del sistema de ventilación puede darse por la falla del Sistema de Recirculación (FSR) y el de Extracción (FSE) en estado de emergencia según el árbol postulado en el capítulo 2.

$$Q_s = (FSR) * (FSE) \quad (1)$$

Se procede a mencionar las causas de falla de cada sistema:

✓ La falla del Sistema de Recirculación (FSR) se puede deber a la falla neumática de válvulas tales como las clapetas FV 1020, 201, 202, 203, 204, 20, o persianas FV1 40, FV2 40. Otras variables que aportan a la falla del sistema son la falla de los dos filtros de carbón activado (FFCA1r¹⁵) y (FFCA2r) y la falla en el ventilador como consecuencia de la falla en la fuente de alimentación (FFA) o de la carcasa (FCr) del mismo. También puede fallar la válvula de actuación manual persiana FV21 (FP21r) conformando todos los eventos antes mencionado una compuerta OR. Las válvulas neumáticas a su vez pueden fallar por falla en la alimentación (FFA) y del compresor (FC) (compuerta AND).

¹⁵ r : identifica componentes del Sistema de Recirculación.

$$FSE = (FFA * FC) + (FP68e) + (FFA + FCe) + (FFCAe)$$

Y por ley de Absorción:

$$FSE = (\cancel{FFA * FC}) + FP68e + FFA + FCe + FFCAe$$

$$FSE = FFA + FP68e + FCe + FFCAe \quad (3)$$

Entonces, reemplazando 2 y 3 en 1:

$$Qs = [(FFA + FFCA1r + FFCA2r + FCr + FP21r) * (FFA + FP68e + FCe + FFCAe)]$$

Aplicando distributiva:

$$\begin{aligned} Qs = & (FFA * FFA) + (FFA * FP68e) + (FFA * FCe) + (FFA * FFCAe) + (FFCA1r * FFA) + (FFCA1r * FP68e) \\ & + (FFCA1r * FCe) + (FFCA1r * FFCAe) + (FFCA2r * FFA) + (FFCA2r * FP68e) + (FFCA2r * FCe) \\ & + (FFCA2r * FFCAe) + (FCr * FFA) + (FCr * FP68e) + (FCr * FCe) + (FCr * FFCAe) \\ & + (FP21r * FFA) + (FP21r * FP68e) + (FP21r * FCe) + (FP21r * FFCAe) \end{aligned}$$

Por ley de Idempotencia:

$$\begin{aligned} Qs = & (\cancel{FFA * FFA}) + (FFA * FP68e) + (FFA * FCe) + (FFA * FFCAe) + (FFCA1r * FFA) + (FFCA1r * FP68e) \\ & + (FFCA1r * FCe) + (FFCA1r * FFCAe) + (FFCA2r * FFA) + (FFCA2r * FP68e) + (FFCA2r * FCe) \\ & + (FFCA2r * FFCAe) + (FCr * FFA) + (FCr * FP68e) + (FCr * FCe) + (FCr * FFCAe) \\ & + (FP21r * FFA) + (FP21r * FP68e) + (FP21r * FCe) + (FP21r * FFCAe) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Qs = & FFA + (FFA * FP68e) + (FFA * FCe) + (FFA * FFCAe) + (FFCA1r * FFA) + (FFCA1r * FP68e) \\ & + (FFCA1r * FCe) + (FFCA1r * FFCAe) + (FFCA2r * FFA) + (FFCA2r * FP68e) + (FFCA2r * FCe) \\ & + (FFCA2r * FFCAe) + (FCr * FFA) + (FCr * FP68e) + (FCr * FCe) + (FCr * FFCAe) \\ & + (FP21r * FFA) + (FP21r * FP68e) + (FP21r * FCe) + (FP21r * FFCAe) \end{aligned}$$

Y por ley de Absorción:

$$\begin{aligned} Qs = & FFA + (\cancel{FFA * FP68e}) + (\cancel{FFA * FCe}) + (\cancel{FFA * FFCAe}) + (\cancel{FFCA1r * FFA}) + (FFCA1r * FP68e) \\ & + (FFCA1r * FCe) + (FFCA1r * FFCAe) + (\cancel{FFCA2r * FFA}) + (FFCA2r * FP68e) + (FFCA2r * FCe) \\ & + (FFCA2r * FFCAe) + (\cancel{FCr * FFA}) + (FCr * FP68e) + (FCr * FCe) + (FCr * FFCAe) \\ & + (\cancel{FP21r * FFA}) + (FP21r * FP68e) + (FP21r * FCe) + (FP21r * FFCAe) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Qs = & FFA + (FFCA1r * FP68e) + (FFCA1r * FCe) + (FFCA1r * FFCAe) + (FFCA2r * FP68e) + (FFCA2r * FCe) \\ & + (FFCA2r * FFCAe) + (FCr * FP68e) + (FCr * FCe) + (FCr * FFCAe) + (FP21r * FP68e) \\ & + (FP21r * FCe) + (FP21r * FFCAe) = \mathbf{CMC} \end{aligned}$$

Para calcular la indisponibilidad del sistema de debe en principio calcular la indisponibilidad de los componentes del CMC (Tabla 9).

EVENTOS DEL ÁRBOL DE FALLAS	ESTADO FUNCIONAL	FUNCION	PROBABILIDAD DE FALLA-TASA DE FALLA	TIEMPO DE MISION (hs)	INDISPONIBILIDAD
Falla actuación manual de persiana	En demanda	$Q = p$	1.0E-04	-	1.0E-04
Falla fuente de alimentación	En demanda	$Q = p$	1.0E-03	-	1.0E-03
Falla contenedor de ventilador	En demanda	$Q = p$	3.3E-04	-	3.3E-04
Falla de filtros	En espera	$Q(t) = \lambda * t$	3.0E-05/hs	24	7.2E-04

Tabla 9: Indisponibilidad de los componentes del Sistema de Ventilación

En función de estos valores se estima la indisponibilidad del sistema:

$$\begin{aligned}
 Q_s = & 1.0E - 03 + (7.2E - 04 * 1.0E - 04) + (7.2E - 04 * 3.3E - 04) + (7.2E - 04 * 7.2E - 04) \\
 & + (7.2E - 04 * 1.0E - 04) + (7.2E - 04 * 3.3E - 04) + (7.2E - 04 * 7.2E - 04) \\
 & + (3.3E - 04 * 1.0E - 04) + (3.3E - 04 * 3.3E - 04) + (3.3E - 04 * 7.2E - 04) \\
 & + (1.0E - 04 * 1.0E - 04) + (1.0E - 04 * 3.3E - 04) + (1.0E - 04 * 7.2E - 04)
 \end{aligned}$$

$$Q_s = 1.0E - 03$$

CAPÍTULO 5

5 RESULTADOS

Dado que en este trabajo se contempló el modelo de falla no reparable, se considera que la disponibilidad es equivalente a la confiabilidad.

Una vez obtenidos la probabilidad de que los distintos sistemas de seguridad del reactor RA-6 fallen se calcula la contribución de la falla de los componentes que conforman cada CMC y la confiabilidad de los sistemas.

Para los cálculos se utilizan las tablas de indisponibilidad de componentes del capítulo 4 según corresponda a cada sistema.

5.1. CONJUNTO MÍNIMO DE CORTE

La contribución de la falla del conjunto mínimo de corte se determina sumando las indisponibilidades de cada evento que conforma el CMC y calculando luego el porcentaje de cada evento.

5.1.1. SISTEMA DE EXTINCIÓN

El Sistema de Extinción se encuentra afectado principalmente por la falla en la generación y el transporte de señal del SPR que es quien demanda desenergizar los electroimanes (Tabla 10).

EVENTOS DEL ÀRBOL DE FALLAS	INDISPONIBILIDAD	CMC
Falla la generación y el transporte de señal del SPR (FGT)	2.9E-05	90.57%
Falla la inserción de barra de control en el núcleo (FBC)	3.0E-06	9.43%

Tabla 10: Contribución de fallas al Sistema de Extinción

5.1.2. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR CONVECCIÓN NATURAL

Debido a la actuación pasiva y no redundada del componente, la falla del sistema solo depende de la clapeta (Tabla 11).

EVENTOS DEL ÁRBOL DE FALLAS	INDISPONIBILIDAD	CMC
Falla la apertura de la válvula clapeta	5.0E-04	100%

Tabla 11: Contribución de fallas al Sistema de Refrigeración por Convección Natural

5.1.3. SISTEMA DE ROMPESIFONES

Las válvulas rompесifones asisten en la falla del sistema en igual proporción ya que están redundadas y actúan de modo pasivo (Tabla 12).

EVENTOS DEL ÁRBOL DE FALLAS	INDISPONIBILIDAD	CMC
Falla en la apertura en la válvula rompесifón I (FVR I)	5.0E-04	50%
Falla en la apertura en la válvula rompесifón II (FVR II)	5.0E-04	50%

Tabla 12: Contribución de fallas al Sistema de Rompесifones

5.1.4. SISTEMA DE PROTECCIÓN

La falla en el sistema de protección se encuentra afectada en igual magnitud por las fuentes de alimentación independientes de cada tren (Tabla 13).

EVENTOS DEL ÁRBOL DE FALLAS	INDISPONIBILIDAD	CMC
Falla de la fuente de alimentación de Instrumentación y Control (FFAI&C1)	1.0E-03	50%
Falla de la fuente de alimentación de Instrumentación y Control (FFAI&C2)	1.0E-03	50%

Tabla 13: Contribución de fallas al Sistema de Protección

5.1.5. SISTEMA DE VENTILACIÓN

La principal contribución en la falla del Sistema de Ventilación en estado de Emergencia es por la falla en la fuente de alimentación ya que ésta asiste a la mayoría de los componentes que llevan al éxito del funcionamiento del sistema considerando en que para tal éxito se deben combinar el favorable funcionamiento del Sistema de Recirculación y Extracción (Tabla 14).

EVENTOS DEL ÀRBOL DE FALLAS	INDISPONIBILIDAD	CMC
Falla fuente de alimentación (FFA)	1.0E-03	99.8%
Falla filtro de carbón activado 1 del Sistema de Recirculación (FFCA1r) * Falla filtro de carbón activado del Sistema de Extracción (FFCAe)	5.2E-07	0.052%
Falla filtro de carbón activado 2 del Sistema de Recirculación (FFCA2r) * Falla filtro de carbón activado del Sistema de Extracción (FFCAe)	5.2E-07	0.052%
Falla filtro de carbón activado 1 del Sistema de Recirculación (FFCA1r) * Falla carcasa de ventilador del Sistema de Extracción (FCe)	2.4E-07	0.024%
Falla filtro de carbón activado 2 del Sistema de Recirculación (FFCA2r) * Falla carcasa de ventilador del Sistema de Extracción (FCe)	2.4E-07	0.024%
Falla carcasa de ventilador del Sistema de Recirculación (FCr) * Falla filtro de carbón activado del Sistema de Extracción (FFCAe)	2.4E-07	0.024%
Falla carcasa de ventilador del Sistema de Recirculación (FCr) * Falla carcasa de ventilador del Sistema de Extracción (FCe)	1.1E-07	0.011%

Falla filtro de carbón activado 1 del Sistema de Recirculación (FFCA1r) * Falla actuación manual de persiana 68 del Sistema de Extinción (FP68e)	7.2E-08	0.007%
Falla filtro de carbón activado 2 del Sistema de Recirculación (FFCA2r) * Falla actuación manual de persiana 68 (FP68e)	7.2E-08	0.007%
Falla actuación manual de persiana 21 del Sistema de Recirculación (FP21r) * Falla filtro de carbón activado del Sistema de Extracción (FFCAe)	7.2E-08	0.007%
Falla carcasa de ventilador del Sistema de Recirculación (FCr) * Falla actuación manual de persiana 68 del Sistema de Extinción (FP68e)	3.3E-08	0.003%
Falla actuación manual de persiana 21 del Sistema de Recirculación (FP21r) * Falla carcasa de ventilador del Sistema de Extracción (FCe)	3.3E-08	0.003%
Falla actuación manual de persiana 21 del Sistema de Recirculación (FP21r) * Falla actuación manual de persiana 68 del Sistema de Extinción (FP68e)	1.0E-08	0.001%

Tabla 14: Contribución de fallas al Sistema de Ventilación

5.2. CONFIABILIDAD

A continuación se determina la confiabilidad de los sistemas de seguridad a partir de la indisponibilidad (Q_s) calculada previamente (Tabla 15).

$$\text{Confiabilidad o Disponibilidad} = 1 - Q_s$$

SISTEMAS	INDISPONIBILIDAD	CONFIABILIDAD
Extinción	6.1E-09	0.999999994
Refrigeración por Convección Natural	5.0E-04	0.9995
Rompesifones	2.5E-07	0.99999975
Protección	1.0E-6	0.999999
Ventilación	1.0E-03	0.99899785

Tabla 15: Confiabilidad de los Sistemas de Seguridad del reactor RA-6

Se observa que los sistemas arrojan valores altos de confiabilidad – aproximadamente 1- porque los sistemas estudiados tienen por finalidad prevenir o mitigar consecuencias de falla, mal función o mala operación y por tal motivo su diseño fue considerando criterios de falla segura, falla única, redundancia, entre otros.

CONCLUSIONES

Luego de evaluar los sucesos que conducen a la generación del evento de cabecera se concluye que las fallas más relevantes que provocan el incumplimiento del criterio de éxito de los sistemas de seguridad son:

Sistemas Pasivos

- ✓ Falla la apertura de la válvula clapeta en el Sistema de Refrigeración por Convección Natural con una incumbencia del 100% en el incumplimiento de su función de seguridad.
- ✓ Falla la apertura de ambas válvulas del Sistema de Rompesifones que al estar redundadas su contribución es en igual magnitud.

Sistemas Activos

- ✓ En el Sistema de Extinción la falla en la generación y transporte de la señal del SPR conduce en un 90% aproximadamente a la ejecución insatisfactoria del sistema. La causa podría deberse a que en función de la arquitectura del Sistema de Protección dicho evento contribuiría en una alteración en el pedido de SCRAM.
- ✓ A su vez, el Sistema de Protección presenta una contribución en su falla netamente generada por la fuente de alimentación de instrumentación y control pero al contar con dos trenes de alimentación independiente, el aporte a la falla del sistema es equitativo respecto a ambos trenes.
- ✓ El Sistema de Ventilación podría funcionar de manera no satisfactoria principalmente debido a la falla de la fuente alimentación (99.8%) ya que gran parte de los componentes que conforman dicho sistema como ser clapetas, persianas, ventiladores actúan con asistencia de ésta. En menor medida (0.024%) pero no menos importante afectan al sistema la falla en el funcionamiento de los filtros de carbón activado y carcasa de los ventiladores tanto en el sistema de Recirculación como de Extracción. Esto podría deberse a que en estado de emergencia el caudal de aire queda circulando por los filtros - removiendo yodos y gases radiactivos- del sistema de recirculación hasta que su actividad es la adecuada para ser extraído al exterior con ayuda de los ventiladores.

Tanto en el Sistema de Protección como en el de Ventilación juega un papel importante en su funcionamiento la fuente de alimentación, por ello, en caso de pérdida de suministro eléctrico externo el reactor cuenta con un sistema de energía ininterrumpido (UPS) con una autonomía de 10 horas aproximadamente que permite la disponibilidad de señales de instrumentación alarmas y control del reactor. [30]

En cuanto a la determinación de confiabilidad de los sistemas de seguridad todos arrojaron valores de indisponibilidad menor o igual a 10^{-3} , enmarcado en el cumplimiento del criterio 34 de la norma AR 4.2.2. “La tasa de falla por demanda para cada sistema de seguridad debe ser inferior a 10^{-3} ” [21].

BIBLIOGRAFIA

- [1]. Dairo, H. Mesa Grajales; Yesid Ortiz Sanchez; Manuel Pinzón. La Confiabilidad, la Disponibilidad y la Mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento. UTP. ISSN 0122-1701-Scientia et Technica Año XII, No 30. Mayo 2006.
- [2]. Reyes Aguilar, P. Curso de Confiabilidad. Diciembre 2006.
- [3]. Lapeña Cejalvo, A.; Domingo Biosca, J.E. NTP 417: Análisis cuantitativo de riesgos: Fiabilidad de componentes e implicaciones en el mantenimiento preventivo. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. 1998.
- [4]. Fuente: IB-Seguridad Nuclear: Introducción al análisis de Sistemas Tecnológicos y Confiabilidad de Componentes.
- [5]. Fuente: Manual del Ingeniero de Mantenimiento. Gestión Moderna del Mantenimiento.
- [6]. Zapata, J.C. Confiabilidad de componentes no Reparables. XIII Seminario Taller Nacional de Instrumentación y Control y XII Muestra Tecnológica. Octubre 2010.
- [7]. Zárate Fraga, M. Proyecto Fin de Carrera Análisis RAM. Universidad Carlos III de Madrid. Escuela Politécnica Superior. Departamento de Ingeniería Mecánica. 2012.
- [8]. Fuente: Apuntes de Conceptos Fundamentales sobre Seguridad Nuclear. Instituto de Tecnología Nuclear Dan Beninson. Universidad Nacional de San Martín. 2016.
- [9]. Tamborero del Pino, J.M. NTP 316: Fiabilidad de Componentes: La distribución Exponencial. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. 1995.
- [10]. Zapata, J.C. Confiabilidad en Ingeniería. Primera Edición. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia. 2011.
- [11]. González Cuesta, Manuel. Aprovechamiento del Análisis Probabilístico de Seguridad en Centrales Nucleares. 2010.
- [12]. Hidalgo Hernández, F. E. Tesis de Maestro en Ingeniería: Desarrollo de una Herramienta de Análisis Probabilístico de Seguridad (APS) para comparar el diseño de reactores nucleares avanzados. Universidad Nacional Autónoma de México. 2008.
- [13]. Gómez Estrada, S.; Baldomiro Cano, H.; Ocampo, F. A. Análisis de Inconfiabilidad a un proceso de Construcción de rollos de papel utilizando Árbol de Fallos. ISSM 0122-1701. Scientia et Technica Año XV, No 43. Universidad Tecnológica de Pereira. 2009.
- [14]. Fuente: M.R.A & J.A.A.R. Tema 3: Algebra de Boole y circuitos con puertas lógicas. DISA. ESI. US. 2009.
- [15]. Piqué Ardanuy, T.; Cejalvo Lapeña, A. NTP 333: Análisis Probabilístico de Riesgos: Metodología del "Árbol de fallos y errores". Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. 1996.
- [16]. Barco Gómez, C. Álgebra booleana. Aplicaciones tecnológicas. Editorial Universidad de Caldas. Ciencias Exactas y Naturales. 2005.
- [17]. Fuente: Álgebra booleana. Capítulo V.
- [18]. Fuente: <http://wmatem.eis.uva.es/~matpag/CONTENIDOS/Conjuntos/conjuntos.htm> . 2017

- [19]. Informe de Seguridad. Capítulo 5: Reactor. IS-06NBX-405. Rev.2.
- [20]. Informe de Seguridad. Capítulo 6: Sistemas de Refrigeración y Conexos. IS-06NBX-406. Rev.2.
- [21]. AR 4.2.2. Diseño de Reactores de Investigación. Revisión 1. Autoridad Regulatoria Nuclear. 2002.
- [22]. Informe de Seguridad. Capítulo 7. Características de seguridad del diseño. IS-06NBX-407. Rev. 2.
- [23]. Guía AR 4. Diseño de Reactores Nucleares de Investigación. Revisión 0. Autoridad Regulatoria Nuclear. 2003.
- [24]. Fuente: <https://www.cab.cnea.gov.ar/index.php/oferta-tecnologica/equipamiento/reactor-ra6> . 2017.
- [25]. Fuente: Guía de Estudio Laboratorio II-Ingeniería Nuclear de capacitación de brindada por el personal del reactor RA-6. 2017.
- [26]. Informe Técnico: Descripción del Sistema de Protección del reactor RA-6. IT-06NBX-463. Rev.0.
- [27]. Informe de Seguridad. Capítulo 10: Sistemas Auxiliares. IS-06NBX-410. Rev.3.
- [28]. Procedimiento de Ensayo Funcional: Ensayo de Sistema de Ventilación. MO-06NBX-258. Re.1.
- [29]. Manual de Operación-Procedimiento Aplicativo: Sistema de Ventilación. MO-06NBX-204. Rev.2.
- [30]. Informe de Seguridad. Capítulo 9: Energía Eléctrica. IS-06NBX-409. Rev.3.