

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

FACULTAD DE INGENIERIA INDUSTRIAL Y DE SISTEMAS



Metodología para el aumento de la seguridad y  
disponibilidad de la operación del Reactor Nuclear de  
Investigación RP-10 del IPEN

Tesis

para optar el título profesional de  
Ingeniero Industrial

Álvaro Humfredo Aguirre Ancieta

Lima Perú

2004

# INDICE

## INTRODUCCIÓN

Antecedentes	2
Justificación	3
Importancia del tema	3
Objetivos del estudio	4
Alcances	4

## CAPITULO I GENERALIDADES DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES NUCLEARES RACSO

1.1.- Descripción	5
1.2.- Definición de un reactor nuclear	6
1.3.- Descripción del reactor nuclear de investigación RP10	9
1.4.- Organización interna	18

## CAPITULO II MARCO TEÓRICO

2.1.- Descripción del método empleado	24
2.2.- Elementos del análisis de confiabilidad	26
2.3.- Confiabilidad de componentes	32
2.4.- Métodos para la estimación de parámetros	44
2.5.- Confiabilidad de sistemas	46
2.6.- Análisis de importancia	51

## CAPITULO III APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA AUMENTAR LA SEGURIDAD Y DISPONIBILIDAD DEL RP10

3.1.- Objetivos y alcances	54
3.2.- Selección de sistemas	54
3.3.- Descripción funcional	58
3.4.- Análisis de las fallas de las funciones y de sus efectos	71
3.5.- Selección de los ítem críticos	74

3.6.- Selección de las acciones para aumentar la seguridad y la disponibilidad	95
CAPITULO IV EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS ACCIONES PROPUESTAS	
4.1.- Consideraciones previas	98
4.2.- Análisis del incremento de la seguridad en la operación	99
4.3.- Determinación del tiempo entre pruebas óptimo y el ahorro por disminución en el costo de mantenimiento del sistema de corte	100
4.4.- Análisis del incremento de la disponibilidad de la operación	104
CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
5.1.- Conclusiones	112
5.2.- Recomendaciones	113
GLOSARIO	115
BIBLIOGRAFIA	117
ANEXOS	119

## DESCRIPTORES TEMATICOS

- Aumento de la disponibilidad
- Análisis de seguridad
- Costo de confiabilidad
- Tasa de fallas
- Fallas inseguras
- Árboles de fallas
- Análisis de importancia
- Diagramas funcionales
- Análisis de modos de fallas y efectos (FMEA)
- Reactor nuclear de investigación RP10

## RESUMEN

Este estudio se realiza para aumentar la seguridad y la disponibilidad de la operación del reactor nuclear de investigación RP10 del Instituto Peruano de Energía Nuclear IPEN considerando un nuevo escenario en el cual se va a operar de manera continua, con paradas programadas cada 120h. Para ello se identificó al sistema que más ha contribuido a la indisponibilidad de la operación en los años 2001 y 2002; que resulto ser el sistema de instrumentación nuclear para el corte. Luego se aplicó un FMEA simplificado, análisis de los modos de fallas y efectos, a las funciones que realiza dicho sistema, para seleccionar aquellos modos de falla funcionales cuyos efectos tienen mayor severidad. Posteriormente utilizando la metodología de árbol de fallas, se determinó que el componente que tienen mayor importancia para los modos de falla seleccionados es el mecanismo de barras de control y seguridad.

A partir de la metodología empleada y de los resultados del análisis de importancia se propusieron acciones de mantenimiento para aumentar la disponibilidad de la operación, obteniéndose una utilidad total de 2 903438 US\$ en 15 años de operación a una tasa del 12.5 % anual. Asimismo, se optimizo el tiempo entre pruebas del sistema instrumentación nuclear para el corte, obteniéndose un ahorro anual esperado en el costo de confiabilidad de US\$ 1264, el cual en 15 años de operación y una tasa del 12.5% anual producirá un valor presente de US\$ 8383.

## INTRODUCCION

### ANTECEDENTES

Actualmente las aplicaciones de la energía nuclear abarcan casi todo los aspectos del quehacer humano, desde los detectores de humo, hasta los submarinos nucleares que utilizan reactores nucleares de potencia. Los radiosótopos que se emplean en muchas de estas aplicaciones, mayormente se generan en los reactores de investigación, así como en los aceleradores. El Perú cuenta desde 1989 con uno de reactores nucleares de investigación más modernos de sudamérica, el cual se encuentra en el Centro Nuclear RACSO de Huarangal.

Esta instalación como la mayoría de las instalaciones nucleares del mundo, fué construida siguiendo las respectivas normas de seguridad y de protección al medio ambiente, por lo cual es común encontrar que los componentes más críticos e importantes están duplicados; así como materiales y componentes de altísima calidad y confiabilidad. Además en un reactor nuclear existen múltiples barreras de seguridad, que impiden que los contaminantes ó gases radiactivos alcancen el medio ambiente, en caso que ocurra un accidente. Es decir, el aspecto de seguridad es un punto esencial en la operación de un reactor nuclear, el cual sin embargo encarece su gestión, por lo cual es necesario aplicar nuevos enfoques basados en la confiabilidad que reducen los costos de mantenimiento sin que ello signifique descuidar el tema de la seguridad.

## JUSTIFICACION

El IPEN como otras entidades publicas dedicadas a la investigación y el desarrollo han venido sufriendo el recorte de sus presupuestos de manera creciente en los últimos años, lo cual le plantea la urgente necesidad de incrementar sus ingresos por la venta de radio isótopos y de servicios tecnológicos.

Por otro lado, el IPEN cuenta con un personal altamente capacitado y con experiencia, y con una de las instalaciones mejor equipadas de la región; pero utiliza solamente un 18% de su capacidad instalada. Esta situación se podría revertir; estableciendo acuerdos comerciales e incursionando en los mercados de los países de la región; con lo cual se incrementaría significativamente los ingresos por la exportación de bienes y servicios.

Por lo tanto, es necesario aumentar la producción de radio isótopos y de servicios tecnológicos, reduciendo los costos operativos, para poder subsistir y competir exitosamente con los productos importados. Para lo cual, se propone incrementar el uso de la capacidad instalada, pasando de un régimen de operación discontinuo a uno continuo, aumentando el tiempo de operación de 20h a 120h semanales con 48h de parada cada semana; por consiguiente se requerirá aumentar la disponibilidad y la seguridad de la planta.

## IMPORTANCIA DEL TEMA

El aumento de la disponibilidad y seguridad de planta, es un problema común que deben enfrentar todas aquellas empresas que, como el IPEN en lo que hace a la producción de radioisótopos principalmente, deseen alcanzar altos estándares de calidad y eficiencia para poder competir exitosamente en el mercado globalizado. La aplicación de ésta metodología a otras industrias, como las de procesos, refinación del petróleo ó generación de energía

eléctrica, permitiría tomar medidas preventivas para asegurar altos niveles de disponibilidad de planta y una operación segura, evitando así las paradas innecesarias y por consiguiente aumentar la productividad y la eficiencia de la misma. De esta manera se dispone de un medio para orientar adecuadamente los recursos disponibles y para hacer más confiables aquellos componentes que verdaderamente son importantes para el buen funcionamiento de todo el sistema.

### OBJETIVOS DEL ESTUDIO

- Identificar a los principales sistemas que al fallar han ocasionado la indisponibilidad de la operación del RP10 durante los años 2001 y 2002
- Modelar los principales modos de falla de las funciones del sistema seleccionado a través de la metodología de los árboles de fallas
- Elevar la disponibilidad y seguridad de la operación del RP10 para un funcionamiento continuo de 120h por semana
- Disminuir el costo total de mantenimiento

### ALCANCES

El alcance del presente estudio está limitado a los principales sistemas que al fallar han causado la indisponibilidad de la operación del RP10 durante los años 2001 y 2002. Los modelos de confiabilidad empleados sólo consideran las fallas del tipo aleatorio y no las fallas por desgaste, puesto que se supone que los componentes se reemplazan antes del término de su vida útil ó que el inicio de este modo de falla se detecta durante las inspecciones periódicas. Asimismo, los resultados están limitados a un funcionamiento continuo de 120h semanales y al evento iniciante postulado el cual consiste en la inserción de reactividad no controlada en el núcleo a través del izaje fortuito de un elemento combustible y su posterior caída durante la etapa de arranque.



# CAPITULO I

## GENERALIDADES DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES NUCLEARES RACSO

### 1.1.- DESCRIPCION

El Centro de Investigaciones Nucleares (RACSO) del IPEN está localizado en Lima, distrito de Carabayllo, en un lugar denominado Huarangal a 42 Km al Norte de la ciudad de Lima. Posee un reactor nuclear de investigación tipo piscina de 10 Mw (RP-10), una planta de producción de radioisótopos (PPR), una planta de gestión de residuos radioactivos (PGRR) y un centro de protección radiológica. La instalación principal es el RP-10 y alrededor de la misma giran el resto de las actividades del centro. El centro está dedicado a la investigación nuclear aplicada a diferentes campos como la medicina, la industria, la alimentación, la minería, la hidrología, el mundo agropecuario y a la producción de radioisótopos, los cuales se distribuyen en los diferentes hospitales de Lima y provincias, así como en el centro de medicina nuclear, el cuál atiende alrededor de 13, 000 pacientes al año.

Los principales radioisótopos que se producen son los siguientes:

- Tecnesio Tc 99, principalmente utilizado como trazador biológico para estudio de diagnóstico médico por imágenes de órganos y sistemas funcionales
- Samario Sm 153, se emplea para tratamiento de dolor óseo producido por metástasis ósea en el cáncer a los huesos

- Iridio Ir 192, en medicina se emplea en forma de hilos para terapia intracavitaria y en la industria en equipos de gamagrafía industrial
- Yodo I 131, es el de mayor producción y se utiliza en medicina para estudios de diagnóstico y tratamiento de enfermedades de tiroides. También se emplea en la industria e hidrología como radio trazador

## 1.2.- DEFINICIÓN DE UN REACTOR NUCLEAR

Un reactor nuclear es básicamente una instalación donde se produce de manera controlada energía en forma de calor y radiación (gamma, beta, etc.) las cuales se originan por las reacciones nucleares de fisión que se llevan a cabo en el combustible contenido en el núcleo del reactor. Los reactores nucleares pueden ser de potencia o de investigación. Los primeros aprovechan la energía producida en el núcleo convirtiendo la energía cinética del vapor que se produce en el intercambiador de calor en energía mecánica la cual a su vez es transformada en energía eléctrica por el generador, como se puede apreciar en la figura 1.1. De otro lado el propósito principal de los reactores de investigación es aprovechar los neutrones generados en el núcleo para producir radioisótopos, activar muestras y realizar experiencias de física nuclear; evacuando el calor producido al medio ambiente a través de las torres de enfriamiento.

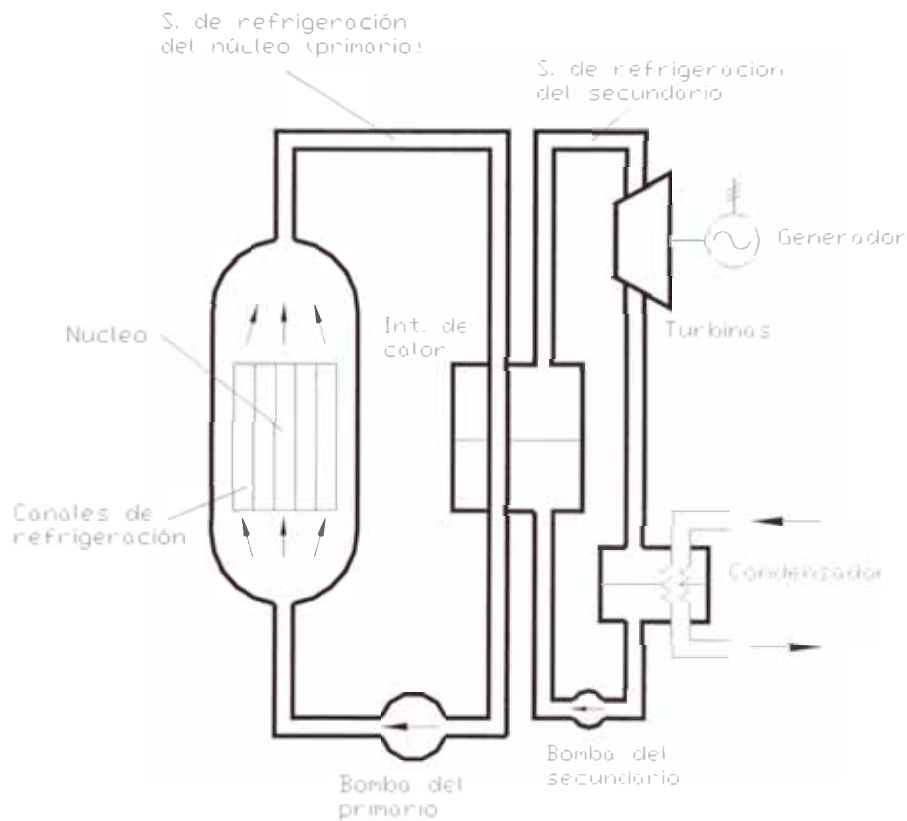


Fig. 1.1 Sistema de refrigeración y turbo generadores de un reactor nuclear de potencia

La fisión nuclear es el proceso por el cuál un neutrón al interaccionar con un núcleo atómico produce la *rotura* de éste en dos partes de igual masa aproximadamente, liberándose 200 Mev de energía, radiación (gamma, beta, etc.) y 2 ó 3 neutrones más, los que podrán producir nuevas fisiones en otros núcleos, y así mantener la llamada *reacción en cadena auto-sostenida*.

Un reactor se dice que está *crítico* ó que se tiene una reacción en cadena controlada, cuando el número de neutrones producidos en las fisiones, es igual al número de neutrones que son absorbidos más los que se escapan del núcleo, es decir, cuando la población neutrónica se mantiene constante. Esto se logra a través de los elementos llamados de control, los que son accionados por los sistemas de control y que en general están compuestos de materiales

muy absorbedores de neutrones, en forma de barras o grupos de barras.

En un reactor nuclear intervienen toda clase de componentes; desde los elementos, piezas, máquinas y sistemas convencionales (mecánicos, eléctricos, electrónicos, etc.), hasta los elementos llamados de *calidad nuclear* (debido a su precisión o características muy particulares que poseen), que son los que se utilizan en los componentes propiamente nucleares de la instalación y forman parte de los sistemas de seguridad y control del reactor. Estos elementos o piezas de calidad nuclear se caracterizan por tener una altísima confiabilidad o por la pureza de los materiales que lo componen y por lo común se los encuentra repetidos y redundantes.

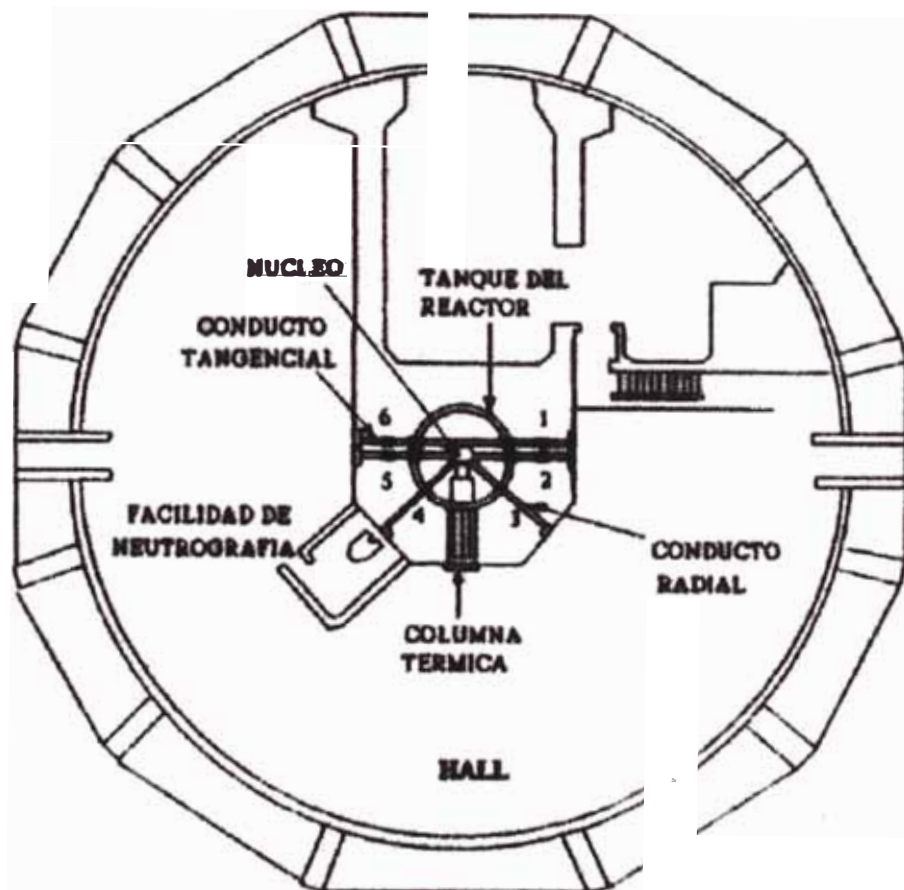


Fig. 1.2 Vista superior del recinto del reactor RP10

### 1.3.- DESCRIPCION DEL REACTOR NUCLEAR DE INVESTIGACION RP-10

El RP10 es un reactor térmico tipo piscina de tanque abierto de una potencia de 10 Mw que se utiliza normalmente para los reactores de investigación o de baja potencia. Estos reactores se caracterizan por ser muy maniobrables y por ofrecer muchas comodidades para realizar experimentos e irradiaciones en su núcleo.

Consiste de un tanque, un núcleo con sus elementos combustibles, facilidades de irradiación, el blindaje y otros ítems detallados a continuación:

*El tanque del reactor:* Es un cilindro vertical de acero inoxidable de 4m de diámetro y 11m de altura.

*El núcleo:* Es el lugar donde se alojan los elementos combustibles en los cuales se producen las reacciones de fisión. Se sitúa en la parte inferior del tanque del reactor, que normalmente se encuentra lleno de agua desmineralizada durante la operación normal del reactor. El calor generado en el núcleo es transferido al agua que circula por los espacios libres entre las cajas que contienen a los elementos combustibles, el que a su vez lo transfiere mediante los intercambiadores de calor al agua que circula por el circuito secundario, como se muestra en la figura 1.3. El núcleo típico de trabajo está constituido por 29 elementos combustibles enriquecidos con 20 % de  $U^{235}$  y 2 barras de control y 3 de seguridad.

*Barras de control:* Son hechas de una aleación de cadmio, plata e indio. Son usadas para controlar el nivel de potencia del reactor, mediante un porcentaje determinado de inserción en el núcleo.

*Barras de seguridad:* Son similares a las de control y al igual que éstas están suspendidas encima del núcleo por electroimanes, los que en caso de ser necesario se des-energizan y caen por efecto de la gravedad al núcleo del reactor, asegurando el apagado inmediato del mismo (SCRAM).

*Blindaje :* Asegura que la exposición máxima en lugares contiguos de trabajo

esté por debajo de los límites autorizados. El blindaje del reactor, como se aprecia en la figura 1.2, en la dirección radial tiene un espesor de 2m y es de concreto pesado ( $2.7 \text{ gr/cm}^3$ ) y 9m de agua en la dirección axial.

*Grilla* : En esta se encuentran colocados los 29 elementos combustibles. Está colocada sobre una mesa de 4 patas ancladas al fondo del tanque. En la misma se encuentran 28 posiciones de irradiación.

*Cono de conexión y sistema de refrigeración* : El cono conecta la grilla con el ducto de succión del sistema primario, el mismo que sirve para enfriar el núcleo. El calor extraído se disipa al medio ambiente a través de las torres de enfriamiento del sistema de refrigeración secundario. Cuando el flujo disminuye, las clapetas que se hallan a la salida del núcleo, se abren automáticamente por gravedad, lo que permite refrigerar al núcleo en el modo de convección natural.

*Cámaras de ionización y mesa de soporte* : Se encuentran al lado de la grilla.

*Facilidades de irradiación*: Compuesta por 28 posiciones de irradiación en la grilla, tres tubos radiales, un tubo tangencial, un tubo radial para neutrografía, dos sistemas neumáticos para colocación de muestras a irradiar y una columna térmica, tal como se observa en la figura 1.2.

*Puente de mecanismos*: Ubicado a nivel + 11m y sobre el tanque del reactor, es el soporte para los mecanismos de las barras de control y otros equipos de medición y operación del reactor.

*Mecanismos de las barras de control y seguridad* : Sostiene a las barras de control y de seguridad, tienen pequeños motores para subirlas y bajarlas. Son de acero inoxidable y están diseñadas para absorber las vibraciones debidas a eventos sísmicos y así evitar accidentes.

Además, el reactor RP10 cuenta con los siguientes sistemas y dispositivos que permiten lograr una operación normal y segura de acuerdo a las normas regulatorias establecidas por la autoridad competente.

### *Sistema de refrigeración*

El sistema de refrigeración es el encargado de extraer el calor producido en los elementos combustibles del núcleo debido a las reacciones de fisión que en ellos ocurren. El medio de refrigeración del primario es agua desmineralizada que atraviesa el núcleo por los canales refrigerantes de los elementos combustibles para llevar el calor allí producido hacia el intercambiador de calor, donde se transfiere al refrigerante del secundario, el cuál a su vez lo disipa al ambiente a través de las torres de enfriamiento, como se observa en la figura 1.3.

Los sistemas de refrigeración del circuito primario y del secundario están totalmente separados y se relacionan únicamente por medio del intercambiador de calor, mediante el cuál, el refrigerante primario, que es el que está en contacto con el núcleo, entrega su energía al refrigerante del secundario que está a menor temperatura. Esta separación física de los refrigerantes de cada circuito se debe a consideraciones de seguridad, por lo que el sistema de refrigeración del primario es considerado como una barrera en caso de que se produzca alguna fuga de material radiactivo.

El sistema de refrigeración del primario cuenta con tres ramas que funcionan en paralelo, cada una posee una bomba centrífuga y un intercambiador de calor dando un caudal de enfriamiento de  $1650 \text{ m}^3 / \text{h}$

El sistema de refrigeración secundario también tiene 3 ramas que funcionan en paralelo, cada rama posee una bomba centrífuga y una torre de enfriamiento donde finalmente se disipa el calor del núcleo.

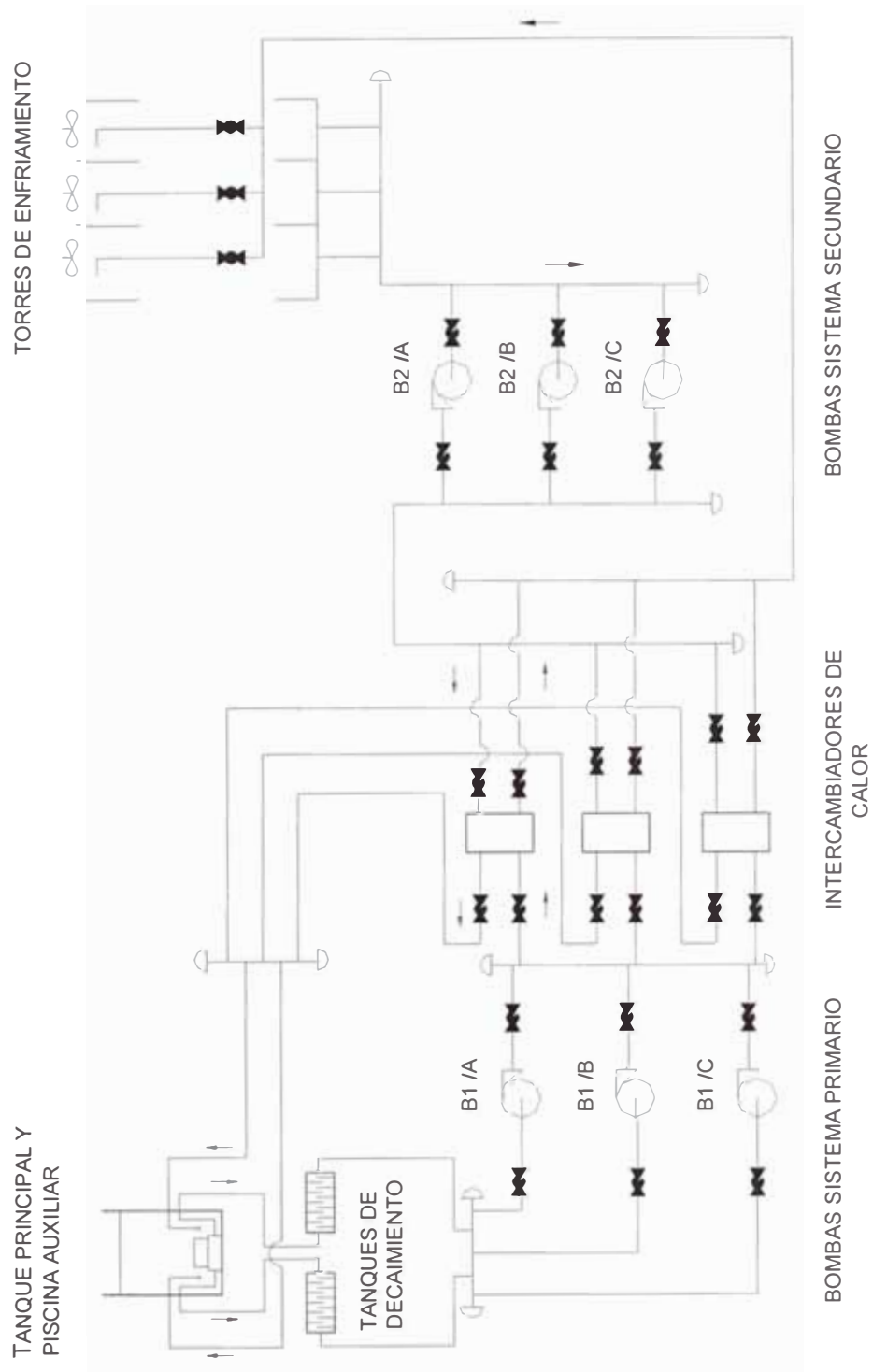


FIG. 1.3 Sistema de refrigeración del reactor RP10



### Sistema de ventilación y acondicionamiento de aire del edificio del reactor

Esta diseñado con el fin de mantener el hall del reactor con una presión negativa de 15 mm columna de agua respecto del exterior, de modo que la circulación de aire se establezca siempre desde las áreas no contaminadas hacia zonas que potencialmente pueden estarlo y proteger el ambiente exterior del aire que contenga radioactividad.

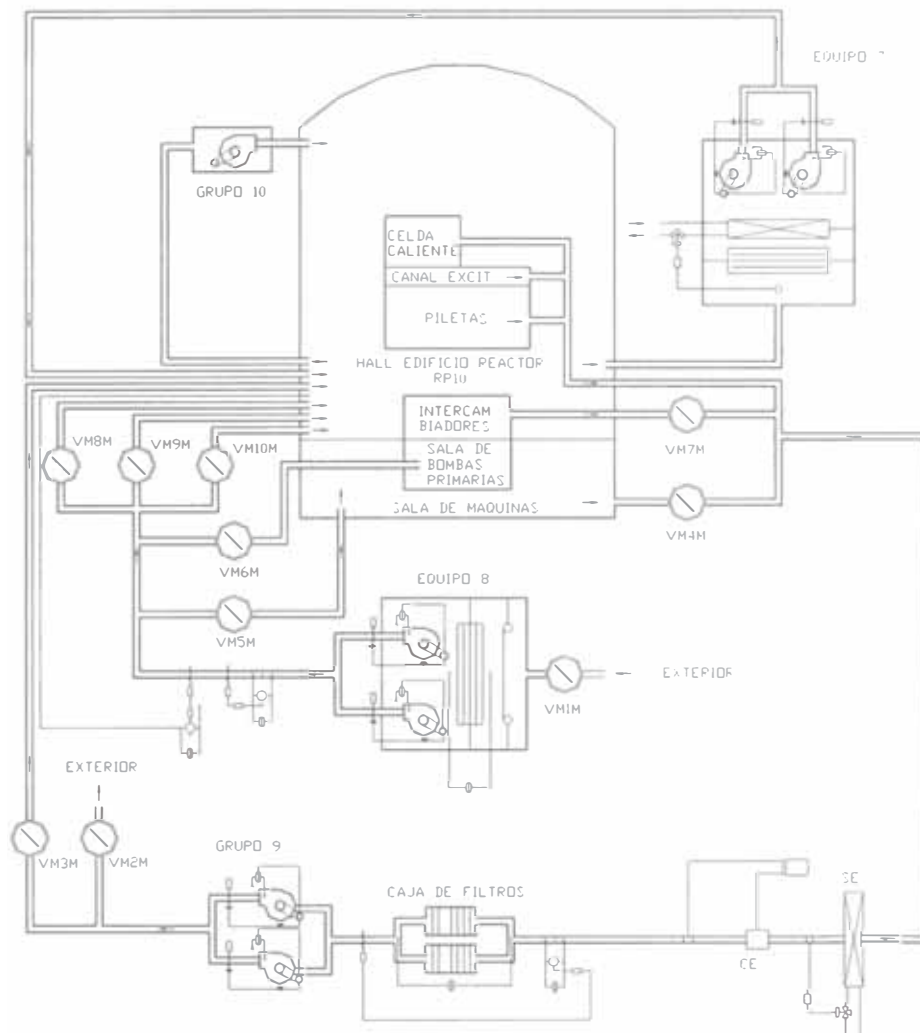


Fig. 1.4 Sistema de ventilación y acondicionamiento de aire del edificio del RP10

Son también funciones de este sistema, filtrar el aire y retener por absorción los aerosoles y el yodo radiactivos evitando que sean expulsados al exterior (ventilación normal) o reinyectados al hall del reactor (ventilación de emergencia), así como la recirculación y la homogenización del aire del edificio del reactor con la finalidad de lograr adecuadas condiciones ambientales para el correcto funcionamiento de los equipos y desarrollo de las tareas. La purificación del aire que se extrae del hall, se realiza a través de la siguiente secuencia de filtrado:

1. Pre-filtrado;
2. Filtro absoluto;
3. Filtro de carbón activado;
4. Filtro absoluto.

Principales componentes del sistema:

- Equipo No. 7 de homogenización del hall del reactor
- Equipo No. 8 de inyección de aire exterior
- Grupo No. 9 de extracción de aire del edificio del reactor
- Equipo No. 10 de homogenización del casquete del reactor
- Una caja de filtros, con clapetas de cierre hermético de accionamiento manual, que permiten independizar los grupos de filtros para proceder a su recambio
- 10 válvulas de cierre hermético
- Un calefactor y un sistema de enfriamiento

Cada uno de los equipos se encuentra duplicado, operando solamente uno de ellos, mientras el otro está a la espera de entrar en operación en caso que el primero salga de servicio por avería ó por trabajos de mantenimiento.

Los equipos de ventilación son en su totalidad, fácilmente accesibles para

efectuar pruebas periódicas e inspecciones durante la operación normal del reactor. La ventilación asegura en los lugares de trabajo condiciones adecuadas de seguridad y protección radiológica. Las salas de bombas primarias e intercambiadores son ventiladas desde abajo hacia arriba aprovechando la circulación establecida por la convección natural.

A manera de prevención ante fallas del sistema, el diseño del mismo es tal que la falta de energía eléctrica ó de presión de aire en el sistema de comando, produce el cierre de las válvulas de aislamiento.

Como se aprecia en la figura 1.4, el ingreso de aire al hall del reactor se efectúa a través del equipo No 8 y es distribuido por medio de tres ductos verticales que tienen rejillas de inyección en distintos niveles. A fin de contribuir al establecimiento de un circuito de aire cerrado en caso de accidente en el hall del reactor (ventilación de emergencia), el equipo cuenta con una válvula de cierre hermético en la toma de aire VM1M y persianas de cierre en la descarga de los ventiladores, todas accionadas neumáticamente. La extracción de aire se efectúa por medio grupo No 9 que toma el aire de la zona de piletas, como así también en la sala de intercambiadores, sala de máquinas, celda caliente y facilidades de irradiación y luego de hacerlo pasar por los filtros HEPA y filtros de carbón activado, lo elimina al medio ambiente a través de una chimenea de 35m de altura.

La presión negativa en el hall se logra inicialmente haciendo vacío a través del grupo No. 9 que luego se mantiene por la acción conjunta del equipo No.8 y del mencionado grupo No 9.

#### Modos de funcionamiento del sistema

Ventilación normal.- Se establece cuando el total del aire exterior ingresa a través de la unidad de entrada de aire del equipo No 8 y es expulsado al exterior, previamente filtrado por el grupo No 9, el equipo No 7 de

tratamiento y homogenización permanecerá funcionando.

Ventilación de emergencia (ver figura 1.4).- En caso de accidente con emisión de material radiactivo, se procede a pasar de ventilación normal a ventilación en emergencia, con lo cuál se cierra herméticamente la persiana de toma de aire exterior VM1M (se apaga el equipo No 8), la toma de aire en la sala de intercambiadores VM7M, la sala de máquinas VM4M y la persiana de expulsión al exterior VM2M, abriendo la de recirculación VM3M, estableciéndose de este modo un circuito de aire cerrado a través de los filtros, hasta lograr valores permisibles de concentración de actividad en el hall del reactor. El equipo No 7, de recirculación permanece en funcionamiento cumpliendo la función de homogenizador y contribuyendo en el mantenimiento de la presión negativa, al no permitir que la temperatura se eleve debido a cargas propias del local. La sala de bombas e intercambiadores, como así también la sala de máquinas, permanecerán herméticamente cerradas a efectos de evitar la contaminación de dichas areas.

#### *Sistema de purificación del agua del circuito primario*

Mantiene un alto grado de pureza del agua del sistema primario, con el propósito de reducir la corrosión de los materiales del reactor. Elimina los posibles productos de fisión y de activación en las columnas de intercambio iónico que posee.

#### *Instrumentación y control*

Permiten una operación segura y confiable del reactor y de sus sistemas auxiliares, consta de 2 subsistemas:

Instrumentación neutrónica.- Permite controlar la operación del reactor mediante la medición de los flujos y de otros parámetros neutrónicos. El

sistema comprende una cadena de arranque que funciona con 3 contadores de fisión y una cadena de marcha que funciona con 3 cámaras de ionización compensadas. La operación del sistema se realiza con un conjunto de 5 barras. Tres de estas barras son denominadas de seguridad y están suspendidas encima del núcleo por electroimanes, los que de ser necesario se des-energizan y caen por efecto de la gravedad al núcleo del reactor asegurando el apagado inmediato del mismo (SCRAM). Las otras 2 barras, que se denominan de control, sirven para controlar el nivel de potencia del reactor, mediante un porcentaje determinado de inserción en el núcleo.

Instrumentación convencional.- Sirven para indicar instantáneamente el estado de los parámetros convencionales del proceso como la temperatura de salida del núcleo, el caudal del primario, la diferencia de presión en el núcleo, etc. ó para realizar alguna acción de control. Se clasifican de acuerdo a la función que desempeñan:

Control automático: Aquellas que sirven para mantener automáticamente ciertas variables dentro de los rangos preestablecidos, por ejemplo los niveles de agua en el tanque del reactor y en las torres de enfriamiento.

Alarma: previene al operador que los valores de alguno de los parámetros estén fuera del rango permitido.

Seguridad: protege los componentes de la planta, previniendo su operación bajo condiciones inadecuadas, por ejemplo nivel sísmico, caudal del primario, etc.

Enclavamiento: permite realizar ciertas maniobras sólo cuando ciertas operaciones predeterminadas han sido cumplidas, o cuando los valores de ciertos parámetros están dentro de un rango predeterminado, por ejemplo los indicadores de posición de barras, de contadores de fisión, etc.

#### 1.4.- ORGANIZACION INTERNA

A continuación se describen las partes de la organización del IPEN que están directamente relacionadas con la mejora de la seguridad y la disponibilidad de la operación del RP10:

##### *Dirección General de Instalaciones*

###### a.- Objetivo

Es el órgano responsable de planificar, programar, ejecutar y supervisar las actividades relacionadas con la explotación en condiciones de seguridad de las instalaciones nucleares y radiactivas del IPEN.

###### b.- Líneas de autoridad

La Dirección General de Instalaciones de la Dirección Ejecutiva

###### c.- Funciones Generales

- Programar, ejecutar y supervisar la operación de las instalaciones nucleares y radiactivas en condiciones óptimas y seguras. Actuar como entidad responsable ante la Autoridad Nacional
- Programar , ejecutar y supervisar las actividades de mantenimiento de las instalaciones nucleares radiactivas
- Actuar como contraparte en todas las operaciones comerciales.
- Prestar servicios a terceros
- Realizar otras funciones en el ámbito de su competencia

###### d.- Organización

A su vez la Dirección General de Instalaciones está constituida por:

- Departamento de Garantía de Calidad
- Dirección de Reactores

## *Dirección de Reactores*

### a.- Objetivo

Planificar, programar, controlar y supervisar las actividades relacionadas con la explotación óptima y segura del reactor.

### b.- Línea de Autoridad

La Dirección de Reactores depende de la Dirección General de Instalaciones

### c.- Funciones

- Planificar y programar la operación económica del RP-10
- Verificar y preveer el suministro de requerimientos para el cumplimiento de las condiciones de la licencia de operación de la instalación y del personal
- Programar el uso de las facilidades de irradiación
- Ejecutar las acciones necesarias para mantener actualizada la documentación técnica y contractual del RP-10
- Mantener actualizados los costos de operación del RP-10
- Desarrollar los estudios teóricos- experimentales que permitan un desempeño más económico y seguro del reactor
- Realizar otras funciones en el ámbito de su competencia

### d.- Organización

A su vez la Dirección de Reactores esta constituida por:

- Departamento de operación
- Departamento de mantenimiento
- Departamento de cálculo, análisis y seguridad

## *Departamento de operación*

### a.- Objetivo

Programar, dirigir, efectuar y controlar la operación del RP10, de acuerdo a

los límites y condiciones establecidas en la licencia de operación y realizar las acciones necesarias, para tener una disponibilidad de uso permanente del reactor.

b.- Línea de autoridad

El departamento de operación depende de la Dirección de Reactores

c.- Funciones

- Programar, dirigir y controlar las acciones necesarias para la producción de radioisótopos y proveer servicios de irradiaciones a los usuarios internos y externos
- Realizar las acciones necesarias para obtener y mantener vigente la licencia de operación de sus instalaciones y de su personal, así como supervisar el cumplimiento de los límites y de las condiciones de la licencia
- Desarrollar programas y ejecutarlos de acuerdo a los procedimientos para la correcta operación del RP-10 y verificar su cumplimiento
- Participar en la formulación y cumplimiento del programa de garantía de calidad de la Dirección General
- Coordinar y ejecutar programas de trabajo con otras áreas para optimizar el uso del reactor
- Coordinar la elaboración, actualización e implementación de los planes de emergencia radiológica e industrial. Realizar periódicamente simulacros de emergencia
- Realizar otras funciones en el ámbito de su competencia

*Departamento de mantenimiento*

a.- Objetivo

Programar y ejecutar las actividades de mantenimiento del RP10



b.- Línea de autoridad

El departamento de mantenimiento depende de la Dirección de Reactores.

c.- Funciones

- Programar y desarrollar actividades de mantenimiento preventivo y correctivo del RP10 y de las facilidades de irradiación
- Formular programas, manuales y procedimientos de mantenimiento y actualizarlos permanentemente
- Mantener un stock mínimo de repuestos, para garantizar la operación del RP10 las veces que sea requerido
- Participar en la formulación y cumplimiento del programa de garantía de calidad, para el adecuado mantenimiento del RP10
- Planificar y dirigir la capacitación del personal de mantenimiento
- Apoyar y participar activamente en los planes y simulacros de emergencias
- Realizar otras funciones en el ámbito de su competencia

*Departamento de cálculo, análisis y seguridad*

a.- Objetivo

Programar y ejecutar las actividades relacionadas con los cálculos y mediciones experimentales que optimice la operación y seguridad de las instalaciones de la Dirección General.

b.- Línea de Autoridad

El departamento de cálculo, análisis y seguridad depende de la Dirección de Reactores.

c.- Funciones

- Programar, ejecutar y evaluar los cálculos y las mediciones experimentales periódicamente para mantener actualizados los parámetros nucleares y convencionales del reactor, para la utilización

óptima y segura del RP10, así como desarrollar e implementar permanentemente nuevos códigos de cálculo y/o técnicas experimentales de medición que permitan obtener mejores resultados

- Realizar las acciones necesarias para proponer las alternativas que aseguren la utilización más adecuada y económica del combustible nuclear
- Realizar el análisis de seguridad desde el punto de vista determinístico y probabilístico, así como proponer las medidas que permitan evitar y mitigar las consecuencias radiológicas de un posible accidente
- Estudiar, recomendar y proponer las modificaciones de las instalaciones, para mejorar la disponibilidad y seguridad de los reactores de la Dirección, así como de sus facilidades de irradiación
- Participar en grupos multidisciplinarios en la elaboración y desarrollo de proyectos
- Desarrollar las actividades que sean requeridas por otras unidades orgánicas de la Institución
- Mantener permanentemente actualizados los informes de seguridad
- Apoyar y participar activamente en los planes y simulacros de emergencia
- Realizar otras funciones en el ámbito de su competencia

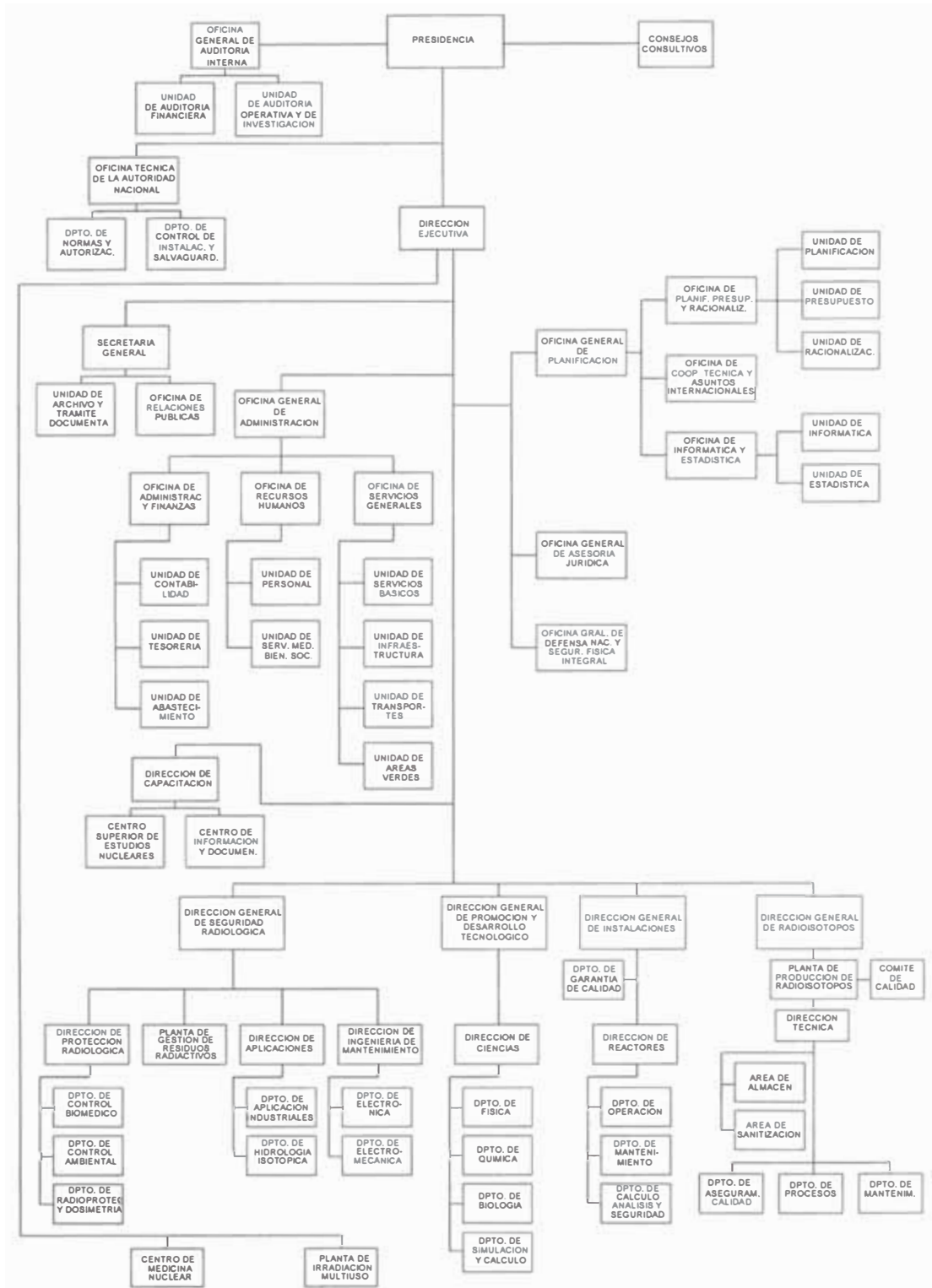


Fig. 1.5 Organigrama del IPEN

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEORICO**

#### **2.1.- DESCRIPCION DEL METODO EMPLEADO**

A continuación se describen los pasos para la aplicación del método para aumentar la disponibilidad de un sistema tecnológico genérico:

- a) **Objetivos y alcances.-** Se identifican cuales son los objetivos, los alcances del estudio y las informaciones requeridas. Asimismo se conforma un grupo de trabajo que debe incluir al menos una persona del departamento de mantenimiento y un analista de confiabilidad de sistemas.
- b) **Selección de sistemas.-** Se determina a qué sistema se aplicará el método y el nivel de resolución del análisis (planta, sistema, subsistema, componente, parte)
- c) **Análisis de las fallas funcionales.-** Se analizan las diferentes funciones que desempeña el sistema y se seleccionan los modos de falla funcionales cuyos efectos son más severos.
- d) **Selección de ítem críticos.-** Para cada modo de falla funcional seleccionado se identifican los componentes que son potencialmente críticos. Adicionalmente pueden incluirse los ítem con alta tasa de fallas, alto costo de reparación, baja mantenibilidad ó aquellos que poseen los mayores tiempos de reparación. En sistemas complejos para identificar

los ítem críticos se aplica el análisis de importancia.

- e) Análisis de los modos de falla y de los efectos.- Se identifican los modos de falla dominantes de los ítem críticos encontrados en el punto anterior.
- f) Selección de las acciones de mantenimiento.- Para cada modo de falla identificado en el paso anterior, se aplica el cuestionario que se detalla en la figura 2.1, para proponer las correspondientes tareas de mantenimiento. También se pueden determinar otras acciones complementarias, analizando los modelos de confiabilidad de los ítems más importantes hallados en el punto d.

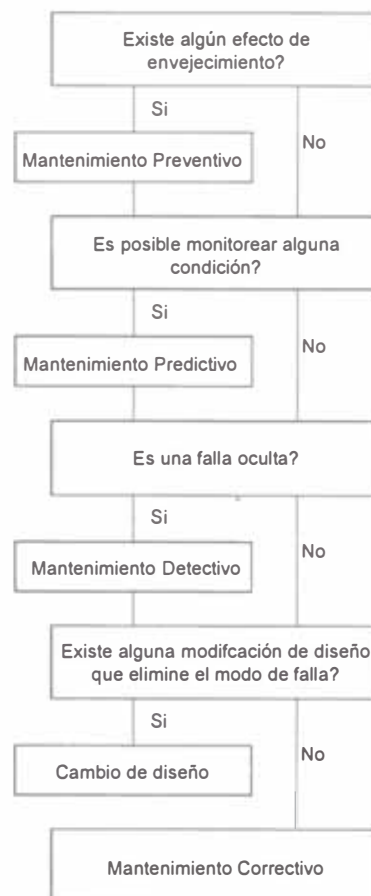


Fig. 2.1 Diagrama para la selección de tareas de mantenimiento

- g) Análisis costo-beneficio.- Cada una de las acciones de mantenimiento identificadas en el punto anterior, deben satisfacer los 2 criterios siguientes: 1) *aplicabilidad*, si pueden eliminar la falla ó reducir su probabilidad de ocurrencia a un nivel aceptable; 2) *Costo efectividad*, es decir que no costaran más que el efecto de la falla que van a prevenir.

## 2.2.- ELEMENTOS DEL ANALISIS DE CONFIABILIDAD

### Sistemas tecnológicos

Es un conjunto finito de elementos físicos discretos, que desempeña una función (o varias) de interés. Esta función resulta de la interacción de los elementos físicos ya sea entre sí o entre ellos y otros elementos físicos no pertenecientes al conjunto. Además, estos sistemas deben estar claramente identificados antes de encarar su análisis de confiabilidad, para ello se establece:

- La extensión del sistema: significa establecer los límites externos del sistema, a los efectos de que éste quede globalmente considerado e idealmente separado del resto del universo.
- Los subsistemas y componentes del sistema: significa proceder a una partición conveniente del sistema con vistas a facilitar su estudio. Toda parte así lograda, puede o no considerársela susceptible de una nueva partición. Si se la considera particionable, la parte se la denomina subsistema; si no se la denomina componente. Los componentes constituyen los límites internos del sistema bajo estudio, con los cuales se define la resolución del análisis de confiabilidad del mismo. Por otra parte dado que diversos conceptos de confiabilidad se aplican por igual a sistemas, subsistemas o componentes, en muchos casos se usa el termino “dispositivo” para denominar indistintamente a un sistema, subsistema o a un componente.

- La función del sistema y las de los subsistemas y componentes que lo forman: significa definir claramente porqué existe el sistema, cuáles son los modos de falla de las funciones del sistema, subsistemas y componentes.
- Las interacciones del sistema, subsistemas y componentes: significa determinar el grado de independencia o dependencia de las funciones del sistema con respecto a los subsistemas y componentes que lo forman o con respecto a otros sistemas.

#### Definición de componente

Es toda parte de un sistema tecnológico, que se considera indivisible a los efectos del análisis de confiabilidad que se pretende realizar. Un componente puede, a su vez, estar formado por varias partes, pero al ser considerado como una unidad, su confiabilidad no puede alterarse ni calcularse actuándose sobre sus partes constituyentes (aunque fuese físicamente posible) y en tanto se lo considere asociado al sistema. De hacerlo, el componente dejaría de ser tal, para transformarse en un subsistema del sistema que integra. Si el sistema requiere una mejora en la confiabilidad de un componente específico, entonces éste deberá ser cambiado como un todo, por otro de mejores propiedades.

#### Clasificación de componentes.-

##### Por su naturaleza

- a) Componentes no reparables.- Son componentes que experimentan una única falla a lo largo de su historia; no pueden ser reparados por razones técnicas o económicas. La única falla que experimentan se denomina falla catastrófica, pues a partir de ella el componente se

considera destruido. Por ejemplo, los transistores, las lámparas eléctricas, los tornillos, los rodamientos, etc.

- b) Componentes reparables.- Son componentes que por sus características técnicas y por razones económicas conviene sean reparados luego de cada falla. Es decir que experimentan varias fallas a lo largo de su vida útil, con la condición que quedan como nuevos después de cada reparación. La historia de estos componentes consiste entonces, en periodos alternativos de operación y reparación. Por ejemplo, los motores eléctricos, las bombas de agua, las válvulas neumáticas, etc.

Por el tipo de servicio que prestan

- a) Componentes en operación (on line).- Son componentes cuya función debe ser prestada en relación con el sistema que integran, de manera permanente. Por ejemplo, los pistones de motores térmicos, los transistores de radiorreceptores, etc.
- b) Componentes en espera (stand by).- Son componentes cuya función debe ser prestada, en relación con el sistema que integran, a partir del momento en que son llamados a hacerlo, habiendo estado previamente a la espera de ser demandados. Por ejemplo, las alarmas, los frenos de emergencia, etc.
- c) Componentes en demanda (ciclados).- Son componentes que en un instante de interés y con referencia al sistema que integran, se les requiere que cambien uno de sus estados normales de funcionamiento por otro, una o más veces, en el transcurso del tiempo. Por ejemplo, el arranque o parada de un motor, el aumento o disminución de la velocidad de marcha de un motor, etc.



## Concepto de falla de un dispositivo

Se dice que un dispositivo falla, cuando no lleva a cabo la función que le compete, durante un periodo dado y bajo determinadas condiciones de contorno. Resulta entonces que la falla de un dispositivo es un suceso que requiere especificar de que modo el dispositivo no funciona (modo de fallo), cuando puede ocurrir el suceso y bajo que condiciones puede acontecer. Por ejemplo, un relé de un circuito eléctrico complejo, a pesar de ser operado correctamente, puede no cerrarse en el momento en que debería hacerlo (modo de falla: "falla al cerrar") o puede cerrar a destiempo; también, si no es operado correctamente, puede no cerrarse debidamente (condiciones de contorno impropias). Por lo tanto, la falla de un dispositivo es un concepto no solo inherente al dispositivo en sí mismo, si no también relativo al resto del sistema que tal dispositivo integra.

## Clasificación de las fallas

De acuerdo al origen de la falla

- a) Falla primaria.- es toda falla que ocurre en un dispositivo, cuando éste se encuentra operando dentro de sus condiciones normales de funcionamiento.
- b) Falla secundaria.- es toda falla que ocurre en un dispositivo, cuando éste se encuentra operando fuera de sus condiciones normales de funcionamiento.
- c) Falla de comando.- es toda falla que ocurre en un dispositivo, debida a la falla del dispositivo de control que ordena su funcionamiento.

De acuerdo a la severidad de la falla

- a) Falla catastrófica.- Una falla catastrófica ó crítica es una falla repentina y

completa. Una falla como está, ocasiona la suspensión de una ó más funciones del componente. Entonces se requiere de una acción correctiva para restaurar las funciones del componente. Como ejemplos se pueden mencionar:

- mecánicas: rotura del amortiguador, etc.
- electromecánicas: falla del relé del sistema de protección, etc.
- sensores: cámara de ionización corto circuitada, rotura de termocupla, etc.

b) Falla por degradación.- Una falla por degradación es a la vez gradual y parcial. El equipo en cuestión todavía está trabajando, pero ciertas características, que no son críticas respecto a la función principal del componente, se han degradado. Durante la operación de un ítem degradado, al menos una de sus funciones se ve comprometida, produciéndose una salida reducida, incrementada ó errática. Con el tiempo una falla de este tipo puede evolucionar en una falla completa (crítica). Ejemplos de una falla degradada pueden ser:

- mecánicas: pérdidas en los sellos de una bomba, válvulas que no pueden abrir completamente
- electromecánicas: movimiento de barras de control muy lento
- eléctricas: magneto de las barras de control necesita mucho más corriente que la nominal
- electrónicas: amplificador logarítmico mal calibrado
- sensores: apilamiento de pulsos en el contador Geiger Muller

c) Fallas incipientes.- El término describe una imperfección en el estado o condición de un ítem, componente ó sistema, tal que si no se toma alguna acción correctiva, acontecerá una falla por degradación o catastrófica. Como ejemplos de este tipo de falla se puede citar:

- mecánicas: humedad en la caja de cambios, soldaduras con

rajaduras.

- electromecánicas: pérdida de la cápsula de protección contra el polvo de un relé.
- electrónicas: resistores sobrecalentados
- sensores: corrosión de la cubierta de un sensor.

### Hipótesis simplificadoras

El análisis de confiabilidad de los sistemas tecnológicos, requiere la formulación de hipótesis simplificadoras cuyo objeto es lograr un modelo matemático suficientemente manejable:

- Todo dispositivo presenta dos estados funcionales: éxito o falla. Esta hipótesis permite la utilización de modelos lógicos bivalentes, que en muchos casos son suficientes para representar situaciones reales.
- Algunos subsistemas o componentes son independientes: Esta hipótesis supone que el éxito o la falla de uno o más subsistemas o componentes, en nada afectan a las funciones del sistema que integran o a las funciones de otros subsistemas o componentes del mismo sistema.
- Los dispositivos son activos o pasivos: esta hipótesis tiene en cuenta el hecho de que existen dispositivos que transforman una cantidad de entrada en otra cantidad de salida (v.g. un motor de combustión interna transforma energía química en energía mecánica; un radio receptor transforma una señal eléctrica en una señal acústica, etc.); estos tipos de dispositivos se denominan activos. Por otra parte, existen dispositivos que transfieren una cantidad dada desde su entrada hasta su salida, sin modificaciones (v.g. un conductor eléctrico transfiere una corriente desde un punto a otro de un circuito; una columna transfiere una fuerza desde su cúspide hasta su base, etc.) estos tipos de

dispositivos se denominan pasivos. Dado que es mucho más factible que falle un dispositivo activo que uno pasivo, es admisible, en muchos casos, considerar solo los dispositivos activos que integran un sistema de interés.

### Criterios de confiabilidad

Los criterios de confiabilidad son principios de diseño empleados en el proyecto de sistemas tecnológicos, que contribuyen a mejorar la confiabilidad de los mismos. Algunos de tales criterios son los siguientes:

- a) Redundancia: un sistema es redundante cuando está formado por dos o más subsistemas idénticos e independientes entre sí, cada uno de los cuales puede llevar a cabo la función del sistema.
- b) Diversidad: un sistema es diverso, cuando está formado por dos o más subsistemas diferentes e independientes entre sí, cada uno de los cuales puede llevar a cabo la función del sistema.
- c) Segregación: separación física entre los diversos subsistemas o componentes de un sistema, mediante barreras adecuadas, incluyendo el simple alejamiento entre ellos.
- d) Falla a favor de la seguridad ó falla segura: falla de un sistema por la cual ésta inicia (dispara) la detención (parada) de otro sistema con el cual está asociado.
- e) Simplicidad en el diseño: la simplificación de las características de diseño de un sistema, puede mejorar su confiabilidad y a la vez conservar la función que de él se pretende.

## 2.3.- CONFIABILIDAD DE COMPONENTES

### *Concepto de confiabilidad*

El empleo del termino confiabilidad posee dos connotaciones, una es

probabilística en su naturaleza y la otra es determinista. La definición más aceptada de la confiabilidad, es aquella que la define como la habilidad de un dispositivo de llevar a cabo exitosamente su función durante un tiempo determinado y sujeto a determinadas condiciones de contorno. Así cuando un ítem realiza mejor su función, será más confiable. Esta *habilidad* puede ser definida a través de la probabilidad (connotación probabilística) ó de una forma determinista. La acepción determinista trata con la explicación del *cómo* y el *porqué* los ítems fallan, y *cómo* puede ser diseñado, ensayado y supervisado para evitar la ocurrencia de dichas fallas. Como ejemplos se pueden mencionar el diseño de elementos más resistentes y durables, las mejoras en el diseño para soportar condiciones ambientales adversas, la minimización de las cargas y los esfuerzos aplicados durante la vida útil de un ítem, la propuesta de un programa de mantenimiento preventivo para minimizar la ocurrencia de fallas.

Para cuantificar la confiabilidad de un dispositivo, se recurre a su acepción probabilística, la cuál la define como la probabilidad de que el tiempo de vida  $T$  supere al tiempo de misión  $t$ , es decir la confiabilidad  $R(t)$  es la probabilidad de que el componente no falle durante su tiempo de misión  $t$ , bajo ciertas condiciones de operación  $c_1, c_2, \dots, c_n$ ; es decir:

$$R(t) = P(T > t \mid c_1, c_2, \dots) \quad (2.1)$$

Donde:

$T$  es una variable aleatoria que representa el tiempo de vida del componente

$t$  es el tiempo de misión del componente

$c_1, c_2, \dots$  son las condiciones de contorno

#### a) Función de confiabilidad

Si  $f(t)$  es la función de densidad de probabilidad de la variable aleatoria  $T$ ,

entonces la probabilidad de falla de un ítem como una función del tiempo, está dada por:

$$P(T \leq t) = \int_0^t f(\theta) d\theta = F(t), \quad \text{para } t > 0 \quad (2.2)$$

Donde  $F(t)$  es la probabilidad de que el tiempo de vida no supere al tiempo de misión, es decir  $F(t)$  es la probabilidad de que el componente falle durante el tiempo de misión. Esta función se la denomina inconfiabilidad del componente. Luego la confiabilidad  $R(t)$  estará expresada por:

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(\tau) d\tau \quad (2.3)$$

b) Tasa de fallas

Es la probabilidad por unidad de tiempo, de que un componente falle en un intervalo  $\tau$  comprendido entre  $t$  y  $t + \tau$ , dado que no ha fallado hasta  $t$ , es decir:

$$h(t) = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} P(t < T \leq t + \tau / T > t) \quad (2.4)$$

por lo tanto si  $\tau \ll 1$ ,  $h(t) \cdot \tau$  es aproximadamente la probabilidad de que el componente falle en el intervalo  $\tau$  comprendido entre  $t$  y  $t + \tau$  dado que no ha fallado hasta  $t$ ; además

$$P(t < T \leq t + \tau / T > t) = \frac{P[(t < T \leq t + \tau) \wedge (T > t)]}{P(T > t)} \quad (2.5)$$

pero

$$(t < T \leq t + \tau) \wedge (T > t) = (t < T \leq t + \tau) \quad (2.6)$$

entonces

$$h(t) = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} \frac{P(t < T \leq t + \tau)}{P(T > t)} \quad (2.7)$$

$$h(t) = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} \frac{P(T \leq t + \tau) - P(T \leq t)}{P(T > t)} \quad (2.8)$$

$$h(t) = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} \frac{F(t + \tau) - F(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.9)$$

Además de acuerdo a la definición de  $f$  y  $F$ , y de (2.3) se tiene:

$$f(t) = \frac{dF}{dt} = - \frac{dR}{dt} \quad (2.10)$$

Luego se llega a:

$$h(t) = \frac{dR}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} = - \frac{d}{dt} [\ln R(t)] \quad (2.11)$$

Es decir:

$$R(t) = \exp \left[ - \int_0^t h(x) dx \right] \quad (2.12)$$

Las funciones  $h(t)$  y  $f(t)$  son determinadas empíricamente en base a los datos de fallas y técnicas estadísticas, a partir de grandes poblaciones de los componentes de interés.

La tasa de fallas  $h(t)$  es una función importante en el análisis de confiabilidad, desde que muestra la variación de la probabilidad de falla conforme transcurre la vida del componente. En la práctica  $h(t)$  exhibe un comportamiento tipo "curva de la bañera" como se puede apreciar en la figura 2.2.

Generalmente la "curva de la bañera" puede ser dividida en tres regiones. La

primera región se denomina "región de mortalidad infantil", la cuál exhibe una tasa de fallos decreciente, caracterizada por las fallas prematuras atribuidas a fallas en el diseño, en la manufactura, en el montaje ó en la construcción. La siguiente es la "región de fallas aleatorias" la cuál presenta una tasa de fallos constante, y se caracteriza por las fallas aleatorias de los componentes. Es el período más conveniente para las aplicaciones. La tercera región, llamada "región de desgaste", la cuál presenta una tasa de fallos creciente y está caracterizada principalmente por los fenómenos de envejecimiento. Este periodo se debe a los desgastes inevitables que sufren los componentes.



Fig. 2.2 Curva de la bañera

En la mayor parte de los casos, se asume que los componentes se encuentran funcionando en la etapa de su vida útil, es decir, cuando la tasa de fallos es constante, por lo cuál las fallas por desgaste ó las fallas iniciales no están incluidas. Por otro lado, es evidente que para aquellos componentes para los cuales la región de fallas aleatorias es más extensa que las otras dos, esté tipo de distribución podría ser el más adecuado. A menudo este es el caso de los componentes eléctricos y mecánicos, en ciertas aplicaciones, cuando los componentes nuevos son seleccionados y solo aquellos que han



pasado las pruebas pre operacionales son utilizados. Para este caso, de acuerdo a las expresiones (2.10) y (2.11) se tiene:

Si  $h(t) = \lambda = \text{constante}$ , luego

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.13)$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.14)$$

### Componentes reparables

Para simplificar el modelado de los componentes reparables se asumen que se cumplen las siguientes hipótesis (reparación normal):

- La reparación comienza inmediatamente después que el componente entra en el estado de falla.
- La reparación dura *un* cierto tiempo.
- La reparación deja al componente en un estado “como nuevo”

De acuerdo con las hipótesis de este modelo, los estados y periodos de funcionamiento y no funcionamiento pueden representarse como sigue:

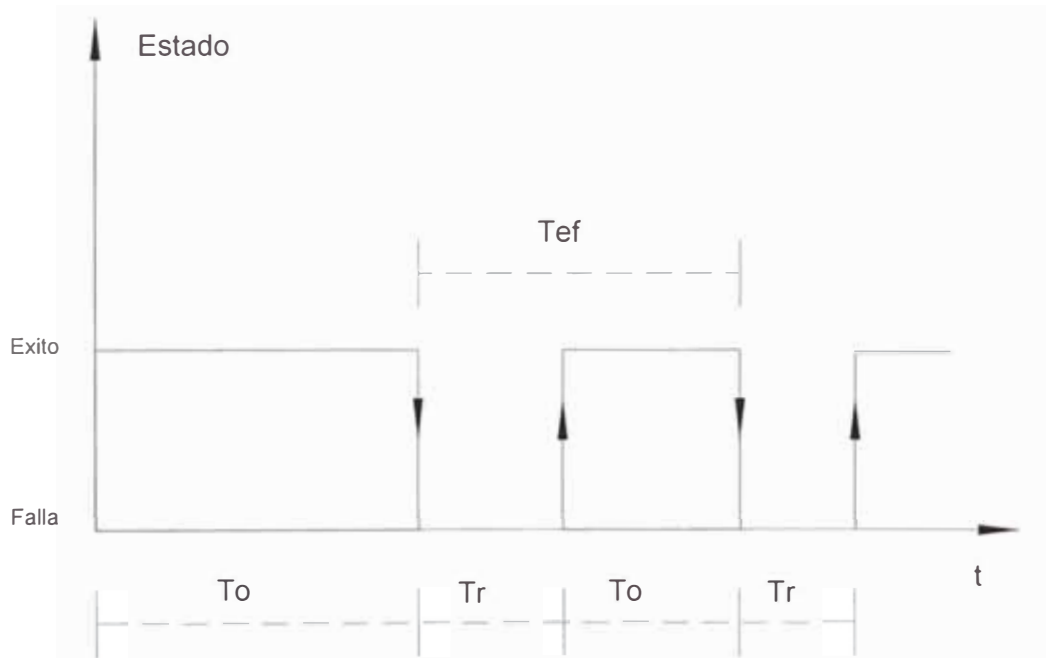


Fig. 2.3 Diagrama de estados de un componente reparable

Como la falla de un componente reparable aparece de una manera imprevista y la reparación implica imponderables técnicos (repuestos fallados, errores de montaje, tiempos de espera, etc.) los periodos de funcionamiento y reparación son variables aleatorias continuas  $T_o$  y  $T_r$  respectivamente, con funciones de distribución  $F_o(t)$  y  $F_r(t)$  y funciones de densidad  $f_o(t)$  y  $f_r(t)$ . Otro periodo que resulta de interés considerar en ciertos casos, es el tiempo entre dos fallas consecutivas del componente, que también es una variable aleatoria continua  $T_{ef}$ , dado que los instantes en que el componente entraría en una primera y luego en una segunda falla, son imprevistos.

De lo expuesto surge que en un instante  $t$  cualquiera, el componente puede estar aleatoriamente, en el estado de éxito o en el estado de falla.

Sea  $X(t)$  el estado del componente en el instante  $t$  (proceso estocástico) cuando:

$X(t) = 1$  el componente está en el estado de éxito en el instante  $t$

$X(t) = 0$  el componente está en el estado de falla en el instante  $t$

Se definen las siguientes características de confiabilidad:

a) Disponibilidad del componente  $A(t) = P [X(t) = 1]$

b) Indisponibilidad del componente  $Q(t) = P [X(t) = 0]$

c) Tiempo medio hasta la falla  $TMHF = E [T_o] = \int_0^{\infty} t f_o(t) dt$

d) Tiempo medio hasta la reparación  $TMHR = E [T_r] = \int_0^{\infty} t f_r(t) dt$

e) Tiempo medio entre fallas  $TMEF = E[T_{ef}] = TMHF + TMHR$

Resulta entonces que  $A(t)$  es la probabilidad de que el componente se encuentre en el estado de éxito en un instante de interés, así mismo la

definición de  $Q(t)$  es la dual de la definición de  $A(t)$ , intercambiando el suceso éxito por el suceso falla.

En lo que sigue se considera el caso de un componente reparable con tasa de fallas  $\lambda$  constante y tasa de reparación  $\mu$  también constante. La definición de  $\mu$  es la dual de la definición de  $\lambda$ , intercambiando el suceso "falla" por el suceso "éxito"; es decir que para un  $\tau$  tomado dentro de un periodo de reparación,  $\mu(t) \cdot \tau$  es, aproximadamente, la probabilidad que el componente funcione en el intervalo  $\tau$  comprendido entre  $t$  y  $t + \tau$ , dado que no ha funcionado hasta  $t$ . Entonces:

$$\begin{array}{ll}
 F_o(t) = 1 - e^{-\lambda t} & F_r(t) = 1 - e^{-\mu t} \\
 f_o(t) = \lambda e^{-\lambda t} & f_r(t) = \mu e^{-\mu t} \\
 R(t) = e^{-\lambda t} & M(t) = 1 - e^{-\mu t} \\
 \text{TMHF} = \frac{1}{\lambda} & \text{TMHR} = \frac{1}{\mu} \quad (2.15) \\
 \text{TMEF} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\mu}
 \end{array}$$

Donde  $M(t)$ , llamada también mantenibilidad, es la probabilidad que el tiempo de reparación sea menor a un tiempo  $t$ , es decir la probabilidad que el componente haya sido reparado en un tiempo  $t$ .

Aplicando un proceso de Markov de dos estados se hallan las expresiones de  $A(t)$  y  $Q(t)$ :

$$\begin{aligned}
 A(t) &= \frac{\mu}{(\lambda + \mu)} + \frac{\lambda}{(\lambda + \mu)} e^{-(\lambda + \mu)t} \\
 Q(t) &= \frac{\lambda}{(\lambda + \mu)} - \frac{\lambda}{(\lambda + \mu)} e^{-(\lambda + \mu)t}
 \end{aligned}$$

Por otra parte, la confiabilidad  $R(t)$  y la inconfiabilidad  $F(t)$  valen:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \text{ y } F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

Que son idénticas al caso de componentes no reparables con  $\lambda$  constante, puesto que estas funciones se consideran en los periodos de operación, y la reparación deja al componente como nuevo (sin memoria). Resulta entonces que  $A(t)$ ,  $Q(t)$ ,  $R(t)$  y  $F(t)$  presentan el siguiente aspecto:

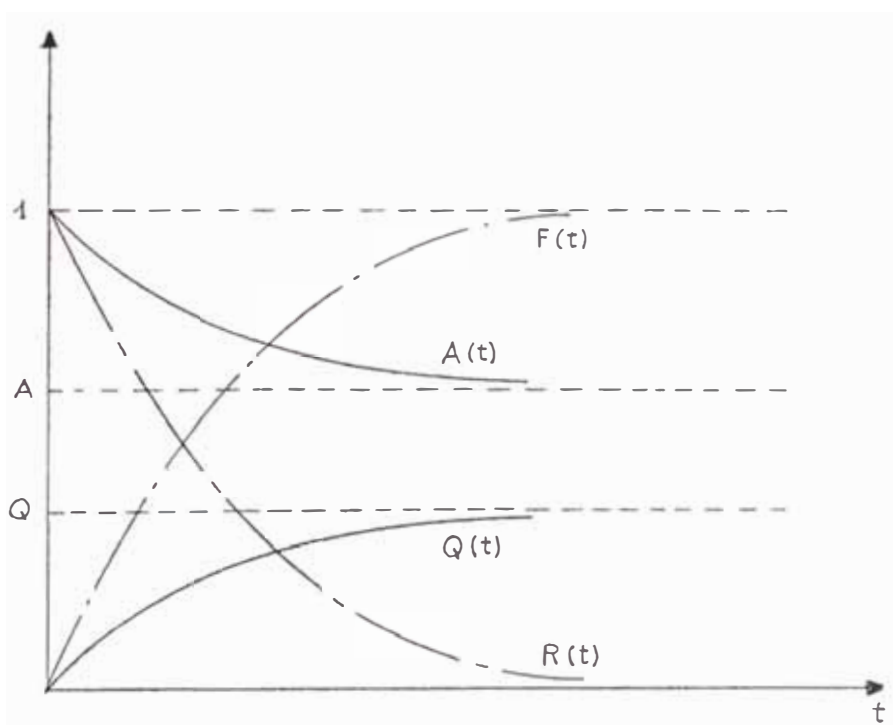


Fig. 2.4 Evolución de la disponibilidad y la confiabilidad

Siendo  $A = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$  y  $Q = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}$  los valores asintóticos de  $A(t)$  y  $Q(t)$

respectivamente. Puede verse que:  $A(t) \geq R(t)$  y  $Q(t) \leq F(t)$

El modelo visto para componentes reparables, admite una interpretación límite.

En efecto, si se supone que la reparación no fuese posible, entonces  $\mu = 0$  ( es decir  $TMHR \rightarrow \infty$  ) por lo que:

$$A(t) = e^{-\lambda t} = R(t) \text{ y } Q(t) = 1 - e^{-\lambda t} = F(t) \quad (2.16)$$

Teniéndose así el modelo para componentes no reparables con  $\lambda$  constante.

Un componente reparable con tiempo de reparación infinito, equivale a un componente no reparable.

Otra interpretación límite del modelo bajo estudio, es su comportamiento a largo plazo. Si  $t \rightarrow \infty$ , entonces:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = A \text{ y } \lim_{t \rightarrow \infty} Q(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = Q \quad (2.17)$$

denominándose a A y a Q, disponibilidad e indisponibilidad límites respectivamente.

Como en la generalidad de los casos prácticos ocurre que  $\mu \gg \lambda$ , resulta ser  $A \approx 1$  y  $Q \ll 1$ ; por lo tanto frecuentemente no hay diferencias apreciables entre los valores de  $A(t)$  y A, o entre los valores de  $Q(t)$  y Q; es decir que en lo que a valores se refiere:

$$A(t) \approx A \text{ y } Q(t) \approx Q$$

Por lo tanto, en el caso del modelo analizado y cuando no se requieren mayores exactitudes, se puede trabajar razonablemente con A y Q, en vez de hacerlo con  $A(t)$  y  $Q(t)$ .

### *Componentes en operación*

Dado un tiempo de misión  $t = T_m$  y un tiempo medio hasta la reparación  $TMHR = T_r$ , las indisponibilidades resultan:

a) Componente no reparable, de (2.15) se tiene  $Q = 1 - e^{-\lambda_o T_m}$  (2.18)

y si  $\lambda_o T_m \ll 1$  entonces  $Q \approx \lambda_o T_m$  siendo  $\lambda_o$  la tasa de fallas del componente en operación

b) Componente reparable, de (2.17) se tiene:

$$Q = \frac{\lambda_o}{\lambda_o + \mu} = \frac{\frac{\lambda_o}{\mu}}{1 + \frac{\lambda_o}{\mu}} = \frac{\lambda_o T_r}{1 + \lambda_o T_r} \text{ y si } \lambda_o T_r \ll 1 \text{ entonces } Q \approx \lambda_o T_r \quad (2.19)$$

## Componentes en espera

### Componente reparable sometido a pruebas periódicas

- a) Indisponibilidad entre pruebas, en este caso  $Q(t)$  aumenta con  $t$  según la expresión:  $Q(t) = F(t) = 1 - e^{-\lambda_s t}$  donde  $0 \leq t \leq T_{ep}$  siendo  $T_{ep}$  el periodo entre pruebas. Esto es así, por que en el instante en que comienza  $T_{ep}$ , el componente está como nuevo. La indisponibilidad media  $\bar{Q}_{ep}$  entre pruebas vale:

$$\bar{Q}_{ep} = \frac{1}{T_{ep}} \int_0^{T_{ep}} Q(t) dt = \frac{1}{T_{ep}} \int_0^{T_{ep}} (1 - e^{-\lambda_s t}) dt$$
$$\bar{Q}_{ep} = 1 - \frac{(1 - e^{-\lambda_s T_{ep}})}{\lambda_s T_{ep}} \quad (2.20)$$

y si  $Q(t) \approx \lambda_s t$  entonces  $\bar{Q}_{ep} = \frac{1}{T_{ep}} \int_0^{T_{ep}} \lambda_s t dt = \frac{\lambda_s T_{ep}}{2}$  (2.21)

- b) Indisponibilidad por fuera de servicio por prueba, llamando  $\tau$  a la duración de la prueba, resulta:

$$Q_p = \frac{\tau}{\tau + T_{ep}}$$

y si  $\tau \ll T_{ep}$  entonces  $Q_p \approx \frac{\tau}{T_{ep}}$

- c) Indisponibilidad por fuera de servicio por reparación, siendo  $T_r =$  TMHR resulta:

$$Q_r = \frac{\lambda_s T_r}{1 + \lambda_s T_r}$$

y si  $\lambda_s T_r \ll 1$  entonces  $Q_r = \lambda_s T_r$

- d) Indisponibilidad total, dado que un componente reparable sometido a pruebas periódicas puede encontrarse en cualquiera de las

situaciones anteriores, la  $Q_t$  resulta:

$$Q_t = Q_{ep} + Q_p + Q_r$$

resultando por tanto :

$$Q_t \approx \frac{\lambda_s T_{ep}}{2} + \frac{\tau}{T_{ep}} + \lambda_s T_r$$

### *Componentes en demanda*

Estos componentes suelen tener las siguientes propiedades:

- Su estado actual de falla o éxito, no depende de los estados anteriores (demandas estocásticamente independientes)
- La probabilidad de ocurrencia de cada estado de falla o éxito, se mantiene constante a lo largo de las demandas, no dependiendo del tiempo

Si se cumplen estas hipótesis, los componentes citados pueden modelarse mediante el denominado modelo de probabilidad constante o modelo p, siendo p la probabilidad de falla por demanda (o ciclo) del componente. Este modelo se aplica cuando las fallas potenciales del componente en su cambio de estado, son inherentes al mismo; es decir cuando tales fallas no están causadas por factores exógenos al componente ó asociadas con el tiempo en que éste se encontró en espera o en operación. Las hipótesis citadas permiten hacer uso del modelo binomial (o modelo de Bernoulli ) para confeccionar el modelo p.

Si durante un periodo dado se efectúan n demandas al componente, la probabilidad  $P(k, n, p)$  que ocurran k fallas en n demandas, siendo p la probabilidad de falla por demanda, viene dada por:

$$P(k, n, p) = \binom{n}{p} p^k (1-p)^{n-k} \text{ con } k \leq n$$

Llamando  $A_d$  a la disponibilidad por demanda del componente y  $Q_d$  a la

indisponibilidad por demanda del mismo, éstas cantidades se definen como sigue:

$$A_d = P(0, n, p)$$

$$Q_d = 1 - P(0, n, p)$$

es decir que  $A_d$  es la probabilidad de que no ocurra ninguna falla en  $n$  demandas y  $Q_d$  es la probabilidad que ocurra una o más fallas en  $n$  demandas.

Entonces:

$$A_d = P(0, n, p) = (1 - p)^n$$

$$Q_d = 1 - A_d = 1 - (1 - p)^n \approx np \text{ si } np < 0.1$$

En la práctica frecuentemente interesa el caso en que  $n = 1$ ; se tiene para esta situación:

$$A_d = 1 - p \text{ y } Q_d = p$$

## 2.4.- METODOS PARA LA ESTIMACION DE PARAMETROS

Una vez que se han definido los modelos de confiabilidad, se estiman todos los parámetros necesarios como: la tasa de fallas, el tiempo de reparación, la frecuencia de pruebas, etc., a partir de la información extraída de los registros de operación y mantenimiento de la planta según la tabla 2.1

### *Estimación de la tasa de fallas*

Se estima la tasa de fallas en espera ó en operación de una distribución exponencial, siguiendo los siguientes pasos:

1. Identificar la población cuya historia de fallas va a ser utilizada para estimar la tasa de fallas común asumiendo que los componentes tienen la misma tasa de fallas.
2. Identificar el periodo de tiempo durante el cual las fallas van a ser contabilizadas.
3. En la población, contar el número total de fallas  $N$  y el tiempo en



espera total T (ó el tiempo de operación total para componentes en operación) para el periodo de contabilización. Se debe tener cuidado en NO contabilizar las acciones de mantenimiento como fallas catastróficas.

4. Estimar la tasa de fallas promedio del componente  $\lambda$  como  $\lambda = N/T$ . Este valor es el estimador de máxima verosimilitud del parámetro  $\lambda$  de una distribución exponencial (ver anexo A3)

### *Estimación del tiempo de reparación*

El tiempo de reparación promedio  $T_r$  es estimado como la sumatoria de los tiempos de reparación observados dividido por el número de reparaciones efectuadas. El tiempo de reparación debe incluir los tiempos de detección de fallas y de espera. Si se requiere la distribución del tiempo de reparación, se puede usar un modelo de distribución exponencial para el tiempo de reparación con un tiempo de reparación promedio  $T_r$  como la media de la distribución.

Así mismo, si no se disponen de datos de planta se puede recurrir a otras fuentes como las bases de datos genéricas ó la información de plantas similares.

Tabla 2.1 Datos a ser extraídos de los registros de planta

Datos de fallas de componentes	Número de fallas, modos de falla y tiempo total
Datos de reparación de componentes	Duración de la reparación de componentes incluyendo el tiempo de detección y el de espera.
Datos de prueba de componentes	Frecuencia y duración de las pruebas

## 2.5.- CONFIABILIDAD DE SISTEMAS

El estudio de la confiabilidad de sistemas es más difícil que el de la confiabilidad de componentes, en razón de la complejidad de la estructura de tales sistemas. En el caso de componentes, la confiabilidad sólo depende de la naturaleza de estos; en el caso de sistemas en cambio la confiabilidad depende tanto de la naturaleza de sus componentes, como de la estructura de la misma. Por lo tanto es virtualmente imposible evaluar la confiabilidad de un sistema, considerándolo como un todo indisoluble. Se impone entonces descomponer al sistema bajo estudio en subsistemas y éstos a su vez en componentes, utilizando para ello métodos lógico matemáticos. Estos métodos varían de acuerdo a la complejidad del sistema a modelarse, así como del tipo de análisis que se quiera realizar; entre estos tenemos al diagrama en bloques, el árbol de eventos, el árbol de fallas, etc.

### *Método del árbol de fallas*

Es un proceso deductivo por medio del cual un evento no deseado, llamado *evento tope*, es postulado y luego se identifican sistemáticamente todos los eventos que contribuyen a la ocurrencia del evento tope; de estos eventos a su vez se deducen nuevos eventos que contribuyen a la ocurrencia de los anteriores y así sucesivamente se produce una estructura tipo árbol con los eventos básicos en sus extremidades. Los eventos básicos son aquellos para los cuales se dispone de los datos de falla ó aquellos que no se pueden subdividir en eventos más elementales. El proceso de deducción es realizado de manera tal que el árbol de fallas contiene a todos los componentes cuyas fallas contribuyen a la ocurrencia del evento tope. Un árbol de fallas, no necesariamente comprende a todos los modos de falla posibles de un componente, sino sólo aquellos que contribuyen a la ocurrencia del evento tope.

Los eventos de falla postulados que aparecen en la estructura del árbol de fallas pueden no ser exhaustivos. Sólo aquellos eventos considerados importantes pueden ser incluidos. Sin embargo, se debería notar que la decisión acerca de los eventos de falla a incluir no es arbitraria; es influenciada por el procedimiento de construcción del árbol de fallas, la operación y el diseño de los sistemas, la historia de la operación, la disponibilidad de los datos de fallas y la experiencia del analista. En cada punto intermedio, los eventos postulados representan las causas *inmediata*, *necesaria* y *suficiente* para la ocurrencia de los eventos intermedios (tope).

Principales conceptos empleados.-

- Evento tope.- Es un evento ó estado indeseado para el cuál se desarrolla el árbol de fallas.
- Evento básico.- Define una falla primaria inherente al componente. Esta falla no requiere un desarrollo ulterior. Cada evento básico tiene asociados un modelo de confiabilidad y con sus respectivos parámetros:

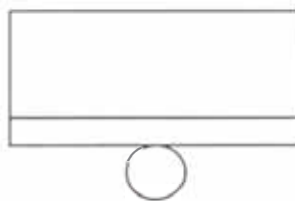


Fig. 2.5 Evento básico

- Compuertas lógicas.- Las diferentes relaciones lógicas entre los eventos en los árboles de falla son modeladas con operadores lógicos llamados compuertas. Estas compuertas pueden ser:  
*Compuerta OR:* Esta compuerta será verdadera si al menos uno de los eventos de entrada también lo es:

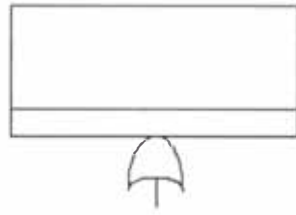


Fig.2.6 Compuerta lógica OR

*Compuerta AND:* Esta compuerta será verdadera, si todos los eventos de entrada también son verdaderos.

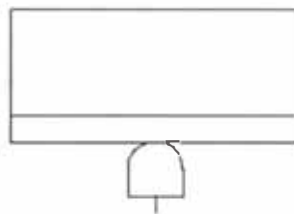


Fig.2.7 Compuerta lógica AND

*Compuerta K de N:* Esta compuerta será verdadera si al menos K de las N entradas son verdaderas.

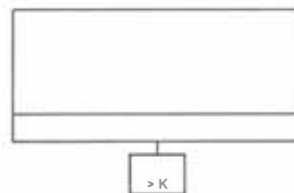


Fig. 2.8 Compuerta lógica K de N

- Parámetros.- Valores numéricos usados en los modelos de confiabilidad

Para clarificar el uso de esta simbología se desarrollan parcialmente los

eventos indeseados: “el motor M no se detiene” y “el motor M no arranca”; correspondientes al siguiente sistema eléctrico, conformado por una fuente, un motor y dos llaves S1 y S2:

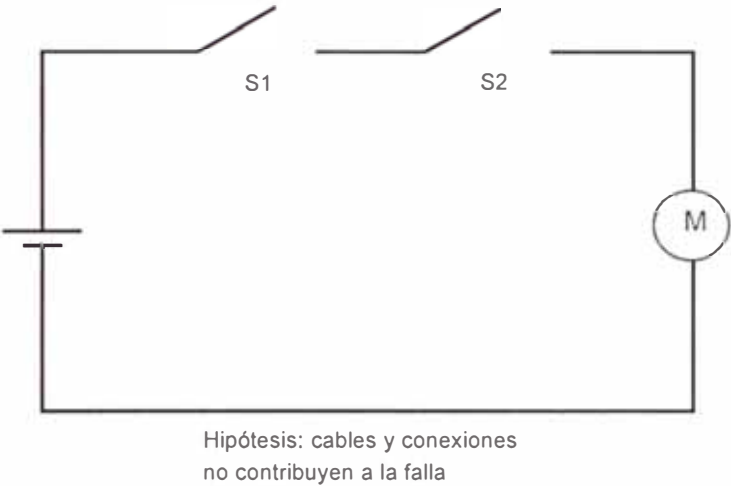


Fig. 2.9 Esquema eléctrico del ejemplo de aplicación

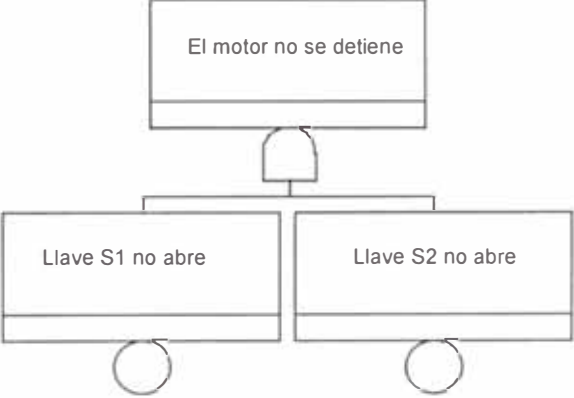


Fig. 2.10 Uso de la compuerta AND

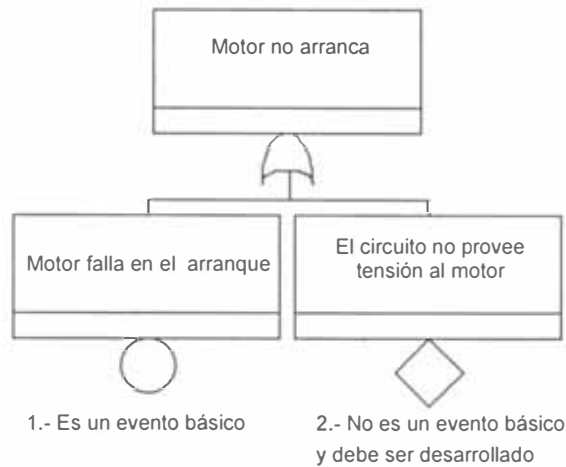


Fig.2.11 Uso de la compuerta OR

### Resolución de los árboles de falla

Involucra 2 aspectos distintos: una evaluación cualitativa o *lógica* y una evaluación cuantitativa o *probabilística*. La evaluación cualitativa tiene que ver con la determinación de los conjuntos mínimos de corte. La evaluación cuantitativa determina la probabilidad de ocurrencia promedio del evento tope y para ello utiliza los conjuntos mínimos de corte y los valores de los parámetros de los modelos de confiabilidad empleados. En el presente estudio se utilizaron los códigos Risk Spectrum FT Professional 1.10 y Psapack 4.3 para resolver de forma cualitativa y cuantitativa los árboles de falla de los sistema seleccionados. Dichos códigos determinan los conjuntos mínimos de corte, calculan la probabilidad de cada uno de ellos y realizan además una evaluación de la incidencia del valor de la probabilidad de falla de cada evento básico en el valor de la probabilidad de falla del sistema. El algoritmo de cálculo que utilizan los programas para determinar los conjuntos mínimos de corte, se denomina “downward” descrito por Fussell y

consiste en resolver el árbol desde el evento tope (evento superior), pasando por los estados intermedios, hasta llegar a los eventos inferiores.

## 2.6.- ANALISIS DE IMPORTANCIA

Generalmente el análisis de la importancia de componentes debería ser usado durante el diseño o evaluación de los sistemas para determinar que componentes son más críticos para la confiabilidad de todo el sistema. Aquellos componentes con mayor importancia podrían ser candidatos para mejoras futuras. Sin embargo, en un contexto operativo, los items con mayor importancia deberían ser observados por los operadores, desde que ellos son críticos para la operación continua del sistema.

### *Medición de la importancia*

Los factores principales que determinan la importancia de un componente en un sistema son su confiabilidad o indisponibilidad y la estructura o topología del sistema. A continuación se presentan algunas mediciones básicas de la importancia:

- a) Importancia de Birnbaum.- La importancia de Birnbaum de un componente  $i$  está definida como la razón de cambio de la confiabilidad o indisponibilidad del sistema  $R_s[R(t)]$  con respecto al cambio en la confiabilidad o indisponibilidad del componente  $i$   $R_i(t)$ :

$$I_i^B(t) = \frac{\partial R_s[R(t)]}{\partial R_i(t)}$$

Si para un dado componente  $i$ ,  $I_i^B(t)$  es grande, significa que un pequeño cambio en la confiabilidad del componente  $i$   $R_i(t)$ , se traduce en un gran

cambio en la confiabilidad del sistema  $R_s(t)$ . La importancia de Birnbaum depende completamente de la estructura del sistema (es decir si el sistema está dominado por una configuración en serie o paralelo) Por lo tanto es más usado para determinar el grado de redundancia del sistema.

- b) Factor de decremento del riesgo (RDF).- Se define como la relación existente entre la indisponibilidad inicial del evento tope y el nuevo valor de la indisponibilidad del evento tope, en el cual, la indisponibilidad del componente en cuestión, se hace igual a cero  $Q_i = 0$ , i.e. que el componente sea perfectamente confiable. Luego:

$$I_i^R = \frac{Q_{TOP}}{Q_{TOP}(Q_i = 0)}$$

Un alto valor de RDF indica que es más conveniente mejorar la confiabilidad del componente que instalar otro componente en paralelo, por que con ello se obtiene una mayor reducción en la indisponibilidad del evento tope.

- c) Factor de incremento del riesgo (RIF).- Se define como la relación existente entre el nuevo valor de la indisponibilidad del evento tope, en la cual la indisponibilidad del componente en cuestión se hace igual a uno  $Q = 1$ , y la indisponibilidad inicial del evento tope. Es decir:

$$I_i^I = \frac{Q_{TOP}(Q_i = 1)}{Q_{TOP}}$$

Un alto valor de RIF indica que es más conveniente instalar otro componente en paralelo, que aumentar la confiabilidad del componente



en cuestión, evitándose que la indisponibilidad del evento tope se incremente excesivamente en caso de falla del componente en cuestión. En este contexto se dice que un componente es el más importante cuando posee los mayores factores RDF y RIF. En la practica se considera que para aumentar la disponibilidad de un sistema, es más conveniente instalar otro componente en paralelo al componente más importante, sólo cuando  $RIF > RDF$  en por lo menos 2 ordenes de magnitud.

## **CAPITULO III**

### **APLICACION DE LA METODOLOGIA PARA AUMENTAR LA SEGURIDAD Y LA DISPONIBILIDAD DEL RP10**

#### **3.1.- OBJETIVOS Y ALCANCES**

- Elevar la disponibilidad y seguridad de la operación del RP10 para un funcionamiento continuo de 120h por semana
- Disminuir el costo total de mantenimiento

El alcance del presente estudio esta limitado a los sistemas tecnológicos y no se considerará los efectos en el medio ambiente, ni menos aún en los seres humanos; puesto que debido a las múltiples barreras de seguridad con que cuenta el RP10, éstas consecuencias se encuentran por debajo de los niveles permitidos por el reglamento. Así mismo, el análisis de seguridad está restringido al evento de inserción de reactividad no controlada, el cual consiste en el izaje fortuito de un elemento combustible durante la etapa de arranque y su posterior caída.

#### **3.2.- SELECCION DE LOS SISTEMAS**

Debido a la complejidad de los componentes que forman parte del RP-10, el análisis inicial fue conducido a nivel de sistemas, y de estos se seleccionó al sistema que ocasionó la mayor indisponibilidad de la operación del RP-10

durante el periodo 2001– 2002 de acuerdo a las consultas efectuadas al personal de los departamentos de operación y mantenimiento del RP-10 y a la información obtenida del cuaderno de operación, la cual se muestra resumida en la tabla 3.1:

Tabla 3.1 - Tiempos de parada forzada ocurridos en el RP10

Area		2001	2002	Total
Instrumentación	Tiempo parada	9.8h	9.4h	19.2h
	Ocurrencias	11	5	16
Mecánica	Tiempo parada	1.8h	6.1h	7.9h
	Ocurrencias	3	8	11
Eléctrica	Tiempo parada	2.3h		2.3h
	Ocurrencias	3		3
<b>Tiempo parada total</b>		13.9h	15.5h	29.4h

Como se puede apreciar las áreas de Instrumentación y de Mecánica fueron las principales responsables de la indisponibilidad de la operación del RP10 durante los años 2001 y 2002. A su vez de las 19.2h de parada forzada del área de Instrumentación, el sistema de Instrumentación nuclear para el corte es el que mayor participación tiene, como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 3.2.- Tiempos de parada forzada para el área de instrumentación

Instrumentación		2001	2002	Total
Instrumentación convencional	Tiempo parada		2.1h	2.1h
	Ocurrencias		2	2
Instrumentación nuclear para el corte	Tiempo parada	9.8h	7.3h	17.1h
	Ocurrencias	11	3	14
<b>Tiempo parada total</b>		9.8h	9.4h	19.2h

De manera similar en la tabla 3.3 se observa que, para el área de Mecánica, el sistema de ventilación del RP10 es el que explica en mayor porcentaje (45%) el tiempo de parada total.

Tabla 3.3.- Tiempos de parada forzada para el área de mecánica

<b>Mecánica</b>		<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>Total</b>
Refrigeración del circuito primario	<b>Tiempo parada</b>			
	<b>Ocurrencias</b>			
Refrigeración del circuito secundario	<b>Tiempo parada</b>			
	<b>Ocurrencias</b>			
Ventilación RP10	<b>Tiempo parada</b>		3.6h	3.6h
	<b>Ocurrencias</b>		4	4
Mecanismo de barras de c. y s.	<b>Tiempo parada</b>	0.8h	0.2h	1.0h
	<b>Ocurrencias</b>	2	1	3
Unidades enfriadoras	<b>Tiempo parada</b>		2.3h	2.3h
	<b>Ocurrencias</b>		3	3
Clapetas	<b>Tiempo parada</b>	1.0h		1.0h
	<b>Ocurrencias</b>	1		1
<b>Tiempo parada total</b>		1.8h	6.1h	7.9h

Analizando la información colectada se observa que el sistema de instrumentación nuclear para el corte, el cual representa solamente el 9% del total de sistemas explica casi el 60% del tiempo total de parada forzada en el periodo 2001 – 2002, según se aprecia en la tabla 3.4 y en la figura 3.1. Por lo tanto se selecciona a este sistema como la causa principal de la indisponibilidad del RP10 durante el mencionado período y a él se aplicará la metodología expuesta.

Tabla 3.4.- Tiempos de parada forzada en el RP10 entre 2001 y 2002

	Sistemas	Efecto		Causa
		T. parada (h)	% Acumulado	% Acumulada
1	Inst. nuclear para el corte	17.10	58.26	9
2	Ventilación RP10	3.58	70.47	18
3	Unid. enfriadoras	2.38	78.59	27
4	Inst. convencional	2.08	85.69	36
5	Tablero compresores	1.83	91.94	45
6	Clapetas	1.00	95.34	55
7	Mecanismo barras de c. y s.	0.95	98.58	64
8	Subestación 2	0.33	99.72	73
9	Sist. electrico ininterrumpible	0.08	100.00	82
10	Sist. refrigeración 1o.	0.00	100.00	91
11	Sist. refrigeración 2o.	0.00	100.00	100
	<b>Total</b>	29.35		

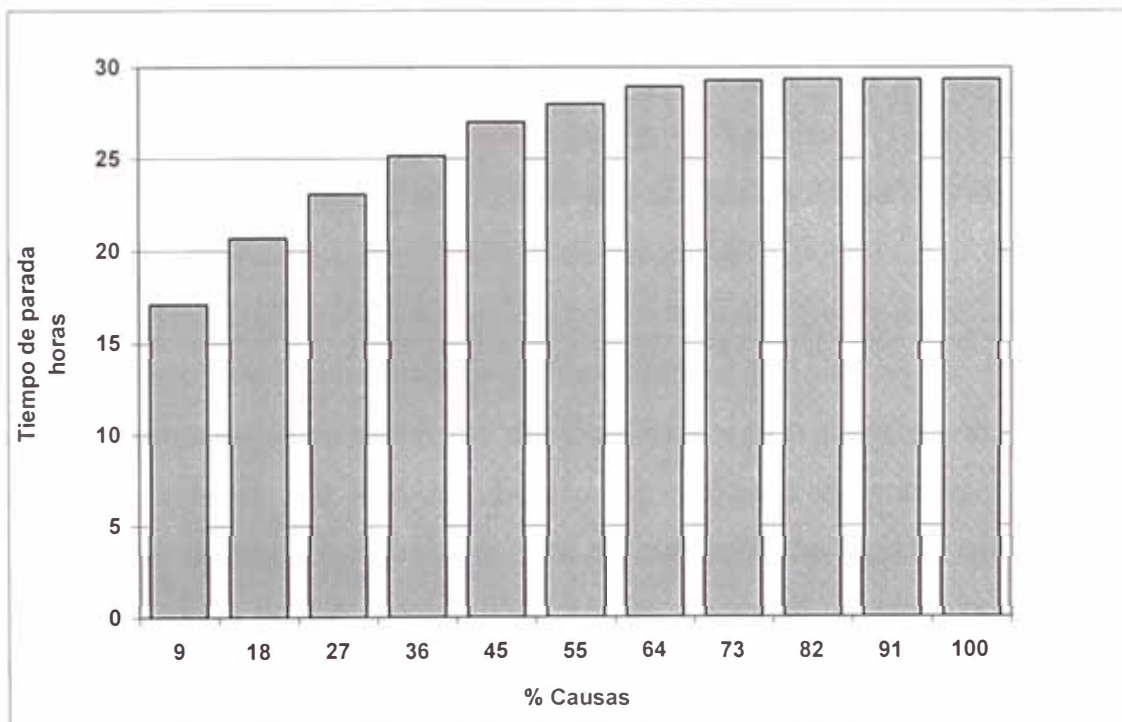


Fig. 3.1 Diagrama de Pareto de los tiempos de parada forzada entre 2001 y 2002 en RP10

### 3.3.- DESCRIPCION FUNCIONAL

El sistema de instrumentación nuclear para el corte, se encarga de vigilar el núcleo mediante la medición de distintos parámetros indicativos del estado del mismo y reporta situaciones anormales o de riesgo que pudieran ocurrir, en cuyo caso, ejecuta acciones de seguridad automáticas:

I.- alarma simple, advierte mediante una señal luminosa cuando ocurre una situación anormal.

II.- apagado, además de indicar el estado anormal de algunas variables inicia algunas acciones automáticamente, intentando corregir la anomalía. Cada acción de seguridad ejecutada progresivamente es más fuerte que la anterior:

- a.- reducción de potencia (para el comando automático)
- b.- Introducción automática de las barras de control
- c.- apagado o parada del reactor (SCRAM)

Entre los parámetros que se miden, están el flujo neutrónico y la tasa de evolución del flujo neutrónico, los cuales a su vez están definidos tanto para la condición de marcha como para la de arranque.

#### *Características de redundancia y disponibilidad*

A fin de aumentar la confiabilidad del sistema frente a las fallas con riesgo de sus componentes, se han redundado las cadenas de medición del flujo neutrónico y la de obtención de la tasa de evolución del reactor (periodo).

La primera vigila que el combustible nuclear no opere a mayor potencia que la nominal, la segunda vigila la velocidad porcentual del incremento del flujo neutrónico, a fin de limitarlo a valores que sean fácilmente controlables.

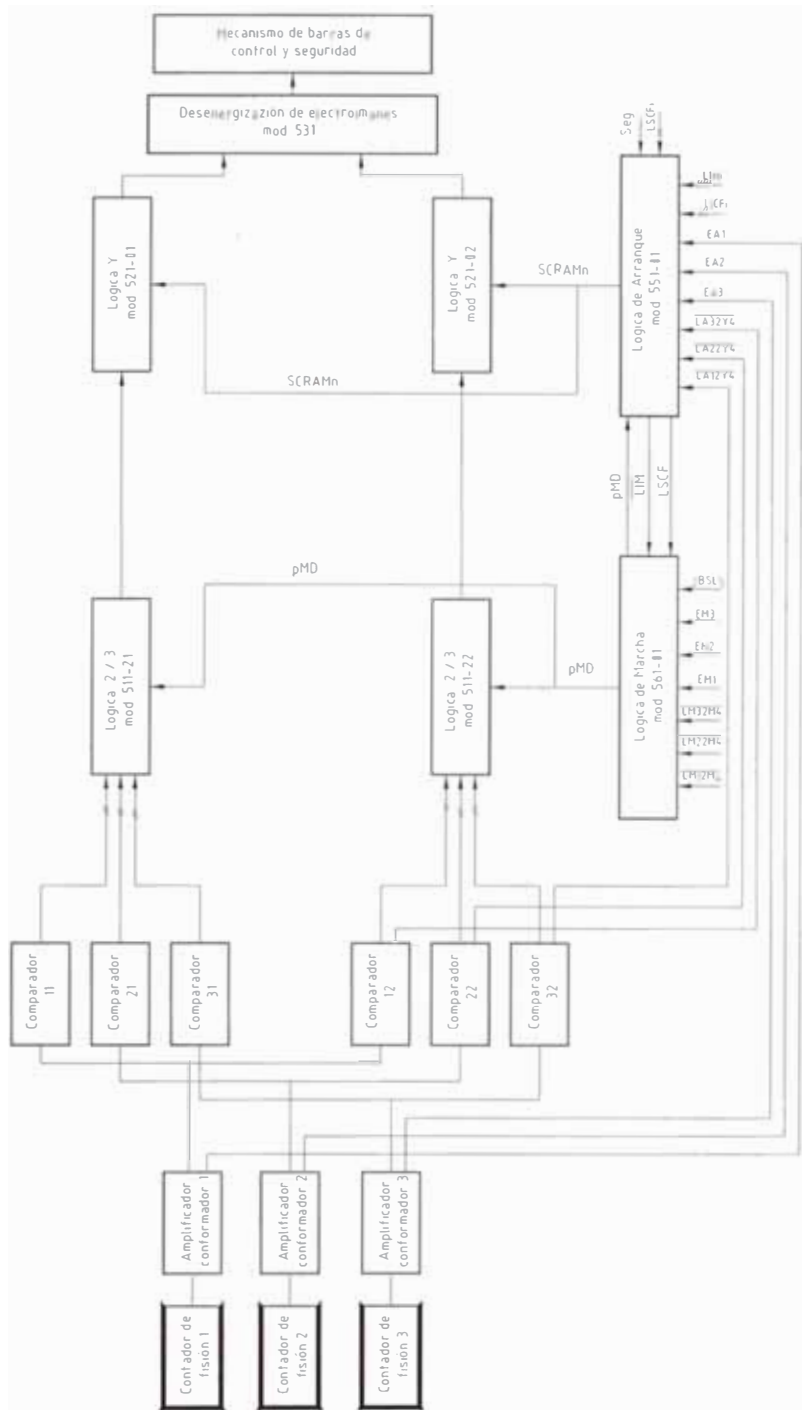
Como se puede observar en las figuras 3.4 y 3.5 esta redundancia se ha implementado a través de dos cadenas de scram en paralelo, de las cuales

basta que una de ellas se dispare para que se produzca la caída de las barras. Así mismo tiene dos módulos de lógica 2/3 en cada cadena lo cual incrementa la disponibilidad del sistema, al requerir que se disparen 2 de las 3 señales que ingresan al módulo, para que este presente una señal de disparo a la salida.

### *Características de protección*

El sistema de instrumentación neutrónico se diseñó de acuerdo con las siguientes características de protección:

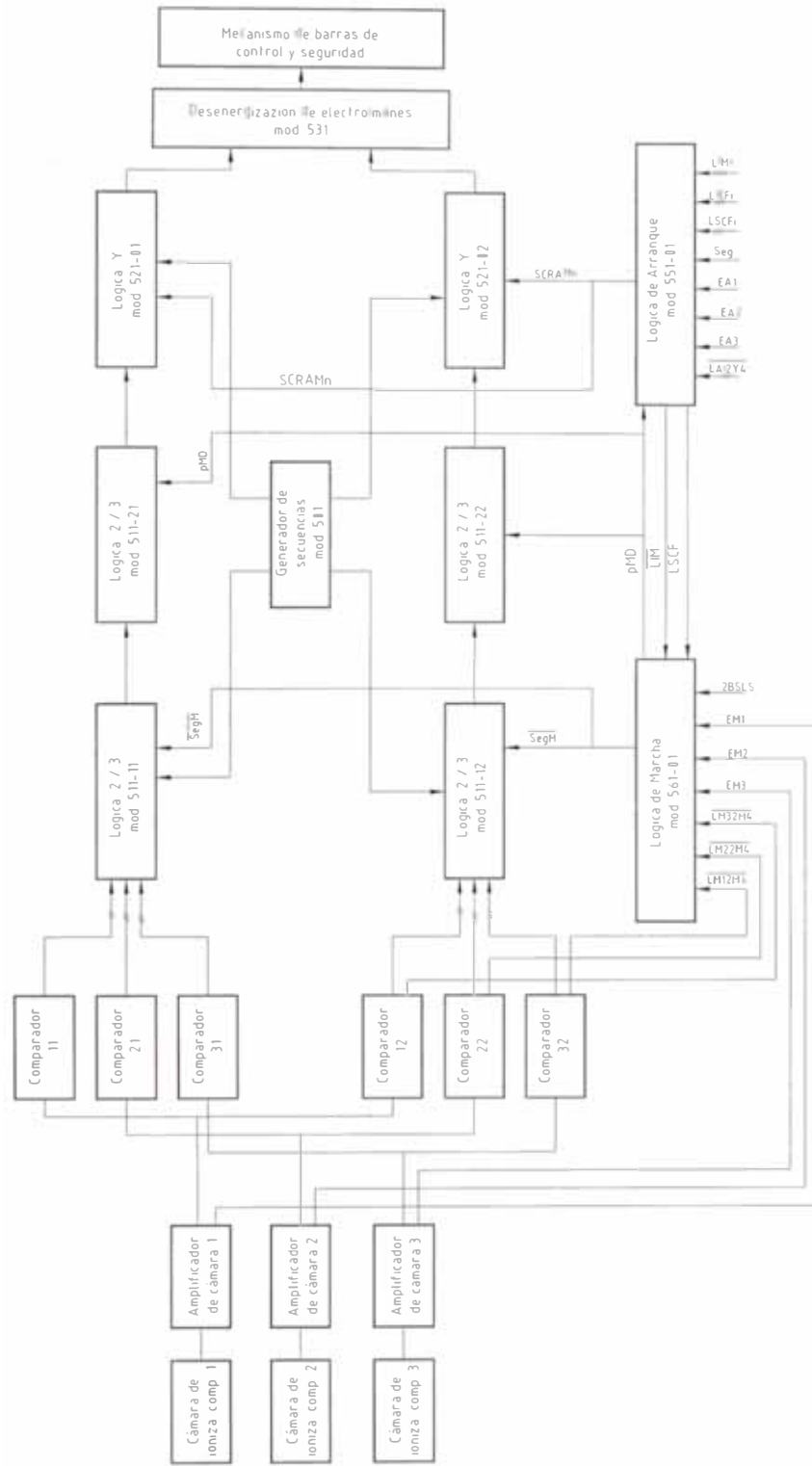
- a) Segregación: el cableado de las distintas cadenas redundantes de seguridad se ha hecho por caminos independientes, de manera de minimizar el riesgo de fallas por causas comunes. De la misma manera los componentes de cada cadena, han sido ubicados en armarios diferentes, constituidos por una serie de módulos montados sobre bastidores con sus fuentes de alimentación de los diversos conjuntos independientes.
- b) Falla segura o “falla a favor de la seguridad”: los sistemas han sido diseñados de tal manera que la salida del servicio de alguno de sus componentes por la rotura o desconexión de algún conector, se traduce en una información equivalente a la que existiría en caso de valores anormales del parámetro vigilado. Cumplen con esta característica las siguientes fallas: por desconexión o rotura del cable de los sensores neutrónicos a los respectivos amplificadores, falta de alta tensión en los detectores neutrónicos, valor de alta tensión de los detectores neutrónicos fuera del rango del 10%, falta de alimentación eléctrica a las cadenas de medición. En todos los casos los circuitos lógicos fueron construidos con circuitos integrados de la familia CMOS con tensión de alimentación +12 Vdc, por tener estos bajo consumo e inmunidad contra ruidos. Las lógicas son negativas, es decir los niveles normales son altos y los de alarma 0 Vdc.



pMD: Pedido de marcha despues  
 LIM: Limite inferior de mecanismo  
 LSCF: Limite superior de contadores de fisión  
 LICF: Limite inferior de contadores de fisión

Fig. 3.4 DIAGRAMA EN BLOQUES DEL SISTEMA DE CORTE PARA LA ETAPA DE ARRANQUE





pMD: Pedido de marcha después  
 LIM: Límite inferior de mecanismo  
 LSCF: Límite superior de contadores de fisión  
 LICF: Límite inferior de contadores de fisión

Fig. 3.5 DIAGRAMA EN BLOQUES DEL SISTEMA DE CORTE PARA LA ETAPA DE MARCHA

### *Diagrama funcional en bloques*

Debido a que en las etapas de arranque y de marcha se requieren distintos tipos de detectores y que las condiciones para el inicio del arranque ó de la marcha también son distintas, es necesario definir 2 diagramas de bloques para cada una de estas etapas. En ese sentido en las figuras 3.2 y 3.3 se muestran los diagramas en bloque de las principales funciones que realiza el sistema de corte para las etapas de arranque y de marcha respectivamente. Dentro de ellas se puede distinguir la *adquisición*, que se encarga de medir el campo neutrónico en corriente ó en pulsos de tensión y convertirlo en señales analógicas que son función lineal ó de la tasa lineal, logarítmica y derivada del logaritmo de las respectivas entradas; luego viene la función de *comparación*, que digitaliza las señales análogas provenientes del bloque de adquisición al compararlas contra niveles previamente fijados y producir señales lógicas a la salida, según si los valores medidos están dentro ó fuera de un rango preestablecido (señales de disparo). El *procesamiento* se encarga de producir una señal desenergización del banco de barras de control y seguridad, siempre y cuando por lo menos 2 de los 3 canales correspondientes a cada una de las señales de entrada provenientes del bloque de *comparación* se hayan disparado ó se produzca una señal de disparo proveniente del bloque de *enclavamiento*. La función de *retención* se encarga de sostener al banco de barras de control y seguridad mientras no exista una señal de desenergización proveniente del bloque de procesamiento.

Además se tiene un bloque de *enclavamiento* que condiciona el inicio de la etapa de arranque, el paso y la continuidad de la etapa de marcha al cumplimiento de ciertas condiciones iniciales y de seguridad.

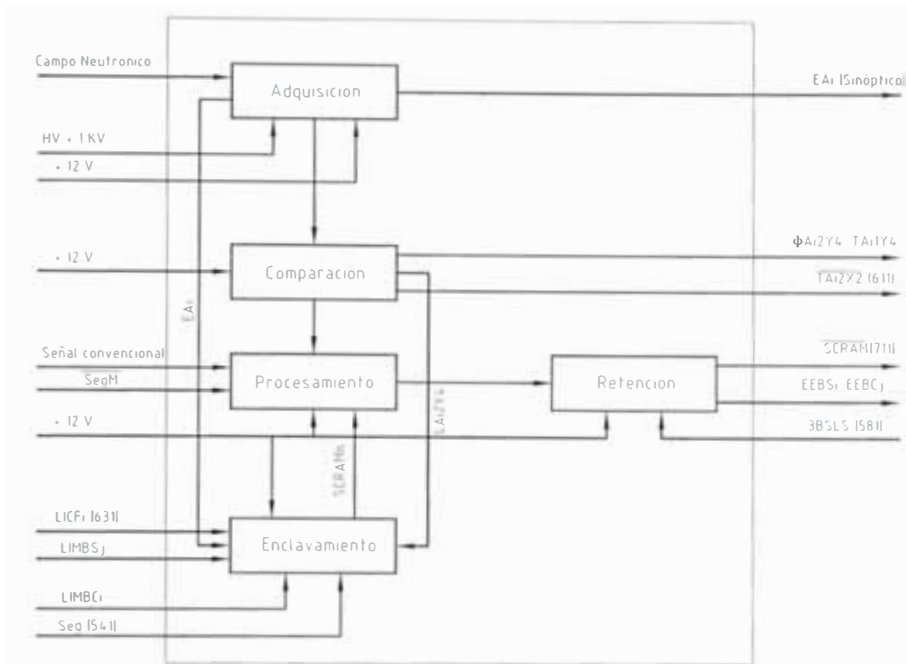


Fig. 3.2 Diagrama en bloques del sistema de corte para la etapa de arranque

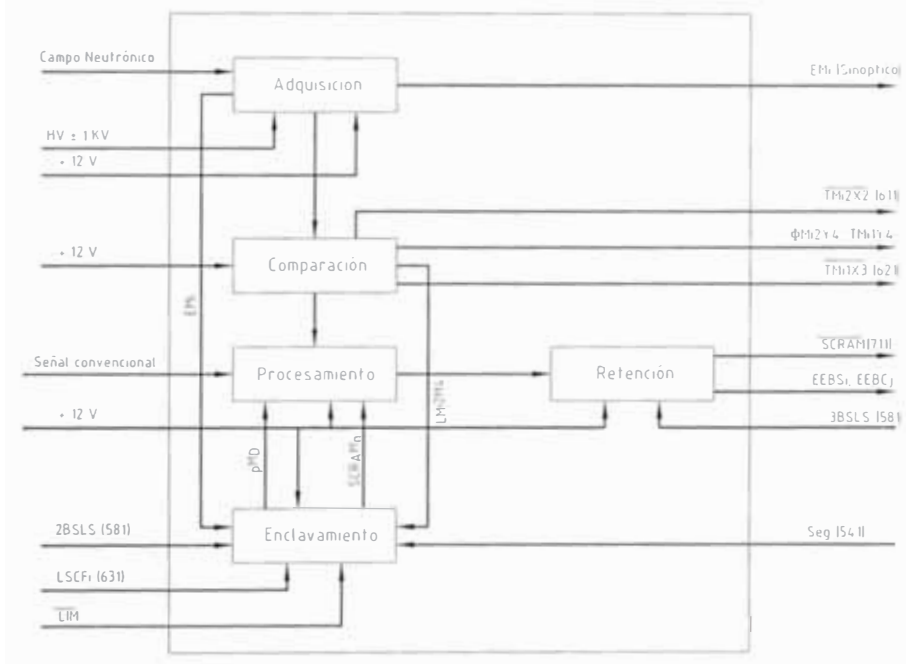


Fig. 3.3 Diagrama en bloques del sistema de corte para la etapa de marcha

### *Interfaces de entrada y salida*

De acuerdo a los correspondientes diagramas funcionales en bloque se determinan las interfaces de entrada y salida para las etapas de arranque y de marcha:

#### 1.- Etapa de arranque

##### Interfaces de entrada

- Campo de neutrones
- + 12 V (fuente de tensión continua)
- Alta tensión (+ 1KV)
- LICFi (límite inferior del contador de fisión "i")
- LIMBSj (límite inferior de mecanismo de barras de seguridad)
- LIMBCi (límite inferior de mecanismo de barras de control)
- Seg (señal de seguridad)
- 3BSLS (3 barras de seguridad en el límite superior)
- SegM (Seguridad de marcha)
- Señales convencionales (temperatura, caudal, nivel, presión, etc.)

##### Interfaces de salida (+ 12V)

- EAi (señal de indicación de encendido de canal de arranque "i")
- $\Phi$ Ai2Y4 (señal de scram por flujo lineal de arranque del canal "i", cadena 2 fuera de rango)
- TAI1Y4 (señal de scram por periodo de arranque del canal "i", cadena 1 fuera de rango)
- TAI2X2 (señal de reducción de potencia por periodo de arranque del canal "i", cadena 2 mayor al nivel máximo)
- EEBSi, EEBCj (señal de energización de barras de control y seguridad)

## Interfaces de entrada/salida internas

- Señales de tensión que son función lineal, logarítmica, y derivada del logaritmo de la tasa de eventos por unidad de tiempo, de Adquisición a Comparación
- Señales de lógicas de disparo de Comparación a Procesamiento
- Señal de SCRAMn de Enclavamiento a Procesamiento
- Tren de pulsos digitales a 1KHz ,de Procesamiento a Retención
- Señales de encendido de los canales de arranque 1,2 y 3, de Adquisición a Enclavamiento
- LAi2Y4, señal de scram por logaritmo de arranque de canal "i", cadena 2 fuera de rango, de Comparación a Enclavamiento

## 2.- Etapa de marcha

### Interfaces de entrada

- Campo neutrónico
- Alta tensión  $\pm 10$  KV
- + 12 V (fuente de tensión continua)
- 2BSLS, 3BSLS (2 y 3 barras de seguridad en el límite superior respectivamente)
- LSCFi (límite superior del contador de fisión "i")
- LIM (límite inferior del mecanismo de barras )
- Seg (señal de seguridad)
- Señales convencionales (temperatura, caudal, nivel, presión, etc.)

### Interfaces de salida

- EMi (señal de indicación de encendido de canal de marcha "i")
- TMI2X2 (señal de reducción de potencia por periodo de marcha del canal "i", cadena 2 mayor al nivel máximo)

- $\Phi$ Mi2Y4 (señal de scram por flujo de marcha del canal "i", cadena 2 fuera de rango)
- TMI1Y4 (señal de scram por periodo de marcha del canal "i", cadena 1 fuera de rango)
- TMI1X3 (señal de introducción automática por periodo de marcha de canal "i", cadena 1 mayor al nivel máximo)
- EEBSi, EEBCj (señal de energización de barras de control y seguridad)
- SCRAM (señal de scram para habilitar el piloto automático)

#### Interfaces de entrada/salida internas

- Señales de tensión que son función lineal, logarítmica, y derivada del logaritmo de la corriente de entrada, de Adquisición a Comparación
- Señales de lógicas de disparo de 0 a 12 V, de Comparación a Procesamiento
- Señal de SCRAMn de Enclavamiento a Procesamiento
- Señal de paso a marcha después pMD, de Enclavamiento a Procesamiento
- Tren de pulsos digitales a 1KHz ,de Procesamiento a Retención
- Señales de encendido de los canales de marcha 1,2 y 3, de Adquisición a Enclavamiento
- LMi2M4, señal de scram por logaritmo de marcha del canal "i", cadena 2 menor al nivel mínimo, de Comparación a Enclavamiento

#### *Composición del sistema de instrumentación nuclear para el corte*

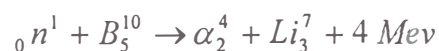
##### a.- Subsistema de adquisición para arranque

- 3 contadores de fisión
- 3 fuentes de alta tensión de + 1Kv (112)
- 3 pre amplificadores de arranque (641)

- 3 Impulsímetros (063)
- b.- Subsistema de adquisición para marcha
- 3 cámaras de ionización compensada
  - 6 fuentes de alta tensión de +1Kv y –1Kv (112 y 122 respectivamente)
  - 3 amplificadores de cámara (092)
- c.- Subsistema de comparación
- 6 comparadores (073)
- d.- Subsistema de procesamiento
- 2 módulos de lógica Y (521)
  - 4 módulos de lógica 2/3 (511)
  - 1 Generador de secuencias (501)
- e.- Subsistema de retención
- 1 módulo de desenergización de electroimanes (531)
- f.- Subsistema de enclavamiento para arranque
- 1 módulo de lógica de arranque (551)
- g.- Subsistema de enclavamiento para marcha
- 1 módulo de lógica de marcha (561)

### *Descripción de los componentes*

Cámara de ionización compensada.- Es un detector neutrónico gaseoso tipo cámara de ionización con compensación gamma para medir solamente la intensidad del campo neutrónico. Trabaja en modo corriente en el rango de potencia de los reactores experimentales, empleando como gas de llenado trifloruro de boro, para la detección de los neutrones térmicos a través de la siguiente reacción:



Contadores de fisión.- Es un detector gaseoso tipo contador proporcional

que se emplea para el contaje de neutrones térmicos a través de la siguiente reacción:



donde uno de los fragmentos de fisión ioniza al gas de llenado. La carga colectada en los electrodos produce un pulso eléctrico, el cual luego se conforma para el contaje de eventos.

Módulo de lógica Y (521).- La misión de este equipo es actuar ante el pedido de SCRAM y/o cuando se presenta una falla en las compuertas de la lógica de SCRAM. Recibe señales de las lógicas 2/3 y del generador de secuencias y comanda al módulo de desenergización de electroimanes.

Módulo de lógica 2/3 (511).- Este equipo forma parte de la lógica de SCRAM y consiste en una lógica 2/3, es decir que cuando dos de las tres entradas caen a bajo nivel, éste entrega una señal de alto nivel. La lógica que se utiliza es de tipo combinacional y está implementada con compuertas. Posee un total de 12 entradas agrupadas en 4 conjuntos de 3; cada uno de estos conjuntos forma la lógica 2/3.

Generador de secuencias (501).- Este módulo también forma parte de la lógica de SCRAM y es el encargado de generar un ciclo de autopruueba, con un período de prueba de 40 mseg, que permite verificar el funcionamiento de los módulos de lógica 2/3 y de lógica Y; e indicar si existe alguna compuerta de entrada a la lógica ó alguna intermedia incapaz de cumplir con su función específica por presentar falla no segura.

Comparador (073).- La función de este módulo es la de comparar las



señales analógicas provenientes del amplificador de cámara ó del impulsímetro, con niveles de referencia previamente fijados mediante potenciómetros para generar señales lógicas a la salida. Las entradas de nivel bajo se traducen en disparos mientras que las de funcionamiento normal son altas. De este modo la salida de servicio del amplificador ó la rotura o desconexión del cable conductor, equivaldrían a valores anormales del parámetro vigilado.

Pre amplificador de arranque (641).- Recibe los pulsos de tensión del contador de fisión y los conforma en pulsos de tensión gaussianos ó rectangulares que entrega al impulsímetro.

Amplificadores de cámara (092).- Reciben la corriente inyectada por las cámaras de ionización y suministran 3 señales de tensión que son:

Función líneal de la corriente de entrada

Función logarítmica de la corriente de entrada

Función derivada de la corriente de entrada

Se define un rango de operación normal, fuera del cuál las señales de tensión producidas son interpretadas como disparos por el comparador. De este modo cualquier variación en la ganancia producirá el correspondiente cambio en el ancho del mencionado rango.

Impulsímetro (063).- Recibe los pulsos rectangulares del módulo 641 y entrega señales analógicas correspondientes a la función lineal, logarítmica y derivada del logaritmo de la tasa de eventos por unidad de tiempo.

Módulo de desenergización de electroimanes (531).- Este módulo procesa las señales de salida de los detectores de SCRAM (521) en paralelo, y actúa

directamente sobre la alimentación eléctrica de los electroimanes que mantienen acopladas las barras de comando del reactor con sus respectivos mecanismos de movimiento, lo cuál accionara automáticamente la caída de dichas barras por acción de la gravedad, provocando la parada rápida del reactor.

Módulo de lógica de marcha (561).- Tiene la función de habilitar la etapa de marcha cuando además de tener encendidas por lo menos dos de los tres canales de marcha, los contadores de fisión y las 2 barras de seguridad están en el límite superior.

Módulo de lógica de arranque (551).- Tiene la función de habilitar la etapa de arranque cuando el estado lógico de la señal de seguridad (Seg.) es verdadero y los mecanismos de barras así como los contadores de fisión están en su posición inferior.

Fuentes de alta tensión (112 y 122).- Fuentes de alta tensión de + 1Kv y – 1Kv respectivamente, suministran la polarización necesaria para los detectores empleados en las etapas de arranque y marcha.

### *Funciones del sistema*

Considerando todas las interfaces de salida, mostradas en los diagramas en bloque para las etapas de arranque y marcha (figuras 3.2 y 3.3) se determinan las funciones que realiza este sistema:

3.3.1) Desenergizar el banco de barras de control y seguridad a través del cambio en las señales EEBSi y EEBCj

3.3.2) Proveer una señal de reducción de potencia por periodo superior al

nivel máximo durante la etapa de marcha ó arranque  $T_{Mi2X2}$  ó  $T_{Ai2X2}$  respectivamente

- 3.3.3) Proveer señales de indicación de periodo fuera de rango durante la etapa de marcha ó arranque  $T_{Mi1Y4}$  ó  $T_{Ai1Y4}$  respectivamente
- 3.3.4) Proveer señales de indicación de flujo neutrónico fuera de rango durante la etapa de marcha ó arranque  $\Phi_{Mi2Y4}$  ó  $\Phi_{Ai2Y4}$  respectivamente
- 3.3.5) Habilitar el piloto automático, a través de la señal SCRAM
- 3.3.6) Proveer señales de encendido de canales de marcha ó arranque  $E_{Mi}$  ó  $E_{Ai}$  respectivamente
- 3.3.7) Proveer una señal de introducción automática por periodo de marcha superior al nivel máximo  $T_{Mi1X3}$

#### 3.4.- ANALISIS DE FALLAS DE LAS FUNCIONES Y DE SUS EFECTOS

Una vez que se identificaron las funciones que realiza el sistema de instrumentación nuclear para el corte, se aplicó el análisis de modos de falla y efectos (FMEA) a cada una de las funciones, para analizar los modos de fallos y de acuerdo a la tabla 3.6 clasificarlos según los efectos que estos producen como se muestra en la tabla 3.5:

Tabla 3.5.- Análisis de modos fallas funcionales y de sus efectos

<b>Función</b>	<b>Modo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Efecto de la falla</b>	<b>Comentario</b>
3.3.1	3.3.1.0	Se des energiza el banco de barras con retardo > 3s	Critico	Puede fallar un EECC
	3.3.1.1	Se des energizo al menos 1 barra sin pedido de scram	Marginal	Se produce un apagado automático
3.3.2	3.3.2.0	No se provee señal de reducción de potencia por periodo > máximo	Marginal	Se tiene a las acciones II b y c*
	3.3.2.1	Se provee una señal de reducción de potencia aún cuando el periodo esta en el rango	Menor	Se induce a un apagado manual
3.3.3	3.3.3.0	No se provee señal de indicación por periodo fuera de rango	Menor	Se retarda acción de respuesta
3.3.4	3.3.4.0	No se provee señal de indicación por flujo neutrónico fuera de rango	Menor	" "
3.3.5	3.3.5.1	No se provee señal de habilitación del piloto automático	Marginal	Se interrumpe la operación
3.3.6	3.3.6.1	No se proveen señales de encendido de los canales de arranque o marcha	Menor	" "
3.3.7	3.3.7.0	No se provee señal de int. automática por periodo de marcha > máximo	Marginal	Se tiene a la acción automática II c*
	3.3.7.1	Se provee señal de int. automática aún cuando el periodo de marcha < máximo	Menor	Se interrumpe la operación

EECC: Elemento combustible del reactor

(\*) según punto 3.3

Tabla 3.6.- Clasificación de la severidad

Efecto	Rating	Criterios
Catastrófico	1	Un modo de falla que puede causar muerte o pérdida completa de la misión
Crítico	2	Un modo de falla que puede causar una lesión severa o una degradación importante del sistema, daño o reducción del desempeño de la misión
Marginal	3	Una falla que puede causar una lesión o degradación en el desempeño del sistema o de la misión, menores
Menor	4	Una falla que no causa una lesión o degradación del sistema pero puede resultar en una falla del sistema y en un mantenimiento no programado

De los modos de fallo que afectan a la seguridad, con código terminal 0, se seleccionó al que tiene mayor severidad, es decir al modo 3.3.1.0. Este modo de falla ocasiona la falla de al menos 1 elemento combustible EECC, si además ocurre una inserción de reactividad no controlada [11]

De manera similar para los modos de fallo que afectan a la disponibilidad de la operación por parada no programada, con código terminal 1, se seleccionó al modo 3.3.1.1 por tener mayor severidad e incidencia.

### 3.5.- SELECCIÓN DE LOS ITEMS CRITICOS

Para determinar los componentes críticos se aplicó el análisis de importancia a los modelos de árboles de falla correspondientes a los modos de falla seleccionados, desarrollados de acuerdo a información presentada, a los respectivos diagramas funcionales en bloques y a las figuras 3.4 y 3.5. Asimismo, para realizar un análisis integral, se incluyó al mecanismo de barras de control y seguridad; y al sistema conformado por este mecanismo y el sistema de instrumentación nuclear para el corte se le denominó sistema de corte. Además, se asume que se cumplen las siguientes hipótesis:

- El error humano es nulo. Por lo cuál el análisis de confiabilidad del sistema de instrumentación queda reducido al de sus módulos constituyentes. La falta de información acerca de las fallas humanas hace imposible considerar este tipo de fallas, sin que los resultados estén sujetos a una gran incerteza, por lo cual se prefiere no incluirlos en el modelo.
- Puesto que en el análisis sólo se consideran a los sistemas seleccionados, todas las interfaces de entrada a dichos sistemas, se asume que no presentan fallas.
- Los componentes trabajan en la etapa de su vida útil, es decir que la tasa de fallas permanece constante
- Se opera de 6000h anuales con paradas programadas de 48h cada semana
- Con el fin de poder aplicar los modelos de disponibilidad a los eventos

básicos asociados a las fallas en espera, se supone un funcionamiento continuo entre las pruebas periódicas, despreciando los efectos de la bajada y la subida de barras, y el tiempo total de parada semanal.

- Además no se considera la indisponibilidad por duración de las pruebas ó por reparación de las fallas encontradas en las mismas. Pues las pruebas se realizan durante los periodos de parada semanal.
- Además se asume que se cumplen todas las hipótesis del punto 2.2

De esta manera se desarrollaron los árboles de fallas INC@FI y INC@FS que se muestran las figuras 3.6 a 3.11 para  $j = 1$  y  $2$ ; correspondientes a los eventos no deseados "falla el sistema de corte al producir scram luego de 3s de recibido el pedido de corte durante el arranque" y "se produce scram cuando no ocurrió ningún pedido de corte, durante la marcha", los cuales a su vez están relacionados con los modos de fallas funcionales 3.3.1.0 y 3.3.1.1, respectivamente.

#### a) Recolección de datos y estimación de parámetros

De acuerdo a los datos de operación de los últimos 14 años y siguiendo el procedimiento indicado en el punto 2.4 y el anexo A.3, se estimó para cada tipo de componente la tasa de fallas y el intervalo de confianza al 95%, los cuales se presentan en las tablas 3.7 a y b:

Tiempo de arranque promedio ( $T_{arranque}$ ) = 0.8 h

Tiempo de operación anual promedio en los últimos 14 años ( $T_{anual}$ ) = 900 h

No. de operaciones por año = 150

Tabla 3.7a Tasas de fallas de componentes

Componente	Modos de falla	No. de fallas	Tiempo de operación (h)	$\lambda$ ( $h^{-1}$ )
Módulo de desenergización	Se desenergizan barras con un retardo > 3s	0	$900 \times 14 = 12600$	5,50E-05
	Se desenergiza al menos una barra sin disparo	2	12600	1,59E-04
Módulo de lógica Y	Se detecta el pedido de scram con un retardo > 3s	0	$900 \times 14 \times 2 = 25200$	2,75E-05
	Se produce un disparo espúreo	0	25200	2,75E-05
Módulo de lógica 2/3	Se detecta un pedido de scram con un retardo > 3s	0	25200	2,75E-05
	Se produce un disparo espúreo	0	$900 \times 14 \times 4 = 50400$	1,38E-05
Módulo de lógica de marcha	Se produce un disparo espúreo	1	12600	7,94E-05
Módulo de lógica de arranque	Se detecta un pedido de scram con un retardo > 3s	0	12600	5,50E-05
	Se produce un disparo espúreo	4	12600	3,17E-04



Tabla 3.7b Tasas de fallas de componentes

Componente	Modos de falla	No. de fallas	Tiempo de operación (h)	$\lambda$ (h <sup>-1</sup> )
Comparadores	Se produce la señal de disparo con un retardo > 3s	0	900 x 14 x 6 = 75600	9,16E-06
	Se produce señal de disparo dado que la señal de entrada esta en el rango de operación normal	5	75600	6,61E-05
Fuente de alta tensión ( + ó - )	Se produce corto circuito en la fuente de alta tensión	1	75600	1,32E-05
Amplificador de cámara	Al producir una señal fuera del rango de operación normal dado que no ocurrió ningún evento	0	900 x 14 x 3 = 37800	1,83E-05
Amplificador conformador	Se produce la amplificación y conformación de la señal de entrada con un retardo > 3s	0	0.8 x 3 x 50 x 14 x 3 = 5040	1,38E-04
Generador de secuencias	No se produce señal de Auto verificación a la salida	0	12600	5,50E-05
Cámara de ionización compensadas	Se produce una señal alta o baja independiente de la entrada	2	37800	5,29E-05
Contador de fisión	No registra cuentas	1	5040	1,98E-04
Mecanismo de barras de control y seguridad	Se produce la caída de las barras con un retardo > 3s dado que se desenergizaron	4	900 x 14 x 5 = 63000	6,35E-05
	Se produce la caída de al menos una barra sin disparo	107	63000	1,69E-03

Tabla 3.8 Intervalos de confianza al 95 %

Parámetro $\lambda$ $h^{-1}$	No. de fallas $r$	Tiempo total $h$	Límite inf. $h^{-1}$	Límite sup. $h^{-1}$
7,94E-05	1	12600	2,00 E-06	4,42 E-04
1,32E-05	1	75600	3,35 E-07	7,37 E-05
1,98E-04	1	5040	5,02 E-06	1,10 E-03
1,59E-04	2	12600	1,92 E-05	5,73 E-04
5,29 E-05	2	37800	6,40 E-06	1,91 E-04
3,17E-04	4	12600	8,65 E-05	8,12 E-04
6,35 E-05	4	63000	1,73 E-05	1,62 E-04
6,61E-05	5	75600	2,15 E-05	1,54 E-04
1,69E-03	107	63000	1,39 E-03	2,05 E-03

Para la estimación de los tiempos de reparación no se tuvo suficiente información, por lo cual se recurrió a la experiencia del personal de mantenimiento:

- Tiempo de reparación de módulos de lógica de scram, que equivale a su reemplazo por un módulo idéntico, es igual a 0.25h (ver anexo A2)
- Tiempo de reparación de las cámaras de ionización igual a 8h
- Tiempo de reparación del mecanismo de barras igual a 2h

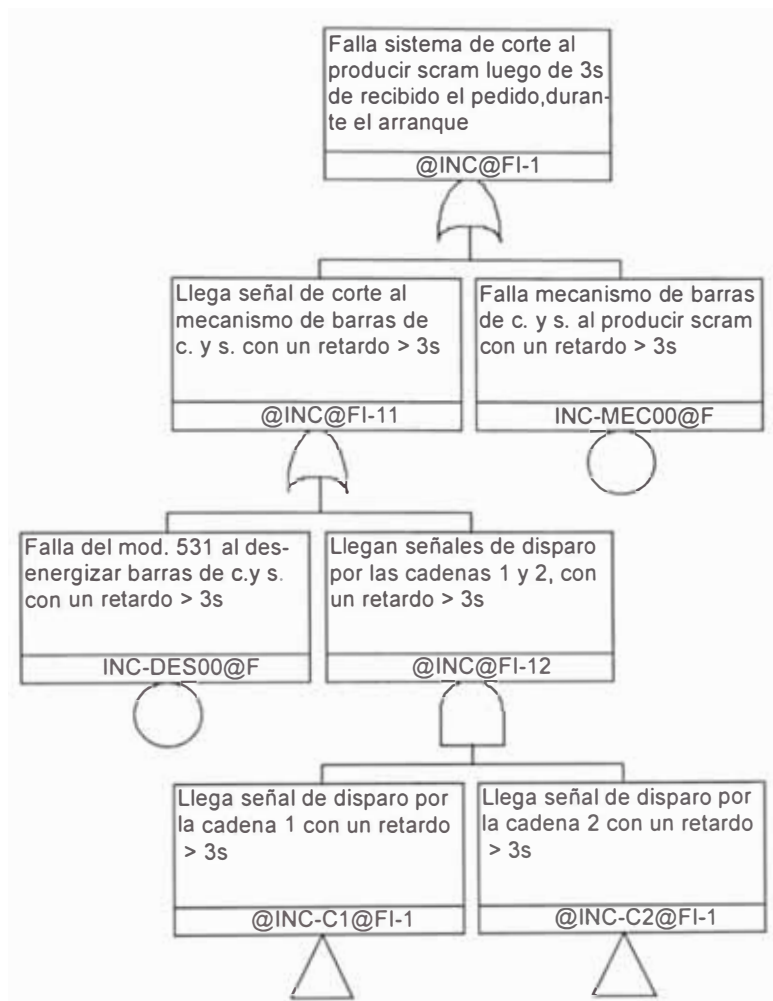


Figura 3.6 Modelo de árbol de fallas INC@FI para el modo 3.3.1.0

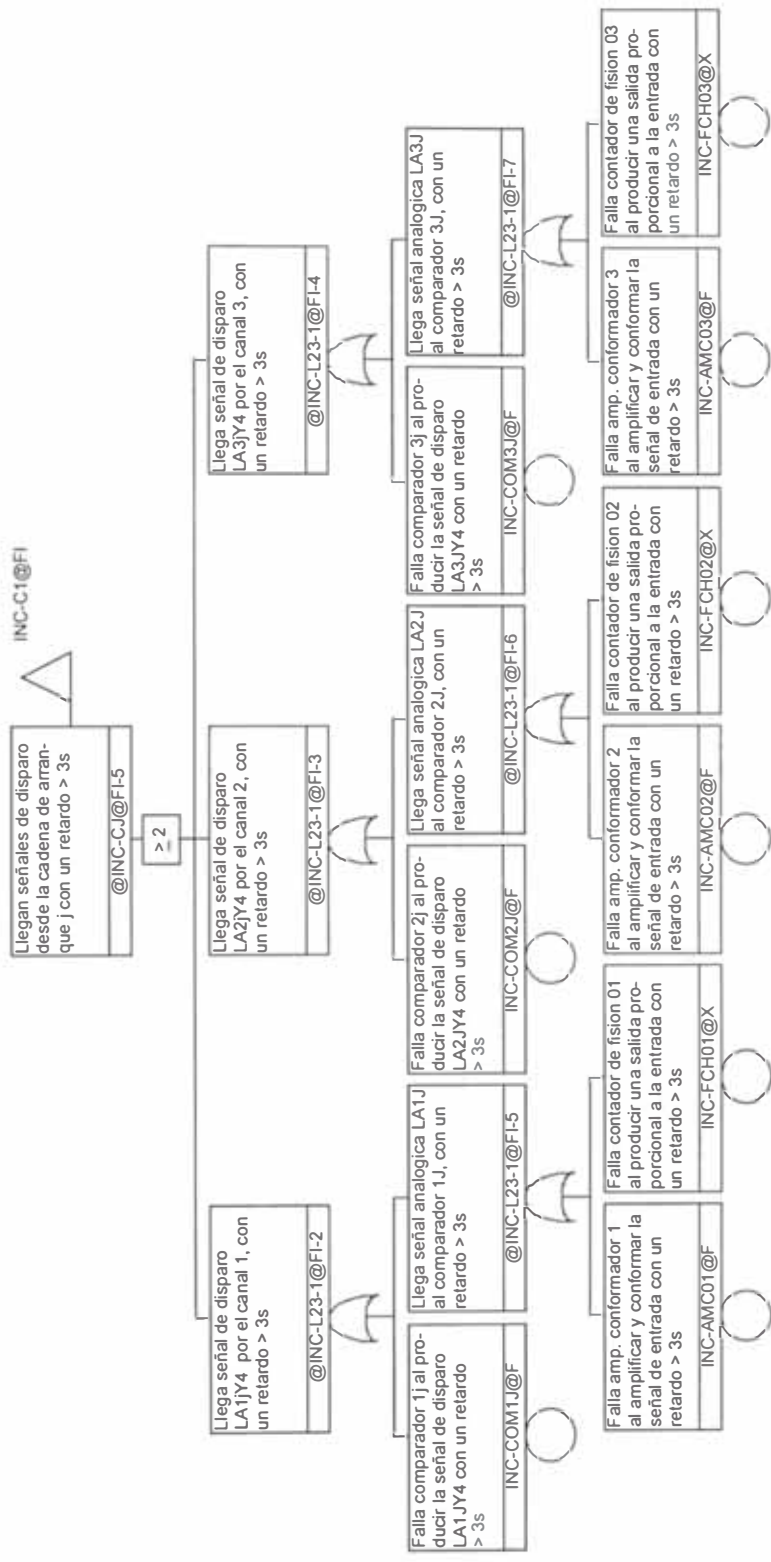


Fig. 3.7 árbol de fallas INC-L23J@FI

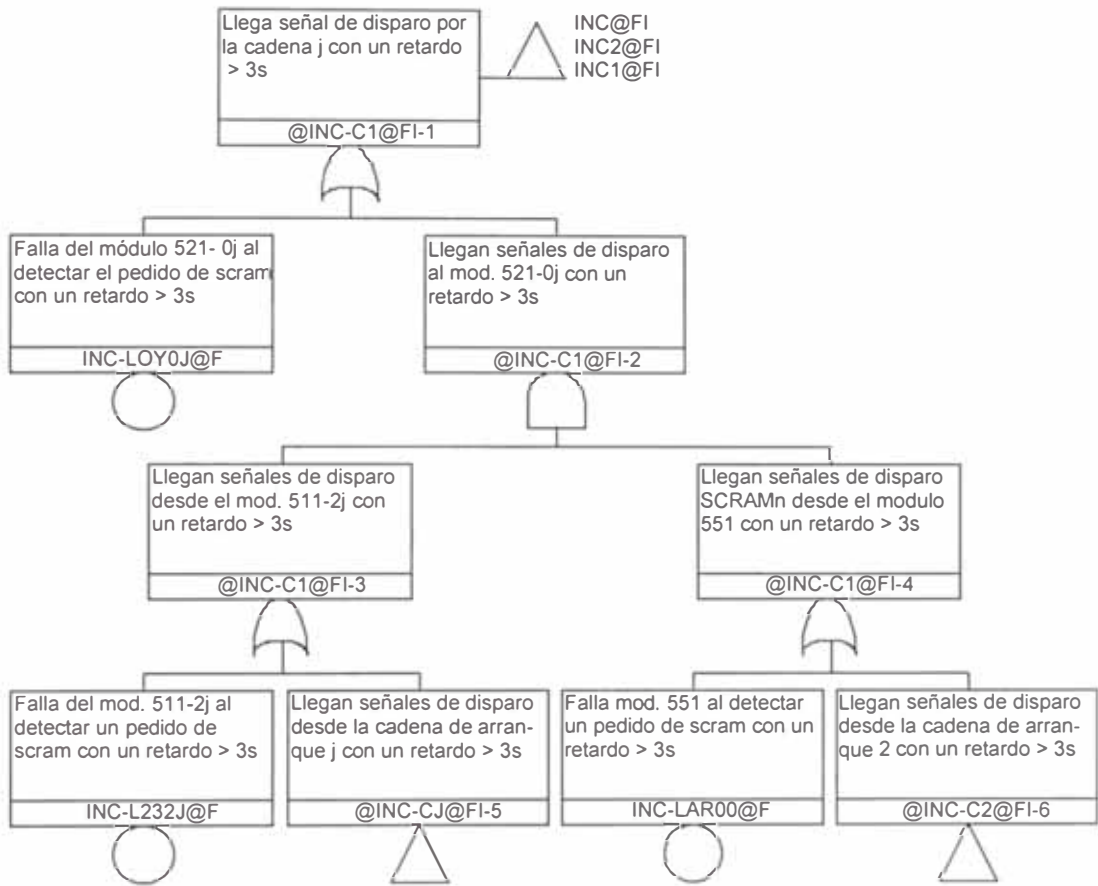


Fig. 3.8 árbol de fallas INC-CJ@FI

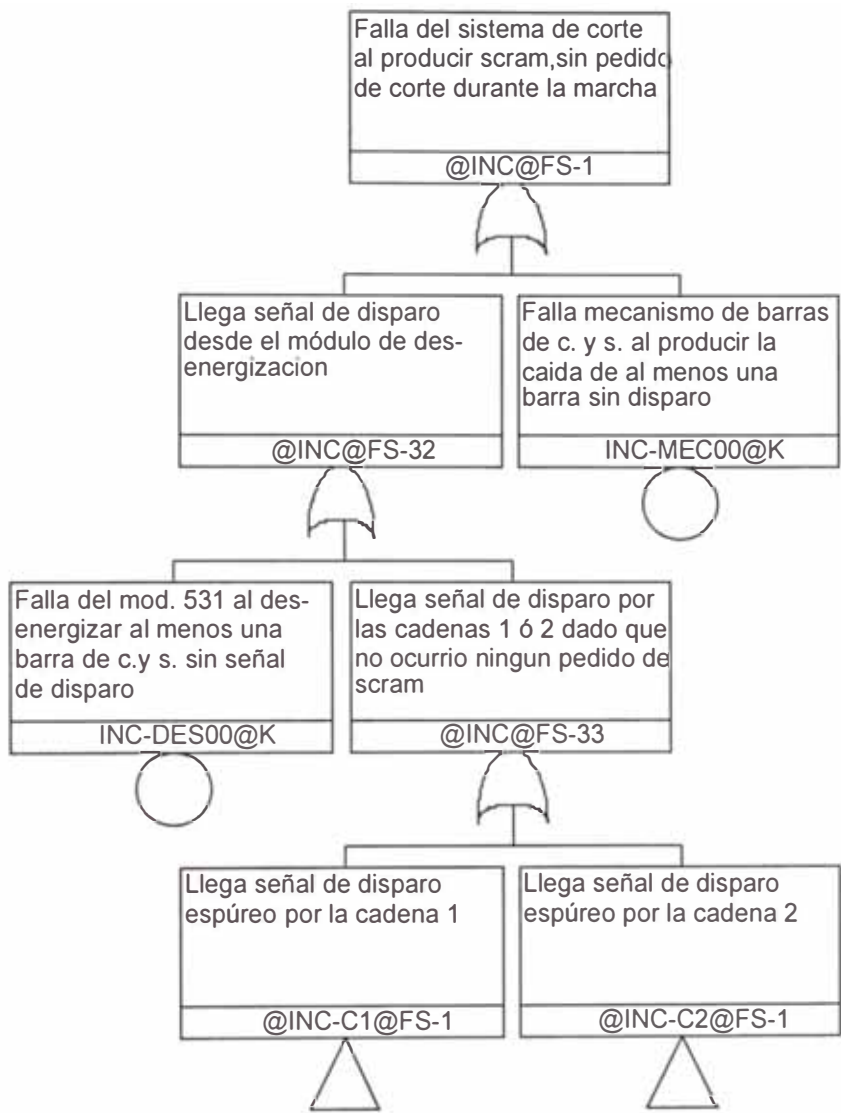


Fig. 3.9 Modelo de árbol de fallas INC@FS para el modo 3.3.1.1

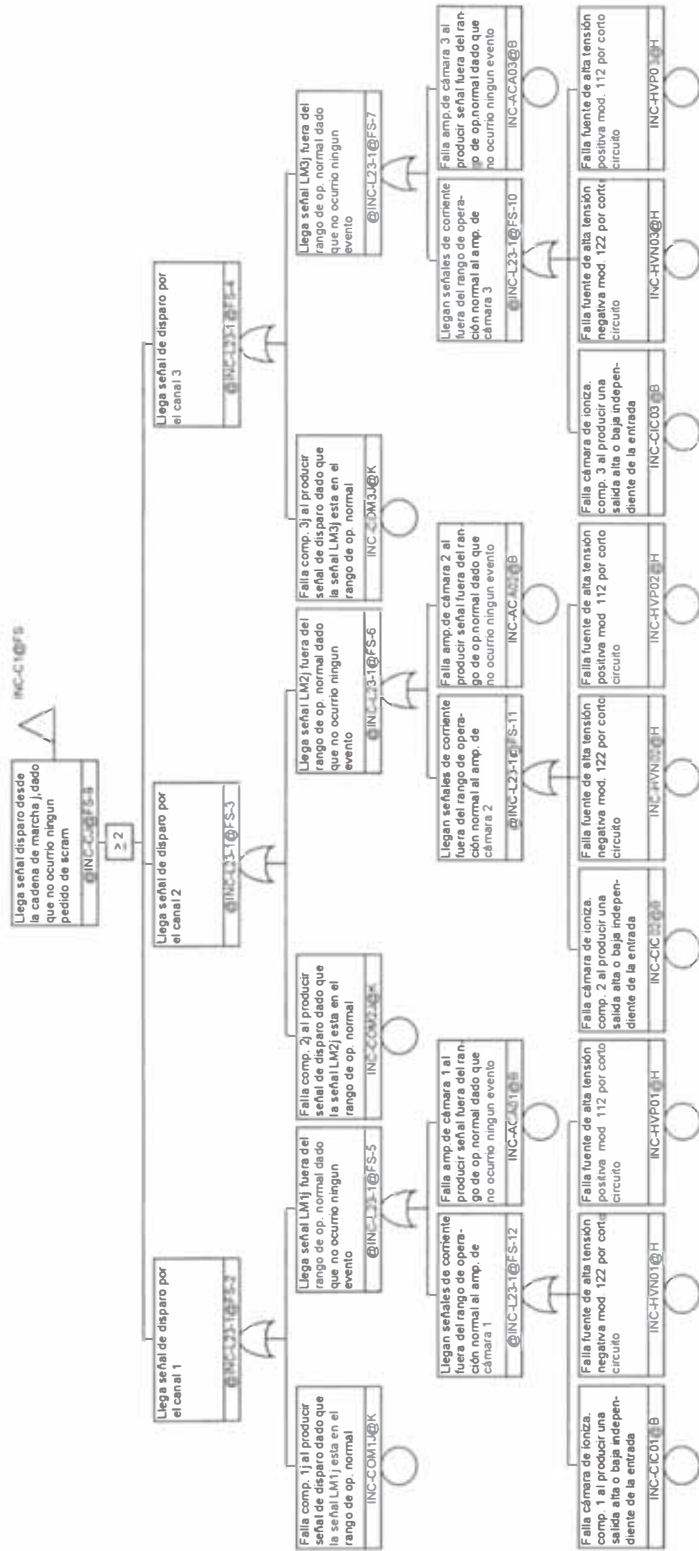


Fig. 3.10 árbol de fallas INC-L23-J@FS

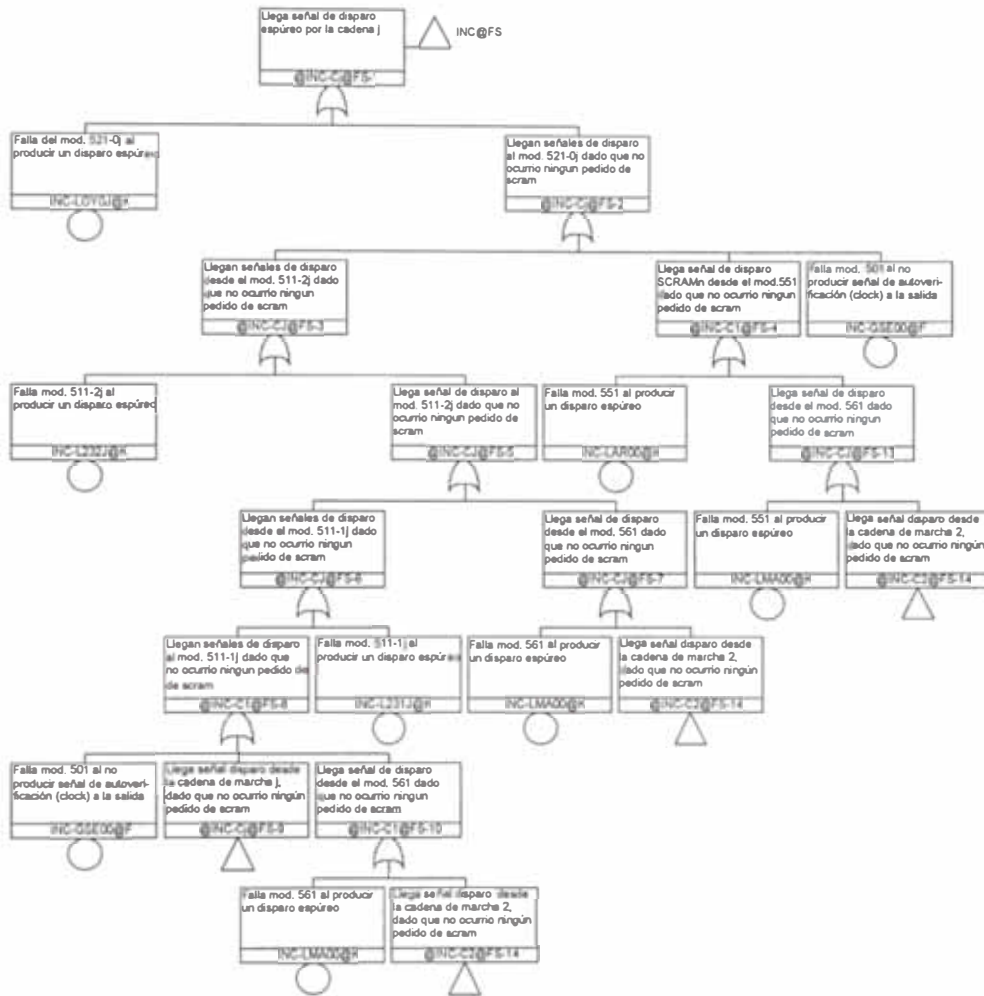


Fig. 3.11 árbol de fallas INC-CJ@FS



## b) Cuantificación de los eventos básicos

Se consideran dos grupos las fallas inseguras y las seguras. Las primeras se emplean para el análisis del evento que más afecta la seguridad INC@FI y las otras para el análisis del evento que más afecta la disponibilidad INC@FS.

*Falla inseguras.*- Estas fallas se evalúan durante la etapa de arranque del reactor que es la más crítica en caso ocurriera un evento de inserción de reactividad no controlada que podría producir la falla de por lo menos un elemento combustible del núcleo si el sistema de corte automático actúa con un retardo mayor a 3s. Con excepción del módulo de generación de secuencias y de las fuentes de alta tensión que alimentan a las cámaras de ionización, todos los demás componentes poseen modos de falla inseguros, al fallar mientras esperan a ser demandados, permaneciendo estas fallas ocultas hasta que el sistema sea demandado, por lo cual es necesario realizar pruebas periódicas de funcionamiento para detectar este tipo de fallas.

Para evaluar la indisponibilidad total de los componentes sometidos a pruebas periódicas se aplica el modelo de indisponibilidad por falla en espera  $Q_{EP}$  (2.20), considerando un tiempo entre pruebas igual a 480h y que se opera 120h continuas, con 2 días de parada por semana, por lo cual las indisponibilidades por fuera de servicio por reparación y por prueba son nulas, puesto que estas tareas se realizan durante la parada programada. Por otro lado la indisponibilidad promedio por falla en operación se cuantifica a través del modelo  $Q_{OP}$  (2.19).

**Evento básico INC-FCH0Y@X.**- "Falla contador de fisión Y al no registrar

cuentas"; este evento produce lo que se denomina una falla insegura. Luego la indisponibilidad promedio es

$$Q_{OP} = T_r \times \lambda = (8h) \times (1.98 \times 10^{-4} h^{-1}) = 1.581 E-03$$

Donde:

$T_r$  = tiempo de reparación = 8h

$\lambda$  = tasa de falla del componente en operación =  $1.98 \times 10^{-4} h^{-1}$

$Q_{OP}$  = 1.581 E-03

**Evento básico INC-AMC0Y@F.-** Este bloque representa la "Falla del amplificador conformador Y al amplificar y conformar la señal de entrada con un retardo > 3s". Luego la indisponibilidad promedio es

$$Q_{OP} = T_r \times \lambda = (0.25h) \times (1.38 \times 10^{-4} h^{-1}) = 3.45 E-05$$

Donde:

$T_r$  = tiempo de reparación = 0.25h

$\lambda$  = tasa de falla del componente en operación =  $1.38 \times 10^{-4} h^{-1}$

$Q_{OP}$  = 3.45 E-05

**Evento básico INC-COMXZ@F.-** Este bloque representa una falla insegura, según el modo "Falla comparador YZ al producir la señal de disparo LAXZY4 con un retardo > 3s" y comprende a los comparadores 073 de alta y baja señal de detección.

$$Q_{EP} = 1 - \frac{1 - e^{-9.17 \times 10^{-6} h^{-1} \times 480h}}{9.17 \times 10^{-6} h^{-1} \times 480h} = 2.198 E - 03$$

Donde:

$T_{EP}$  = tiempo entre pruebas = 480h

$\lambda$  = tasa de falla en espera =  $9.17 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$

$Q_{EP}$  = 2.198 E-03

**Evento básico INC – L23YZ@F** .- Este bloque representa al modo “Falla del módulo de lógica 2/3 YZ al detectar un pedido de scram con un retardo > 3s”. Este módulo entrega una señal de alto nivel, cuando dos de las tres entradas caen a bajo nivel. La lógica que se utiliza es tipo combinacional y está implementada por compuertas.

$$Q_{EP} = 1 - \frac{1 - e^{-2.75 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1} \cdot 480 \text{ h}}}{2.75 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1} \cdot 480 \text{ h}} = 6.571 \text{ E} - 03$$

Donde:

$T_{EP}$  = tiempo entre pruebas = 480h

$\lambda$  = tasa de falla en espera =  $2.75 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$

$Q_{EP}$  = 6.571 E-03

**Evento básico INC – LAR00@F** .- Representa una falla insegura y su modo es “Falla del módulo de lógica de arranque al detectar un pedido de scram con un retardo > 3s”.

$$Q_{EP} = 1 - \frac{1 - e^{-5.5 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1} \cdot 480 \text{ h}}}{5.5 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1} \cdot 480 \text{ h}} = 1.308 \text{ E} - 02$$

Donde:

$T_{EP}$  = tiempo entre pruebas = 480h

$$\lambda = \text{tasa de falla en espera} = 5.5 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$$

$$Q_{EP} = 1.308 \text{ E-02}$$

**Evento básico INC – LOY0Z@F** .- Este bloque contiene una lógica del tipo Y (AND) junto con un detector de SCRAM secuencial sincrónico. El mismo recibe señales de las lógicas (2/3) y comanda al bloque de desenergización de electroimanes. Representa el modo “Falla del módulo lógica Y al detectar un pedido de scram con un retardo > 3s”.

$$Q_{EP} = 1 - \frac{1 - e^{-2.75 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1} \cdot 480 \text{ h}}}{2.75 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1} \cdot 480 \text{ h}} = 6.57 \text{ E} - 03$$

Donde:

$$T_{EP} = \text{tiempo entre pruebas} = 480 \text{ h}$$

$$\lambda = \text{tasa de falla en espera} = 2.75 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$$

$$Q_{EP} = 6.57 \text{ E-03}$$

**Evento básico INC – DES00@F**.- El módulo 531 procesa las señales de salida de los detectores de SCRAM en paralelo y actúa directamente sobre la alimentación eléctrica de los electroimanes que sostienen por energía magnética a las barras de control y seguridad. Este bloque representa al modo “Falla del módulo 531 al desenergizar las barras de control y seguridad con un retardo > 3s”.

$$Q_{EP} = 1 - \frac{1 - e^{-5.5 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1} \cdot 480 \text{ h}}}{5.5 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1} \cdot 480 \text{ h}} = 1.308 \text{ E} - 02$$

Donde:

$T_{EP} =$  tiempo entre pruebas = 480h

$\lambda =$  tasa de falla en espera =  $5.5 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$

$Q_{EP} = 1.308 \text{ E-02}$

**Evento básico INC – MEC00@F.-** Este bloque representa al modo “Falla mecanismo de barras de control y seguridad al producir scram con un retardo > 3s”. La indisponibilidad promedio en espera es:

$$Q_{EP} = 1 - \frac{1 - e^{-6.35 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1} \times 480 \text{ h}}}{6.35 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1} \times 480 \text{ h}} = 1.509 \text{ E} - 02$$

Donde:

$T_{EP} =$  tiempo entre pruebas = 480h

$\lambda =$  tasa de falla en espera =  $6.35 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$

$Q_{EP} = 1.509 \text{ E-02}$

*Fallas seguras.-* Este tipo de falla se evalúa en la etapa de marcha del reactor por ser ésta la etapa en la cual una parada no programada tiene un mayor costo asociado. Así mismo, se considera que los componentes del sistema son reparables y que se encuentran en operación, adoptándose el modelo de confiabilidad del tipo falla en operación (2.19). Por otro lado la exposición de las fallas seguras de los elementos de este sistema se realiza a través de los indicadores de falla que se encuentran en los paneles de comando de la sala de control del RP - 10.

**Evento básico INC-CIC0Y@B.-** "Falla cámara de ionización compensada Y al producir una señal de salida alta o baja independiente de la entrada", este evento produce lo que se denomina una falla segura. Luego la indisponibilidad promedio en operación es:

$$Q_{OP} = \lambda \times T_r = (5.29 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}) \times (8\text{h}) = 4.23 \text{ E-04}$$

Donde:

$T_r$  = tiempo de reparación = 8h

$\lambda$  = tasa de falla del componente en operación =  $5.29 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$

$Q_{OP}$  = 4.23 E-04

**Evento básico INC-ACA0Y@B.-** Representa el modo " Falla amplificador de cámara Y al producir una señal fuera del rango de operación normal dado que no ocurrió ningún evento ". La indisponibilidad promedio en operación es:

$$Q_{OP} = \lambda \times T_r = (1.83 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}) \times (0.25\text{h}) = 4.575 \text{ E-06}$$

Donde:

$T_r$  = tiempo de reparación = 0.25h

$\lambda$  = tasa de falla del componente en operación =  $1.83 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$

$Q_{OP}$  = 4.575 E-06

**Evento básico INC-HVP0Y@H.-** Representa el modo " Falla fuente de alta tensión positiva Y por corto circuito". Debido a la naturaleza del diseño este modo produce una falla segura.

$$Q_{OP} = \lambda \times T_r = (1.32 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}) \times (0.25\text{h}) = 3.3 \text{ E-06}$$

Donde:

$T_r$  = tiempo de reparación = 0.25h

$\lambda$  = tasa de falla del componente en operación =  $1.32 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$

$Q_{OP}$  = 3.3 E-06

**Evento básico INC-HVN0Z@H.-** Representa el modo " Falla fuente de alta tensión negativa Z por corto circuito". Debido a la naturaleza del diseño este modo produce una falla segura.

$$Q_{OP} = \lambda \times T_r = (1.32 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}) \times (0.25\text{h}) = 3.3 \text{ E-06}$$

Donde:

$T_r$  = tiempo de reparación = 0.25h

$\lambda$  = tasa de falla del componente en operación =  $1.32 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$

$Q_{OP}$  = 3.3 E-06

**Evento básico INC-CMAYZ@K.-** Representa el modo "Falla comparador YZ al producir señal de disparo dado que la señal LMYZ esta en el rango de operación normal". La indisponibilidad promedio en operación es:

$$Q_{OP} = \lambda \times T_r = (6.61 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}) \times (0.25\text{h}) = 1.652 \text{ E-05}$$

Donde:

$T_r$  = tiempo de reparación = 0.25h

$\lambda$  = tasa de falla del componente en operación =  $6.61 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$

$Q_{OP}$  = 1.652 E-05

**Evento básico INC-LMA00@K.-** Representa una falla segura y su modo es "Falla módulo de lógica de marcha al producir un disparo espúreo". La indisponibilidad promedio en operación es:

$$Q_{OP} = \lambda \times T_r = (7.94 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}) \times (0.25\text{h}) = 1.985 \text{ E-05}$$

Donde:

$T_r$  = tiempo de reparación = 0.25h

$\lambda$  = tasa de falla del componente en operación =  $7.94 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$

$$Q_{OP} = 1.985 \text{ E-05}$$

**Evento básico INC-GSE00@F.-** Este bloque representa el modo "Falla del módulo generador de secuencias, al no producir la señal de autopruueba a la salida" lo cual es interpretado por los módulos 511 (lógica 2/3) y 521 (lógica Y) como una señal de disparo, por lo que se le clasifica como una falla segura. La indisponibilidad promedio en operación es:

$$Q_{OP} = \lambda \times T_r = (5.5 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}) \times (0.25\text{h}) = 1.375 \text{ E-05}$$

Donde:

$$T_r = \text{tiempo de reparación} = 0.25\text{h}$$

$$\lambda = \text{tasa de falla del componente en operación} = 5.5 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$$

$$Q_{OP} = 1.375 \text{ E-05}$$

**Evento básico INC-L23YZ@K.-** Representa el modo "Falla módulo de lógica 2/3 YZ al producir un disparo espúreo". La indisponibilidad promedio en operación es:

$$Q_{OP} = \lambda \times T_r = (1.38 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}) \times (0.25\text{h}) = 3.45 \text{ E-06}$$

Donde:

$$T_r = \text{tiempo de reparación} = 0.25\text{h}$$

$$\lambda = \text{tasa de falla del componente en operación} = 1.38 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$$

$$Q_{OP} = 3.45 \text{ E-06}$$

**Evento básico INC-LAR00@K.-** Representa el modo "Falla módulo de lógica de arranque al producir un disparo espúreo". La indisponibilidad promedio en operación es:



$$Q_{OP} = \lambda \times T_r = (3.17 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}) \times (0.25\text{h}) = 7.924 \text{ E-05}$$

Donde:

$T_r$  = tiempo de reparación = 0.25h

$\lambda$  = tasa de falla del componente en operación =  $3.17 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$

$Q_{OP}$  = 7.924 E-05

**Evento básico INC-LOY0Z@K.-** Representa el modo "Falla del módulo de lógica Y 0Z al producir un disparo espúreo". La indisponibilidad promedio en operación es:

$$Q_{OP} = \lambda \times T_r = (2.75 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}) \times (0.25\text{h}) = 6.875 \text{ E-06}$$

Donde:

$T_r$  = tiempo de reparación = 0.25h

$\lambda$  = tasa de falla del componente en operación =  $2.75 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$

$Q_{OP}$  = 6.875 E-06

**Evento básico INC-DES00@K.-** Representa el modo "Falla del módulo 531 al desenergizar al menos una barra de control y seguridad sin señal de disparo". La indisponibilidad promedio en operación es:

$$Q_{OP} = \lambda \times T_r = (1.59 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}) \times (0.25\text{h}) = 3.975 \text{ E-05}$$

Donde:

$T_r$  = tiempo de reparación = 0.25h

$\lambda$  = tasa de falla del componente en operación =  $1.59 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$

$Q_{OP}$  = 3.975 E-05

**Evento básico INC-MEC00@K.-** Representa el modo "Falla del mecanismo

de barras de control y seguridad al producir la caída de al menos una barra sin disparo". La indisponibilidad promedio en operación es:

$$Q_{OP} = \lambda \times T_r = (1.69 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}) \times (2\text{h}) = 3.369 \text{ E-03}$$

Donde:

$T_r$  = tiempo de reparación = 2h

$\lambda$  = tasa de falla del componente en operación =  $1.69 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$

$Q_{OP}$  = 3.369 E-03

### c) Cuantificación de los árboles de falla

De acuerdo a los resultados de la cuantificación de los árboles de falla asociados a los modos de falla funcionales seleccionados, para el árbol de fallas INC@FI, se obtuvo que la probabilidad que el sistema se encuentre indisponible debido a la ocurrencia del evento no deseado "Falla sistema de corte al producir scram luego de 3s de recibido el pedido de corte durante el arranque" es **Q = 2,80 E-2**. La lista de los conjuntos mínimos de corte muestra que el evento dominante es **INC-MEC00@F** "Falla mecanismo de barras de control y seguridad al producir scram con un retardo > 3s"; según se puede observar en el anexo A4.1.

De manera análoga, para el modo de falla funcional que más compromete a la disponibilidad de la operación, representado mediante el árbol de fallas INC@FS, se obtuvo que la probabilidad que el sistema se encuentre indisponible debido a la ocurrencia del evento no deseado "Falla del sistema de corte al producir scram sin pedido de corte durante la marcha" es **Q = 3,549 E-3**. Asimismo el evento dominante es **INC-MEC00@K** "Falla del mecanismo de barras de control y seguridad al producir la caída de al menos una barra sin disparo durante la etapa de marcha"; como se puede observar

en el anexo A4.2.

### 3.6.- SELECCION DE LAS ACCIONES PARA AUMENTAR LA SEGURIDAD Y LA DISPONIBILIDAD

Dado que los eventos dominantes seleccionados en el punto anterior son funcionales, es necesario analizarlos a fin de reducir el nivel de resolución de subsistema a componente y luego poder aplicar diagrama de selección de tareas (figura 2.1). Para ello a continuación se identifica los componentes que juegan un rol importante en la aparición de los eventos seleccionados, y se realiza el análisis de los modos de fallas y de los efectos respectivo:

Tabla 3.9 Matriz falla funcional – componente  
para las 3 barras de control y 2 de seguridad (j = 1,...,5)

Componentes de la barra j	Código	Modos de falla funcionales	
		INC-MEC00@F	INC-MEC00@K
Electroimán	Cj3404		X
Relé de control	Cj0101		X
Microcontacto de límite superior	Cj3409		X
Buje guía de apoyo	Cj4506	X	
Soporte guía	Cj4510	X	

Tabla 3.10 Análisis de los modos de falla y de los efectos FMEA

Ítem	Modo de falla	Descripción	Causa de la falla	Efecto de la falla
Cj0101	Catastrófico	Falla en permanecer cerrado	Desgaste de contactos	Caída de barras
	Degradado	Disminución de la inductancia	Saturación del núcleo	" " "
Cj3404	Degradado	Disminución de la inductancia	Saturación del núcleo	" " "
Cj3409	Catastrófico	Falla en permanecer cerrado	Desgaste de micro-contactos	" " "
Cj4506	Incipiente	Des alineamiento	Vibración	Aumenta tiempo de caída de barras
Cj4510	Incipiente	Des alineamiento	Vibración	" " "

A continuación se aplica el diagrama de selección de tareas mostrado en la figura 2.1, a los modos de fallo encontrados:

Tabla 3.11 Selección de tareas de mantenimiento

Ítem	Modo de falla	Mantenimiento			
		Preventivo	Predictivo	Detectivo	Correctivo
Cj0101	Falla en permanecer cerrado	X			
	Disminución de la inductancia	X	X		
Cj3404	Disminución de la inductancia		X		
Cj3409	Falla en permanecer	X			
Cj4506	Des alineamiento			X	
Cj4510	Des alineamiento			X	

De acuerdo a este resultado, se proponen las siguientes acciones de mantenimiento para evitar ó reducir la frecuencia de aparición de los modos de falla dominantes:

- a. Reemplazo programado de los relés de control Cj0101 y de los micro switches de límite superior Cj3409
- b. Medición programada de las inductancias y corrientes de energización de los electroimanes Cj3404 y de los relés de control Cj0101
- c. Prueba periódica del alineamiento de los bujes guía y de los soportes guía del mecanismo de barras

Por otro lado, de acuerdo a los resultados del análisis de importancia mostrado en el anexo A5, se determinó que para reducir la probabilidad que el sistema se encuentre indisponible por la ocurrencia de los eventos que más afectan la seguridad y la disponibilidad, es más conveniente disminuir las indisponibilidades de los ítem más importantes; que en este caso resulta ser el mecanismo de barras de control y seguridad, que instalar otros en paralelo. Entonces, a partir de los modelos de confiabilidad empleados y que se muestran en las expresiones 2.19 y 2.20 del punto 2.3; las acciones adicionales que se pueden realizar para aumentar la seguridad y la disponibilidad, son:

- d. Disminución del periodo de pruebas o equivalentemente del tiempo entre pruebas  $T_{ep}$  del sistema de corte
- e. Disminución el tiempo de reparación del mecanismo de barras  $T_r$
- f. Cambio del mecanismo de barras de control y seguridad por otro de menor tasa de fallas.

## CAPITULO IV

### EVALUACION ECONOMICA DE LAS ACCIONES PROPUESTAS

#### 4.1.- CONSIDERACIONES PREVIAS

Para evaluar las acciones de mantenimiento destinadas a evitar o reducir la frecuencia de aparición de los modos de fallo que afectan a un determinado sistema de seguridad es necesario postular un evento iniciante representativo que demande a dicho sistema y luego estimar su frecuencia de ocurrencia, así como la probabilidad de falla del mencionado sistema al ser demandado.

En el caso particular del sistema de corte, se postula el evento de inserción de reactividad no controlada durante la etapa de arranque, el cual consiste en el izaje fortuito de un elemento combustible hasta la mitad de su altura y su posterior caída. Este evento ya ocurrió una vez en los últimos 12 años de operación del reactor, así que su probabilidad de ocurrencia es:

$$p = \frac{1 \text{ ocurrencia en } 12 \text{ años}}{(12 \text{ años} \times 50 \text{ semanas / año} \times 3 \text{ operaciones / semana})} = 5,56 \times 10^{-4} \quad (4.1)$$

Si además este sistema tiene un retardo > 3s en producir la desenergización

de las barras, entonces de acuerdo a las simulaciones efectuadas con el código de cálculo Paret, y que se muestran en la referencia [11], se producirá la falla de al menos un elemento combustible EECC. Esto no solo implicaría reemplazar el elemento combustible fallado sí no también considerar su almacenamiento y disposición final como residuo. Por lo tanto, de acuerdo a la referencia [2] el costo total de las consecuencias de la ocurrencia del evento postulado y del evento que más afecta la seguridad, está compuesto por:

Costo por EECC nuevo,  $C_{ec} = \text{US\$ } 60\,000$

Costo de almacenamiento por EECC en pileta durante 10 años para el decaimiento necesario de los productos de fisión,  $C_{ap} = \text{US\$ } 2000$

Costo de disposición final por EECC,  $C_{df} = \text{US\$ } 4000$

Costo por pérdida de producción de 1 semana,  $C_{pr} = \text{US\$ } 24\,000$

Costo por cambio de resinas ,  $C_{cr} = \text{US\$ } 40\,000$

Luego

Costo total de las consecuencias,  $C_c = \text{US\$ } 130\,000$  (4.2)

#### 4.2.- ANALISIS DEL INCREMENTO DE LA SEGURIDAD EN LA OPERACION

En este acápite se evalúan las acciones  $c$ ,  $d$  y  $f$  propuestas en 3.6 de acuerdo a los criterios de *aplicabilidad* y *costo efectividad*. En ese sentido utilizando los resultados presentados en 3.5 para la probabilidad promedio que ocurra el evento INC@FI, y de (4.1) para la frecuencia de aparición del evento iniciante, se halla la probabilidad de ocurrencia conjunta de ambos eventos:

$$P = p \times Q = 5,56 \times 10^{-4} \times 2,80 \times 10^{-2} = 1,56 \times 10^{-5} \quad (4.3)$$

Por otro lado, de acuerdo al criterio de costo efectividad, presentado en 2.1, para evaluar la efectividad de las acciones propuestas, se debe comparar el costo del efecto que se quiere evitar; con el costo de implementación de la acción propuesta. Luego de (4.2) y (4.3) se halla el costo esperado de las consecuencias ó el riesgo por falla de un elemento combustible:

$$R = C_c \times P = \text{US\$ } 130\,000 \times 1,56 \times 10^{-5} = \text{US\$ } 2,03 \quad (4.4)$$

Dado que el costo de implementación de cualquiera de las acciones propuestas *b*, *c* y *e* supera al riesgo (4.4); ninguna de estas acciones es costo efectiva, y por ello no es conveniente invertir en su implementación. Sin embargo, dado que este riesgo es suficientemente pequeño, se puede evaluar el aumento del tiempo entre pruebas ó mejor aún se puede hallar el tiempo entre pruebas que minimice el costo de confiabilidad de este sistema, el cual se define como:

$$C_{\text{confiabilidad}} = C_{\text{mantenimiento preventivo}} + \text{Riesgo} \quad (4.5)$$

#### 4.3.- DETERMINACION DEL TIEMPO ENTRE PRUEBAS OPTIMO Y AHORRO POR DISMINUCION EN EL COSTO DE CONFIABILIDAD DEL SISTEMA DE CORTE

El mantenimiento preventivo del sistema de corte, se realiza a través de pruebas periódicas de funcionamiento que se llevan a cabo durante los períodos de parada programados y requieren en promedio 1h por barra con un mínimo 3 personas para su ejecución: el oficial de radio protección, el operador y el encargado de mantenimiento. Estas pruebas consisten en la medición del tiempo de retardo de cada una de las 5 barras de control y seguridad, es decir, del tiempo que transcurre desde se recibe la señal de



disparo hasta que se produce la desenergización de la respectiva barra.

El costo del mantenimiento preventivo es directamente proporcional al número de pruebas anuales, mientras que el riesgo por falla del elemento combustible, es igual a:

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad de falla EECC} \times \text{Costo de las consecuencias} \quad (4.6)$$

Donde la probabilidad por falla del elemento combustible es igual a la probabilidad de ocurrencia conjunta del evento iniciante postulado y de la falla del sistema de corte según el evento INC@FI, el cual a su vez, de acuerdo a 3.5b, es función del tiempo entre pruebas. De manera que si aumenta dicho periodo, disminuye el número de pruebas anuales y con ello, el costo del mantenimiento preventivo; pero, se incrementa el riesgo, puesto que la probabilidad que el sistema de corte falle mientras espera ser demandado es mayor, al incrementarse el período entre pruebas, y viceversa. Por lo tanto es necesario hallar el tiempo entre pruebas del sistema de corte que minimice el costo de confiabilidad, teniendo en cuenta que estas pruebas se deben realizar por lo menos 1 vez al año según la licencia de operación del reactor.

Tabla 4.1 Componentes del costo por prueba de 5 barras de c. y s.

Componente	Cantidad requerida	Costo unitario	Costo total
Mano de obra (3 personas)	15 h-h	7.2 \$ / h-h	108 US\$
Depreciación de equipo 20000h	5h	0.75 \$/ h	3.75 US\$
Costo total por prueba $C_p$			112 US\$

Luego de acuerdo a (4.5) el costo de confiabilidad del sistema de corte es:

$$CR = C_{\text{mto. preventivo}} + \text{Riesgo}$$

$$CR = C_p \frac{N}{T_{ep}} + C_c p Q_m \quad (4.7)$$

Donde:

$C_p$  es el costo total por prueba del sistema (ver tabla 4.1)

$N$  es el número de horas de operación anuales igual a 6000h

$T_{ep}$  es periodo de pruebas ó el tiempo entre pruebas

$C_c$  es costo total de las consecuencias, de (4.2) es igual a US\$ 130 000

$p$  la probabilidad de una inserción no controlada de reactividad en el núcleo de acuerdo a (4.1) es igual a 5.6 E-04

$Q_m$  es la probabilidad que el sistema de corte falle actuando con un retardo > 3s (evento INC@FI) considerando solamente a los componentes más importantes, que de acuerdo a los resultados presentados en el anexo A.4 son el mecanismo de barras y el módulo de desenergización, entonces de (2.21):

$$Q_m = \frac{\lambda T_{ep}}{2} \quad (4.8)$$

con  $\lambda$  igual a la suma de las tasas de falla en espera de los 2 componentes mencionados, es decir si  $\lambda_m = 6.35\text{E-}05$  y  $\lambda_d = 5.50\text{E-}05$  entonces  $\lambda = \lambda_m + \lambda_d = 1.185\text{E-}04$ , reemplazando (4.8) en (4.7) se tiene:

$$CR = C_p \frac{N}{T_{ep}} + C_c p \frac{\lambda T_{ep}}{2} \quad (4.9)$$

hallando la derivada parcial de  $CR$  respecto a  $T_{ep}$  se tiene

$$\frac{\partial CR}{\partial T_{ep}} = -C_p \frac{N}{T_{ep}^2} + \frac{C_c p \lambda}{2} \quad (4.10)$$

igualando a cero y resolviendo en  $T_{ep}$  se halla el tiempo entre pruebas que minimiza el costo de confiabilidad:

$$T_{ep,min} = \sqrt{\frac{2C_p N}{C_c p \lambda}} \quad (4.11)$$

$$T_{ep,min} = \sqrt{\frac{2(112)(6000)}{(130000)(5.6E-04)(1.185E-04)}} = 12531.6 h$$

que se puede aproximar a 12000h, como se puede verificar en la figura 4.1, lo cual equivale a decir que con un tiempo de operación anual de 6000h aproximadamente cada 2 años se realicen las pruebas del sistema de corte. Sin embargo de acuerdo a la licencia de operación, el período entre pruebas de este sistema no puede exceder a un año de operación, es decir a lo más puede ser igual a 6000h, por lo cual se asume un tiempo entre pruebas igual a 6000h y considerando un tiempo entre pruebas inicial de 480h, se halla el ahorro anual:

$$CR_{T_{ep}=480 h} = C_p \frac{N}{T_{ep}} + C_c p \frac{\lambda T_{ep}}{2}$$

$$CR_{T_{ep}=480 h} = (112) \frac{6000h}{480h} + (130000)(5,6 \times 10^{-4}) \frac{(1,185 \times 10^{-4})(480h)}{2}$$

$$= 1402 \text{ US\$}$$

$$CR_{T_{ep}=6000 h} = C_p \frac{N}{T_{ep}} + C_c p \frac{\lambda T_{ep}}{2}$$

$$CR_{T_{ep}=6000 h} = (112) \frac{6000h}{6000h} + (130000)(5,6 \times 10^{-4}) \frac{(1,185 \times 10^{-4})(6000h)}{2}$$

$$= 138 \text{ US\$}$$

Luego el ahorro anual  $AA = 1402 - 138 = 1264$  US\$

En 15 años de operación, que es el tiempo de vida útil que le queda al reactor antes de su re acondicionamiento, con este flujo de ahorros y considerando una tasa de descuento del 12.5% anual que es típica de una evaluación de carácter privado, se obtiene un valor presente neto igual a 8383 US\$.

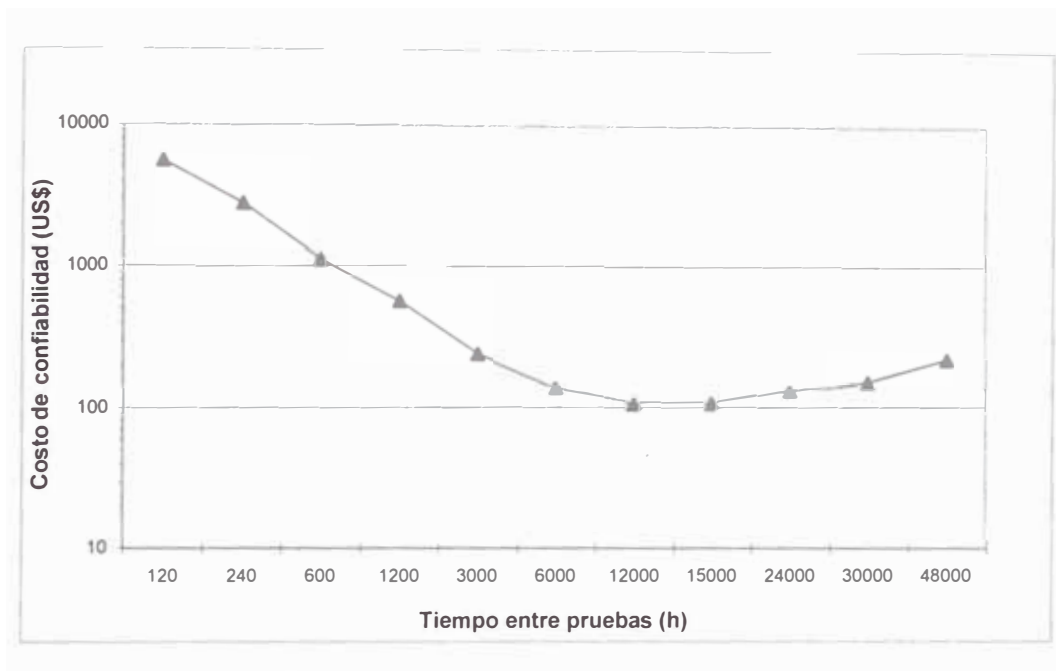


Fig. 4.1 Costo de confiabilidad del sistema de corte

#### 4.4.- ANALISIS DEL INCREMENTO DE LA DISPONIBILIDAD DE LA OPERACION

De acuerdo a 3.6, la indisponibilidad de la operación es causada por las fallas catastróficas y por degradación que sufren algunos componentes de la lógica de scram; las cuales originan la caída de las barras de control y seguridad, interrumpiendo la operación.

Este tipo de fallas que se denominan fallas seguras, según el punto 2.2d, se subsanan a lo sumo en horas cambiando los componentes fallados, de

manera tal que no es necesario considerar largos periodos de reparación que obligarían a importar los radioisótopos. Por lo cual el costo de las fallas seguras  $C_{fs}$ , está compuesto principalmente por el costo de arranque, para restituir el nivel de potencia de operación 10Mw y por el costo de operación adicional, debido al decaimiento radiactivo que sufren los productos, mientras se vuelve a poner operativo el sistema.

De acuerdo a la referencia [3], el costo por arranque a su vez está conformado por los consumos adicionales en energía eléctrica, combustible nuclear y mano de obra; los cuales se cuantifican a continuación:

- Costo por consumo adicional de energía eléctrica; considera la energía necesaria para volver a arrancar las unidades de refrigeración forzada ( 3 bombas, en el modo de operación I), para su cálculo se supone que la subida de potencia toma 1h, que el consumo de potencia promedio es de 682 Kw y que se realiza en un horario fuera de las horas punta, es decir:

$$C_{\text{consumo energía}} = 0.0961 \frac{\text{S/.}}{\text{Kw} \cdot \text{h}} \times 1\text{h} \times 682 \text{ Kw} = \text{S/.} 65 = \text{US\$ } 18$$

- Costo por consumo adicional de combustible; considera el consumo adicional del combustible nuclear durante la subida de potencia, supone que está subida toma en promedio 1h y se lleva cabo a una potencia promedio de 5 Mw, es decir:

$$C_{\text{consumo combustible}} = 220 \frac{\text{US\$}}{\text{h}} \times 1\text{h} = \text{US\$ } 220$$

- Costo adicional por mano de obra; considera las horas extras

adicionales que va a laborar el grupo de operación debido a la parada del reactor por disparo espúreo. Teniendo en cuenta que el grupo de operación lo integran 9 personas y que se trabajaría 1 hora extra adicional, se tiene:

$$C_{\text{mano de obra}} = 25 \frac{\text{S/}}{\text{h-h}} \times 1\text{h} \times 9 \text{ operadores} = \text{S/} 225 = \text{US\$} 63$$

Luego, el costo de arranque es igual a:

$$C_{\text{arranque}} = C_{\text{consumo energía}} + C_{\text{consumo combustible}} + C_{\text{mano de obra}}$$

$$C_{\text{arranque}} = 18 + 220 + 63 = 301 \text{ US\$}$$

Entonces, si durante un intervalo  $t$  ocurren  $N$  arranques, el costo total por arranque es:

$$C_{\text{total arranque}} = N_{\text{arranques}, t} \times C_{\text{arranque}}$$

Donde

$N_{\text{arranques}, t} = N_{\text{fallas}, t} = \lambda t$ , es el número esperado de fallas durante el intervalo  $t$ , para el modelo de tasa de fallas  $\lambda$  constante y de acuerdo a la página 419 de la referencia [7].

Si  $t = 6000\text{h}$  y  $\lambda = \lambda_{\text{mecanismo de barras}} = 1.69\text{E-}03 \text{ h}^{-1}$ , que corresponde a la tasa de fallas seguras del evento dominante INC-MEC00@K del modelo de árbol de fallas INC@FS que representa al modo de fallo que más afecta a la disponibilidad, según el anexo A4 - 2, se tiene:

$$C_{\text{total arranque}} = (1.69\text{E-}03 \text{ h}^{-1}) \times 6000\text{h} \times 301 \text{ US\$} = 3052.14 \text{ US\$} \quad (4.12)$$

Por otro lado, la fracción de la actividad de los radioisótopos que se pierde por decaimiento radiactivo mientras el sistema se vuelve a poner operativo es:

$$f_{\text{decaimiento}} = 1 - e^{-\frac{\ln 2 T_q}{T_{1/2}}}$$

Donde

$T_{1/2}$  es la vida media del radioisótopo considerado, que se toma igual al Yodo 131, que es uno de los principales productos, es decir  $T_{1/2} = 8$  días;

$t_q$  es el tiempo indisponible promedio en el intervalo  $t$ , e igual a  $t_q = Q \times t$ , siendo  $Q$ , la probabilidad promedio que el sistema se encuentre indisponible debido a la ocurrencia del evento INC@FS

Luego el costo por operación adicional del RP10 para un tiempo de operación  $t$ , debido al decaimiento radiactivo de los radioisótopos, es:

$$C_{op \times deca} = C_{operación(h)} \times T_{operación \text{ adicional}} \quad (4.13)$$

Donde

$C_{operación}$  es el costo de operación del RP10, que de acuerdo a la referencia [3] es igual a 430 US\$/h

$T_{operación \text{ adicional}}$  es tiempo de operación adicional debido al decaimiento radiactivo, para un tiempo de operación programado igual a  $t$ , es igual a:

$$T_{operación \text{ adicional}} = f_{\text{decaimiento}} \times t$$

Reemplazando en (4.13), se obtiene:

$$C_{op \times deca} = 430 \text{ US\$/h} \times \left( 1 - e^{-\frac{\ln 2 T_q}{T_{1/2}}} \right) \times t \quad (4.14)$$

Finalmente el costo por fallas seguras:

$$C_{fs} = C_{total\ arranque} + C_{op} \times deca$$

reemplazando (4.12) y (4.14), con  $t = 6000h$ , que es el tiempo de operación acumulado en 1 año, operando 120h por semana; se llega al costo anual por fallas seguras:

$$C_{fs,6000h} = 3052.14 \text{ US\$} + 430 \text{ US\$/h} \times \left(1 - e^{-\frac{\ln 2 \cdot T_q}{T_{1/2}}}\right) \times 6000h \quad (4.15)$$

con  $t_q = Q \times 6000h$

Una vez que se tiene definido el costo de las fallas seguras; se evalúan las acciones de mantenimiento  $a$ ,  $b$  y  $e$  que fueron propuestas en 3.6 para evitar ó reducir la probabilidad que el sistema se encuentre indisponible por la ocurrencia de estas fallas.

Para evaluar las acciones  $a$  y  $b$ , “Reemplazo programado de los relés de control y de los micro switches de límite superior” y “medición programada de las inductancias de las barras de control y seguridad” respectivamente; se supone que los correspondientes reemplazos y mediciones se efectúan durante las paradas semanales, es decir cada 120h; luego los costos anuales asociados con dichas acciones son:

Para la acción  $a$

Costo unitario de relé ó  $\mu$ switch = 15 US\$

Costo de cptes x semana = Costo de 1relé y 1 $\mu$ switch x 5 barras c. y s. = 30 US\$/ barra x 5 barras = 150 US\$

**Costo de componentes x año = 150 US\$ x 50 = 7500 US\$**



Mano de obra req. x cambio de cptes =  $0,33\text{h}/\text{barra} \times 5 \text{ barras} \times 3 \text{ op} = 5 \text{ h-h}$

Costo de mano de obra x cambio de cptes =  $5 \text{ h-h} \times 7,2 \text{ US\$} / \text{h-h} = 36 \text{ US\$}$

Mano de obra req. x prueba =  $0,083\text{h}/\text{barra} \times 5 \text{ barras} \times 3 \text{ op} = 1,25\text{h-h}$

Costo de mano de obra x prueba del sistema =  $1,25\text{h-h} \times 7,2 \text{ US\$}/\text{h-h} = 9 \text{ US\$}$

Costo total de mano de obra x semana =  $36 + 9 = 45 \text{ US\$}$

cptes = componentes electrónicos

**Costo total de mano de obra x año =  $45 \text{ US\$} \times 50 = 2250 \text{ US\$}$**

Para la acción *b*

Mano de obra requerida =  $0,25\text{h} / \text{barra} \times 5 \text{ barras} \times 3 \text{ op} = 3,75 \text{ h-h}$

Costo total de mano de obra x semana =  $3,75 \text{ h-h} \times 7,2 \text{ US\$}/\text{h-h} = 27 \text{ US\$}$

**Costo total de mano de obra x año =  $27 \text{ US\$} \times 50 = 1350 \text{ US\$}$**

Costo de equipos de medición = 7000 US\$

Tiempo de vida = 7 años

**Costo de depreciación de equipos x año =  $7000 \text{ US\$} \times 1/7 = 1000 \text{ US\$}$**

De otro lado, para evaluar la acción de mantenimiento e “*disminución del tiempo de reparación del mecanismo de barras*”, se considera que el tiempo de reparación del mecanismo de barras se reduce a la mitad; mejorando los métodos de trabajo y la capacidad de respuesta de los grupos de mantenimiento mecánico y electrónico, a través de la contratación de nuevo personal, de la mejora de los procedimientos de mantenimiento de todos los componentes del sistema y ubicando de manera permanente los repuestos, las herramientas y los equipos necesarios, donde se encuentran los subsistemas a ser atendidos, de modo que se eliminen las demoras por el continuo traslado de dichos equipos y herramientas.

Luego, de acuerdo a la referencia [3], el costo anual en mano de obra de mantenimiento en el 2002 fué de 49473 US\$. Entonces, sabiendo que el

50% de este valor corresponde al grupo encargado del mantenimiento del sistema de corte, el costo anual en mano de obra de este grupo de mantenimiento es 24736 US\$. Sabiendo que para aplicar esta acción se requiere duplicar el personal, se tiene:

**Costo anual de mano de obra requerida = 24 736 US\$**

Además, considerando que se requiere una inversión inicial en equipos y herramientas igual a 7727 US\$ y que el tiempo de vida de estos es 10 años, entonces:

**Costo anual por depreciación de equipos y herramientas = 10% x 7727 US\$ = 773 US\$**

Asi mismo, para hallar los beneficios esperados por aplicación de las acciones propuestas, se determinan los costos anuales por fallas seguras utilizando la expresión (4.15) y las indisponibilidades promedio del sistema de corte debido a la ocurrencia de evento INC@FS, las cuales se muestran los anexo A4 - 2 y 3:

Tabla 4.2 Costos por fallas seguras

Item	Inicial	Final
Tiempo de reparación del mecanismo de barras	2h	1h
Indisponibilidad por periodo de operación Q	3.549E-03	1.868E-03
Costo anual de operación x decaimiento $C_{op\ deca,6000h}$	190 904 US\$	102 309 US\$
Costo anual x falla seguras $C_{fs,6000h}$	193 956 US\$	105 361 US\$

Como se observa en la tabla 4.2, la acción e “disminución del tiempo de reparación del mecanismo de barras” es aplicable, puesto que a través de su aplicación se reduce la indisponibilidad del sistema, produciendo un

beneficio anual:

Beneficio anual = 193 956 – 105 361 = 88 595 US\$,

Asimismo, suponiendo que la aplicación de las acciones de mantenimiento *a* y *b* eliminará las fallas seguras, es decir que son aplicables; el beneficio anual esperado por aplicación de estas medidas es:

Beneficio anual = Costo anual por fallas seguras inicial = 193 956 US\$

Finalmente, se halla el valor presente de estos beneficios, en un periodo de 15 años; que es la vida útil que le queda al reactor antes de su re acondicionamiento, y a una tasa de descuento del 12.5 % anual, y se obtiene:

Tabla 4.3 Principales costos y beneficios de las acción propuestas

Costos / Beneficios	Acciones propuestas		
	A	B	E
Costo anual de componentes	7500 US\$		
Costo anual de mano de obra	2250 US\$	1350 US\$	24736 US\$
Costo anual x depreciacion de equipos		1000 US\$	773 US\$
Costo total anual (50 semanas)	9750 US\$	2350 US\$	25509 US\$
Valor presente del costo total 12,5% 15 años	64 671 US\$	15 587 US\$	169 198 US\$
Inversion inicial			7727 US\$
<i>Costo total actualizado</i>	<i>64 671 US\$</i>	<i>15 587 US\$</i>	<i>176 925 US\$</i>
Beneficio anual	193 956 US\$	193 956 US\$	88 595 US\$
<i>Beneficio actualizado 12,5% 15 años</i>	<i>1286490 US\$</i>	<i>1286490 US\$</i>	<i>587641 US\$</i>
Utilidad 12,5% 15 años	1221819	1270903	410716
Costo / Beneficio	0.050	0.012	0.30

Como se puede apreciar en la tabla 4.3, las acciones de mantenimiento *a*, *b* y *e* cumplen con el criterio de costo efectividad y juntas arrojan una utilidad total de 2 903438 US\$ en 15 años de operación a una tasa del 12.5 % anual, por lo cual se recomienda la implementación de las mismas.

## **CAPITULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1.- CONCLUSIONES**

- Se identifico al sistema de instrumentación nuclear para el corte como la causa principal de la indisponibilidad de la operación del RP10 durante el periodo 2001 – 2002. En ese sentido, se determinó que el mecanismo de barras de control y seguridad, es el componente más crítico tanto para el evento que más afecta la seguridad, como para el que más afecta la disponibilidad de la operación.
  
- Se determinó el período óptimo entre pruebas del sistema de corte y si bien no se puede adoptar dicho valor, debido a que es mayor al periodo máximo permitido (6000h) por la licencia de operación; se propone incrementar este tiempo de 480h a 6000h, con lo cual se obtendría un ahorro en el costo de confiabilidad de US\$ 8383, considerando 15 años de operación y una tasa de descuento del 12.5% anual.
  
- De acuerdo al análisis de sensibilidad del tiempo entre pruebas óptimo del sistema de corte, se determino que este valor es más

sensible a la variación de las tasas de fallas en espera del mecanismo de barras y del módulo de desenergización de electroimanes.

- Para un régimen de operación de 6000h anuales con paradas semanales de 48h y para las condiciones de evaluación utilizadas, se halló que la implementación de las acciones de mantenimiento *a*, *b* y *e* arroja una utilidad total de 2 903438 US\$ en 15 años de operación a una tasa del 12.5 % anual; por aumento de la disponibilidad de la operación del RP10.

## 5.2.- RECOMENDACIONES

- Modificar los procedimientos de mantenimiento de manera que se considere a la disponibilidad de los componentes, optimizando el costo mantenimiento total.
- Actualizar las respectivas normas regulatorias, utilizando al análisis probabilístico de riesgos en la determinación de los valores de los parámetros de operación y mantenimiento permitidos.
- Mejorar los formatos de las ordenes de trabajo de mantenimiento a fin de registrar el tiempo de reparación incluyendo los tiempos de espera.
- Desarrollar un sistema informático integral que sirva de soporte a la gestión basada en el riesgo, que comprenda a los departamentos de mantenimiento, operación, cálculo análisis y seguridad, y que se comunique con el sistema de adquisición de datos existente.

- Este estudio puede ser mejorado incluyendo a las fallas humanas, las fallas en modo común ó considerando otros eventos para el análisis de seguridad. Para ello es necesario mejorar el registro de fallas e incidencias.
- El personal de los departamentos de operación y mantenimiento, se debe involucrar más en este tipo de estudios para que no se sientan amenazados por los resultados del mismo, sino más bien que comprendan que va a permitir mejorar la eficiencia y la disminución de los costos.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Apuntes del Curso de Post grado en Protección Radiológica y Seguridad Nuclear - auspiciado por el Organismo Internacional de Energía Atómica – UBA 1997
- [2] Bergallo Juan E., Novara Oscar, Adelfang Pablo Análisis económico sobre el uso de elementos combustibles MTR a base de siliciuros en reactores de investigación – CNEA International Symposium on Research Reactor Utilization, Safety and Management - Lisboa Portugal 1999
- [3] Castro J., Anaya O. Costos de utilización del RP10 – DGI IPEN 2003
- [4] CNEA – Análisis Probabilístico de Seguridad del Reactor RP10 Capítulo 15–1988
- [5] CNEA – Informe de Seguridad del RP10 – Capítulo 7 Instrumentación y Control – 1988
- [6] CNEA–Informe de Seguridad del RP10– Capítulo 8 Sistema de Energía Eléctrica - 1988
- [7] Elsayed A. Elsayed Reliability Engineering – Addison Wesley 1996
- [8] IAEA Manual on Reliability Data Collection for Research Reactor PSA Tecdoc 636 – January 1992
- [9] IEEE Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronic, Sensing Component, and Mechanical Equipment Reliability Data for Nuclear Power Generating Stations IEEE Std 500 - 1984
- [10] Jacobs I.M. Reliability of Engineered Safety Features as a Function of

Testing Frequency – Nuclear Safety Vol. 9, No. 4, July Aug. 1968

[11] Lazaro M. Gerardo Análisis de accidente por inserción de reactividad 1\$ / 300 ms del núcleo 25 RP10 y máxima reactividad por experimentos – CASE IPEN 2003

[12] Modarres Mohammad, Kaminsky Mark, Krivstov Vasily Reliability Engineering and Risk Analysis – Marcel Dekker 1999

[13] Mohammed Mohammed H. Enhancement of Process / Product Performance through Reliability Analysis University of Dayton CH35934-96/0000-0423 1996 IEEE

[14] Smith Anthony M. Reliability Centered Maintenance – Mc Graw Hill 1993

[15] Stewart Mark G., Melchers Robert R. Probabilistic Risk Assessment of Engineering Systems – Chapman & Hall 1997

[16] Vatn Jørn, Hokstad Per y Bodsberg Lars An overall model for maintenance optimization – Reliability Engineering and System Safety 51 (1996) 241-257 - 1996 Elsevier Science Limited

[17] Vesely W.E., Goldberg F.F., Roberts N.H., Haasl D.F. Fault Tree Handbook U.S. Nuclear Regulatory Commission - 0492 - 1981

[18] Winfield D. J. y Alsop C.J. Optimization of Safety System Test frequency - AECL Chalk River Ontario y NNC Knutsford Cheshire

[19] Winfield David J. A Cost-Effective Technique for Predicting Process Plant Reliability –AECL Chalk River Ontario

[20] Winfield David J. Fault Tree Analysis of a Research Reactor Shutdown System - AECL Chalk River Ontario

#### SOFTWARE UTILIZADO

Risk Spectrum PSA Professional 0.99 - 1998

Risk Spectrum FT Professional 1.10

Psapack 4.3 N6