

UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA Y
ELECTRICA**



**“PROPUESTA DEL PROGRAMA DE MANTENIMIENTO SEGÚN
RCM, PARA MEJORAR LA DISPONIBILIDAD OPERACIONAL DEL
SISTEMA DE VENTILACIÓN DEL REACTOR NUCLEAR RP-10,
IPEN-LIMA”**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR EL BACHILLER

BERAUN BELLIDO, YAELA SUSAN

Villa El Salvador

2019

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a las personas más importantes que forman parte de mi vida, en primer lugar, a mis padres por su constante apoyo y confianza, segundo a mi novio, por estar a mi lado en cada paso como compañero, amigo y colega; por último, a mis hermanos por cada palabra de aliento. Todos forman parte de mi éxito.

AGRADECIMIENTO

Brindo mi total agradecimiento a cada persona que me crucé en mi camino profesional y personal, por cada consejo recibido, cada apoyo y aprecio, aprendí mucho de todos; quiero agradecer de igual forma a mis padres, Modesta y Felipe; a mis hermanos, mi novio, mis amigos, mi asesor, mis compañeros de trabajo y de estudios.

Por último, agradezco al Instituto Peruano de Energía Nuclear, por darme la oportunidad y facilidad de desarrollar mi trabajo en sus instalaciones.

INDICE

CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 DESCRIPCION DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA.....	9
1.2 JUSTIFICACION DEL PROBLEMA.....	11
1.3 DELIMITACION DEL PROYECTO.....	12
1.3.1 TEÓRICA.....	12
1.3.2 TEMPORAL.....	12
1.3.3 ESPACIAL.....	12
1.4 FORMULACION DEL PROBLEMA.....	12
1.4.1 PROBLEMA GENERAL.....	12
1.4.2 PROBLEMAS ESPECIFICOS.....	13
1.5 OBJETIVOS.....	13
1.5.1 OBJETIVO GENERAL.....	13
1.5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	13

CAPITULO II: MARCO TEORICO

2.1 ANTECEDENTES.....	14
2.2 BASES TEORICAS.....	16
2.2.1 REACTOR NUCLEAR.....	16
2.2.2 REACTOR NUCLEAR RP-10:.....	17
2.2.3 MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONFIABILIDAD:.....	20
2.2.4 ANALISIS DE CRITICIDAD.....	22
2.2.5 ANALISIS DE FALLA Y EFECTOS DE FALLA (AMEF)	24

2.3 DEFINICION DE TERMINOS BASICOS.....	26
2.3.1 MANTENIMIENTO.....	26
2.3.2 MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (MCC O RCM).....	27
2.3.3 CRITICIDAD.....	27
2.3.4 FALLAS FUNCIONALES.....	27
2.3.5 MODO DE FALLA.....	27
2.3.6 EFECTO DE FALLA.....	27

CAPITULO III: DESARROLLO DEL TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

2.4 ETAPA 1: ESTUDIO DE LAS CONDICIONES INICIALES - ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE VENTILACION DEL REACTOR.....	29
2.5 ETAPA 2: SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS. ANALISIS DE CRITICIDAD DE LOS EQUIPOS DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN.....	43
2.6 ETAPA 3: ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLAS (AMEF).....	48
2.7 ETAPA 4: APLICACIÓN DEL MANTENIMIENTO BASADO EN RCM. PROPUESTA DEL PROGRAMA DE MANTENIMIENTO.....	52
CONCLUSIONES	54
RECOMENDACIONES	55
BIBLIOGRAFIA	56

LISTADO DE FIGURAS

<i>Figura 1.-</i>	Vista superior del Reactor Nuclear RP-10.....	10
<i>Figura 2.-</i>	Vista superior del núcleo del Reactor.....	17
<i>Figura 3.-</i>	Hall del Reactor nuclear RP-10.....	18
<i>Figura 4.-</i>	Banco de filtros del sistema de ventilación.....	19
<i>Figura 5.-</i>	Modelo de criticidad de factores ponderados basado en la teoría del riesgo-cualitativo.....	23
<i>Figura 6.-</i>	Matriz de criticidad.....	24
<i>Figura 7.-</i>	Cuadro del Documento AMEF.....	25
<i>Figura 8.-</i>	Equipo N° 8 del sistema de ventilación.....	30
<i>Figura 9.-</i>	Grupo N° 9 del sistema de ventilación.....	31
<i>Figura 10.-</i>	Equipo N° 7 del sistema de ventilación.....	32
<i>Figura 11.-</i>	Proceso operativo del Sistema de Ventilación.....	34
<i>Figura 12.-</i>	Resolución de matriz de criticidad.....	46
<i>Figura 13.-</i>	Valores de los índices de criticidad.....	46
<i>Figura 14.-</i>	Diagrama de Pareto de los equipos del sistema de ventilación...	48

LISTADO DE TABLAS

<i>Tabla N° 1</i>	Relación de subsistemas y equipos del Sistema de ventilación.....	35
<i>Tabla N°2</i>	Especificaciones técnicas del Equipo 7.....	36
<i>Tabla N°3</i>	Especificaciones técnicas del Equipo 8.....	37
<i>Tabla N°4</i>	Especificaciones técnicas del Grupo 9.....	38
<i>Tabla N°5</i>	Especificaciones Técnicas del CHILLER.....	39
<i>Tabla N°6</i>	Registro de historial de fallas del sistema de ventilación.....	40
<i>Tabla N°7</i>	Puntuación de los equipos según los factores de riesgo	44
<i>Tabla N°8</i>	Valores del índice de criticidad por cada equipo.....	45
<i>Tabla N°9</i>	Determinación de equipos críticos.....	46
<i>Tabla N°10</i>	AMEF – Subsistema de homogenización- Ventilador N.º 1....	49
<i>Tabla N°11</i>	AMEF – Subsistema de homogenización- CHILLER.....	50
<i>Table N°12</i>	Propuesta del Programa de Mantenimiento	52

INTRODUCCION

Realizar un mantenimiento regular a los equipos y sistemas de una instalación es esencial, porque reduce la presencia de fallas en el tiempo, además logra aumentar la confiabilidad de los equipos para que desarrollen las funciones que están destinados a realizar. Por el contrario, la falta de mantenimiento puede ocasionar fallas, defectos, paradas en los sistemas, afectando gravemente la seguridad de la instalación y de las personas.

Estamos de acuerdo que una falla de un equipo no genera el mismo impacto en un taller que en una instalación nuclear. En una instalación nuclear el pilar importante que rige cada proceso es la seguridad, tanto para la instalación como para las personas, es por eso que la aplicación de un constante mantenimiento a todos los sistemas es algo de vital importancia.

En el Perú, se ubica el centro nuclear Oscar Miro Quesada RACSO, el mismo que alberga al Reactor nuclear de investigación RP-10, el más potente de Latinoamérica con una potencia térmica de 10MW. El órgano rector responsable es el Instituto Peruano de Energía Nuclear, encargado de la operación segura del reactor y garantizar la producción de radioisótopos, los que son distribuidos a distintos puntos del país, para el tratamiento y/o diagnóstico de enfermedades neoplásicas.

La operación segura del reactor depende de varios factores, entre lo que destaca el óptimo funcionamiento de los sistemas que lo conforman, buscando siempre reducir al mínimo las fallas y paradas de los equipos, y aumentar la disponibilidad y confiabilidad de los mismos.

El presente trabajo abarca el sistema de ventilación del reactor nuclear, diseñado para garantizar la seguridad de las personas y la instalación; se describe su funcionamiento, situación operativa actual, un análisis de sus equipos y el desarrollo de una propuesta de mantenimiento para mejorar la disponibilidad operacional del sistema.

La Autora.

CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 DESCRIPCION DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

El Reactor “RP-10” es un Reactor nuclear de investigación de 10 MW de potencia térmica fundado en 1989, que tiene por finalidad la producción de radioisótopos para aplicaciones médicas e industriales. Se encuentra ubicado en el Centro nuclear RACSO en el distrito de Carabayllo, provincia de Lima, cuya entidad responsable de la operación segura del Reactor es el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN).

El Reactor nuclear RP-10 es un Reactor tipo piscina, de tanque abierto, como se muestra en la *figura 1*, opera actualmente los días miércoles, viernes y sábados para producir radioisótopos, durante la operación en el núcleo del reactor se generan fisiones nucleares, el núcleo se encuentra sumergido en agua al interior de un tanque de 11m de profundidad, el proceso de fisión genera energía que se manifiesta en forma de calor, durante la operación el calor genera condensación del agua del tanque principal, por ello después de operar el reactor, ya apagado se extrae el calor remanente a través del sistema de refrigeración que consta de un conjunto de bombas y del sistema de ventilación para remover el calor dentro del hall. Todo es parte del

procedimiento para conservar la vida de los componentes electrónicos del Reactor que pueden verse afectados por la condensación de agua.



Figura 1.- Vista superior del Reactor Nuclear RP-10
Fuente: Pagina Oficial. Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN)

Este tiempo de vida de los componentes se ve afectado por que el sistema de ventilación presenta fallas menores en su funcionamiento, tales como paradas no programadas de los ventiladores, posiciones incorrectas de las persianas, entre otros, lo que evidencia una baja disponibilidad operacional, por ser una instalación nuclear el tema de la seguridad es de suma importancia, así como el correcto funcionamiento de todos sus sistemas.

Actualmente todos los sistemas cuentan con un plan de mantenimiento, enfocado en reparar y corregir, no enfocado en prevenir las fallas de los equipos, además no se cuenta con un registro detallado de equipos y los tipos de fallas que estos presentan. El sistema de ventilación está compuesto por distintos equipos, los que necesitan mantenimiento periódico para mejorar su disponibilidad.

1.2 JUSTIFICACION DEL PROBLEMA

El sistema de ventilación no solo es útil para ayudar en la remoción de calor del núcleo del Reactor, sino que tiene otras funciones vitales como recircular el aire del recinto del Reactor para evitar la acumulación de gases o partículas radiactivas en el área controlada, filtrar el aire que sale del recinto del Reactor antes de ser expulsado al exterior a través de la chimenea, generar la depresión en el recinto del reactor siendo este un requisito obligatorio para iniciar y mantener en operación el reactor, ya que este genera una depresión dentro del recinto, para ello se utiliza un sistema de doble puerta, además ante la ocurrencia de un accidente radiactivo o nuclear el sistema de ventilación cambia de modo normal a emergencia (esto será explicado en el siguiente capítulo) evitando que el aire con material radiactivo sea expulsado al exterior quedando atrapado en el recinto y recircule a través de un banco de filtros.

Por ello es de vital importancia que el sistema de ventilación se encuentre disponible tanto cuando el Reactor esté en operación, apagado o en mantenimiento, para garantizar la seguridad y protección del Personal que labora en la instalación, así como la seguridad del medio ambiente.

Debido a esto se busca mejorar la disponibilidad actual que presenta el sistema, para así garantizar que ante una situación de emergencia o incidente inusual el sistema responda completamente, esto se logrará identificando cual es el equipo más crítico del sistema, analizando sus fallas y proponiendo un programa de mantenimiento que debe ser aplicado para mejorar su disponibilidad.

1.3 DELIMITACION DEL PROYECTO

1.3.1 TEÓRICA

La investigación se desarrolló en base a la metodología del mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), para el sistema de ventilación del Reactor nuclear RP-10; cuyo alcance es la formulación del programa de mantenimiento que abarca todos los componentes y equipos del sistema de ventilación para mejorar su disponibilidad operacional.

1.3.2 TEMPORAL

La recolección de datos históricos para el análisis de fallas es considerada entre los años 2017 y 2018, en base a estos datos se desarrollan los cálculos necesarios para aplicar la metodología del RCM al sistema de ventilación y realizar la propuesta del programa de mantenimiento.

1.3.3 ESPACIAL

El presente proyecto se desarrolla en las instalaciones del Reactor Nuclear Peruano RP-10 ubicado en el Centro Nuclear Oscar Miro Quesada (IPEN), Av. San José Saco s/n en el distrito de Carabayllo, provincia Lima, Perú.

1.4 FORMULACION DEL PROBLEMA

1.4.1 PROBLEMA GENERAL

¿Cómo formular la propuesta del programa de mantenimiento según RCM, para mejorar la disponibilidad operacional del sistema de ventilación del Reactor nuclear RP-10, IPEN - Lima?

1.4.2 PROBLEMAS ESPECIFICOS

- ✓ ¿Cómo calcular la tasa de fallos del sistema de ventilación del Reactor nuclear RP-10?
- ✓ ¿Cuáles son los equipos críticos del sistema de ventilación del Reactor nuclear RP-10?

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

- ✓ Proponer un programa de mantenimiento según RCM, para mejorar la disponibilidad operacional del sistema de ventilación del Reactor nuclear RP-10, IPEN – Lima.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ✓ Calcular la tasa de fallos del sistema de ventilación del Reactor nuclear RP-10.
- ✓ Identificar los equipos críticos del sistema de ventilación del Reactor nuclear RP-10.

CAPITULO II: MARCO TEORICO

2.1 ANTECEDENTES

Existen diversas investigaciones relacionados al mantenimiento tanto nacional como internacional, los cuales se exponen a continuación:

- Soto Baltazar J. (2016). *Mantenimiento basado en la confiabilidad para el mejoramiento de la disponibilidad mecánica de los volquetes FAW en GYM S.A.* Tesis de grado, Perú. Universidad Nacional del Centro del Perú, en sus conclusiones manifiesta:

La aplicación del RCM en su trabajo le permite determinar que uno de los problemas principales en los volquetes era el regulador de corriente del alternador, produciendo los cambios de estos en la mayoría de los volquetes.

Además, concluye que con el mantenimiento diario logran mantener en buenas condiciones el vehículo y permite anticiparse a las fallas evitando la inoperatividad mecánica. Por último, con la investigación logra mejorar la disponibilidad mecánica de los volquetes FAW CA3256, la disponibilidad mejoró de 90,14% a 92,034%.

Este antecedente se utilizó como guía para mejorar la disponibilidad operacional de los equipos, teniendo como dato ya calculado la disponibilidad de cada equipo en el presente trabajo.

- Esteban de la Cruz E. (2017). *Mantenimiento centrado en confiabilidad para el equipo más crítico del área de molienda de Clinker en planta Atocongo – lima*. Tesis de grado, Perú. Universidad Nacional del Centro del Perú, en sus conclusiones manifiesta:

Según el análisis de criticidad realizado a los 14 equipos del área de molienda de Clinker de la línea cuatro, obtiene: 3 equipos críticos (con índice de criticidad de 240, 110 y 51), 3 equipos semicríticos y 8 equipos no críticos. El trabajo aplica toda la metodología del MCC al equipo más crítico: la prensa de rodillo.

Este antecedente se utilizó como guía para realizar el análisis de criticidad de los equipos.

- Milanese Negro, C. (2013) *Diseño de un plan preventivo basado en el mantenimiento centrado en la confiabilidad en la Máquina papelera*. Informe de pasantía. Venezuela. Universidad Simón Bolívar. En sus conclusiones manifiesta:

Que gracias a la aplicación de MCC halló 96 modos y efectos de falla en los equipos considerados críticos; 21 para la calandria, 54 para la rebobinadora y otros 21 para bobinadora.

Este antecedente se utilizó como guía para desarrollar el documento AMEF (análisis de modos y efectos de falla) de los equipos y sistemas involucrados en el presente trabajo.

- Aguiar Guzmán, L. (2014) *Análisis de modos y efectos de falla para mejorar la disponibilidad operacional en la línea de producción de gaseosas N°3*. Trabajo de Grado. Colombia. Universidad Libre de Colombia. En sus conclusiones manifiesta:

Con el análisis de modos y efectos de falla que realizó a los equipos críticos de la línea y teniendo en cuenta el número de prioridad de riesgo

(RPN), ejecutó las modificaciones de su plan de mantenimiento propuesto y la utilización del plan de implementación con las etapas propuestas, el autor espera recuperar los tres puntos porcentuales en la disponibilidad operacional de la línea.

Este antecedente se utilizó como guía para realizar la modificación del plan de mantenimiento actual y proponer un nuevo plan de mantenimiento aplicando RCM.

2.2 BASES TEORICAS

2.2.1 REACTOR NUCLEAR

Se define un reactor nuclear como una instalación capaz de iniciar, mantener y controlar las reacciones de fisión en cadena que tiene lugar en el núcleo del reactor, compuesto por el combustible, el refrigerante, los elementos de control, los materiales estructurales y el moderador en el caso de los reactores nucleares térmicos.

Se distinguen dos tipos de Reactores Nucleares:

- A. Reactores nucleares de investigación.** Este tipo de reactores utilizan los neutrones generados durante las reacciones de fisión nuclear para producir radioisótopos que van a ser utilizados en otras aplicaciones de la energía nuclear o bien para realizar estudios en materiales.
- B. Reactores nucleares de potencia.** Estos reactores se basan en el aprovechamiento de la energía térmica que se genera en las reacciones de fisión. La aplicación principal y más conocida de este tipo de reactores es la generación de energía eléctrica en las centrales nucleares. Sin embargo, también se utilizan para la desalinización de agua de mar, calefacción, o bien para sistemas de propulsión.

2.2.2 REACTOR NUCLEAR RP-10:

El reactor nuclear RP-10, es un reactor térmico tipo piscina de tanque abierto de una potencia de 10 Mw que se utiliza normalmente para los reactores de investigación 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 en un tanque cilíndrico vertical de acero inoxidable de 4 m de diámetro y 11 m de altura, un núcleo (ver *figura N° 2*) con sus elementos combustibles, los cuales se componen de Uranio 235 enriquecido al 20 % y 2 barras de control y 3 de seguridad, facilidades de irradiación, el blindaje y moderador que es agua desmineralizada.

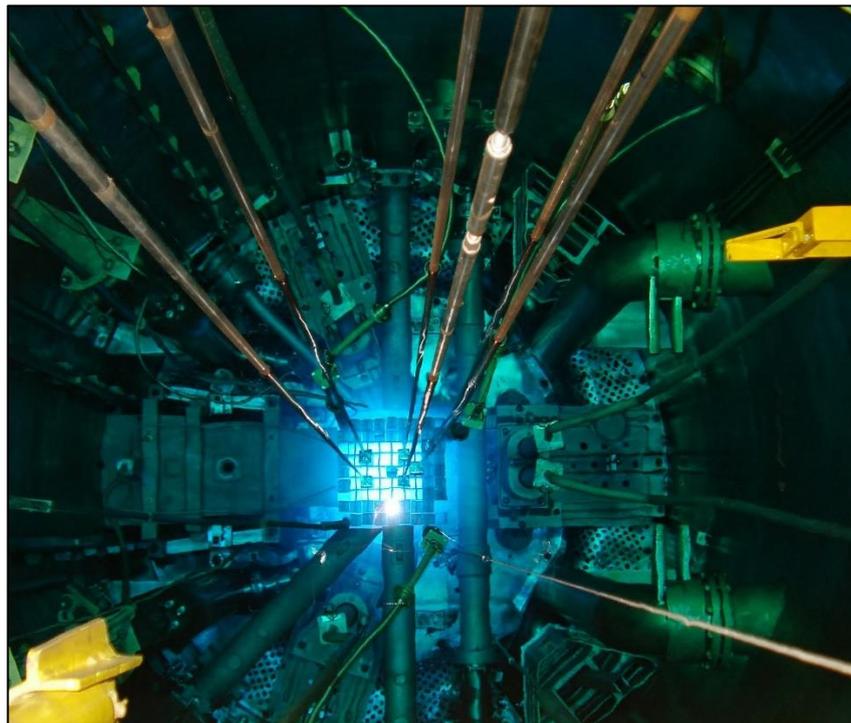


Figura 2.- Vista superior del núcleo del Reactor.
Fuente: Página oficial del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN).

2.2.2.1 SISTEMA DE VENTILACIÓN DEL REACTOR

Esta diseñado con el fin de mantener el hall del Reactor con una presión negativa de 15 mm de columna de agua respecto del exterior, aunque este valor puede variar hasta -20 mm ca, 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 radiactividad, como lo es el hall del Reactor mostrado en la *figura 3*.



Figura 3.- Hall del Reactor Nuclear. Área controlada.
Fuente: Revista Mirador Nuclear. A. Zuñiga.

Son también funciones de este sistema, filtrar el aire y retener por absorción los aerosoles y el yodo radiactivo 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.

Los principales componentes del sistema son:

- Equipo N 7: Homogenización del Hall del Reactor.
- Equipo N° 8: Inyección de aire del exterior.
- Grupo N° 9: Extracción del aire del edificio del Reactor.
- Un banco de filtros
- Persianas de cierre hermético
- Un calefactor y un sistema de enfriamiento CHILLER.

Cada uno de los equipos se encuentra duplicado, operando solamente uno de ellos, y teniendo al otro como reserva.

La purificación del aire que se extrae del hall se realiza a través de la siguiente secuencia de filtrado, ver *figura N°4*:

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



Figura 4.- Banco de filtros del sistema de ventilación
Fuente: Registro fotográfico del Autor.

2.2.3 MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONFIABILIDAD:

Es una metodología para el desarrollo de un plan de mantenimiento basada en el análisis de fallos de la instalación. También es una técnica más dentro de las posibles para elaborar un plan de mantenimiento en una planta industrial y que presenta algunas ventajas importantes sobre otras técnicas. De algunas metodologías dedicadas a la elaboración de planes de mantenimiento, basar este plan de mantenimiento en un exhaustivo análisis de fallo es sin duda la que mejor resultados pueden dar.

A. CONFIABILIDAD:

La confiabilidad de un equipo es la frecuencia con la cual ocurren las fallas en el tiempo. Si no hay fallas el equipo es 100% confiable, si la frecuencia de fallas es muy baja, la confiabilidad del equipo es aún aceptable, pero si la frecuencia es alta, el equipo es poco confiable.

B. DISPONIBILIDAD:

Es la capacidad de un activo o componente para estar en un estado (arriba) para realizar una función requerida bajo condiciones dadas en un instante dado de tiempo o durante un determinado intervalo de tiempo, asumiendo que los recursos externos necesarios se han proporcionado.

La disponibilidad Operacional representa el porcentaje de tiempo que el equipo quedo a disponibilidad del área de operación para desempeñar su función en un periodo de análisis. Teniendo en cuenta el tiempo que el equipo está fuera de operación por paros programados y no programados. El objetivo de este indicador es medir el desempeño de los equipos y la eficiencia en la gestión de mantenimiento, de manera conjunta, comparándolos contra los objetivos y metas del negocio, con la finalidad que Operación tenga cada vez más tiempo el equipo disponible y que este pueda realizar la función para la que fue diseñado.

C. MANTENIBILIDAD:

Propiedad de un sistema que representa la cantidad de esfuerzo requerida para conservar su funcionamiento normal o para restituirlo una vez se ha presentado un evento de falla. Se dirá que un sistema es "Altamente mantenible" cuando el esfuerzo asociado a la restitución sea bajo. Sistemas poco mantenibles o de "Baja mantenibilidad" requieren de grandes esfuerzos para sostenerse o restituirse.

La mantenibilidad está inversamente relacionada con la duración y el esfuerzo requerido por las actividades de mantenimiento. Puede ser asociada de manera inversa con el tiempo que se toma en lograr acometer las acciones de mantenimiento, en relación con la obtención del comportamiento deseable del sistema.

Según la norma SAE JA 1011 las 7 preguntas básicas del proceso RCM son:

1. ¿Cuál es la función?, Lo que el usuario desea que la máquina haga.
2. ¿Cuál es la falla funcional?, Razones por las que deja de hacer lo que el usuario desea que haga.
3. ¿Cuál es el modo de falla?, Que pudo causar la falla funcional.
4. ¿Cuál es el efecto de la falla?, falla?, Que ocurre cuando la falla se produce.
5. ¿Cuál es la consecuencia de la falla?, Razones por las que importa que falle.
6. ¿Qué se puede hacer para evitar o minimizar la consecuencia de la falla?
7. ¿Qué se hace si no se encuentra ninguna tarea para evitar o minimizar la consecuencia de la falla?

2.2.4 ANALISIS DE CRITICIDAD

Es una metodología empleada para jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos de acuerdo con su impacto de negocio, con el fin de facilitar la toma de decisiones, con respecto a la asignación de recursos (económico, humano y técnicos), está basada en la teoría del riesgo, donde la criticidad es igual a la frecuencia de la falla por las consecuencias asociadas a la misma (Parra, 2007).

La criticidad se representa por la siguiente ecuación:

$$\text{CRITICIDAD} = \text{FRECUENCIA} \times \text{CONSECUENCIA}$$

Dónde:

- Frecuencia: Número de eventos o fallas de un equipo determinado
- Consecuencia: es el total de impactos relacionados, es decir; (Impacto operacional x Flexibilidad) + Costo mantenimiento + Impacto SAH).

Los valores que se entregarán a cada equipo para el análisis están dados en la figura 5.

En este sentido, para realizar un análisis de criticidad es necesario considerar los siguientes aspectos (Parra y Crespo, 2012):

- ✓ Definir un alcance y propósito para el análisis de criticidad.
- ✓ Seleccionar o desarrollar un método de evaluación para jerarquizar los sistemas seleccionados.

<p style="text-align: center;">Frecuencia de fallas:</p> Parámetro mayor a 4 fallas/año.....4 Promedio de 2-4 fallas/año.....3 Promedio entre 1-2 fallas/año.....2 Menores a 1 falla/año.....1	<p style="text-align: center;">Coste de Mantenimiento:</p> Mayor o igual de 20.000\$.....2 Inferior a 20.000\$.....1
<p style="text-align: center;">Impacto operacional:</p> Parada inmediata de toda la planta.....10 Parada del sector y tiene repercusión en otros sectores de la planta.....6 Impacta en niveles de producción y calidad.....4 Repercute en costos operacionales adicionales asociados a disponibilidad.....2 No genera efecto significativo sobre Operaciones y producción.....1	<p style="text-align: center;">Impacto en Seguridad Ambiente Higiene</p> Afecta la seguridad humana.....8 Daña o afecta el ambiente.....6 Afecta las instalaciones causando Daños severos.....4 Provoca daños menores (Accidentes e incidentes) personal propio.....2 Provoca un impacto ambiental Que no viola las normas ambientales.....1 No provoca ningún daño a personas, instalaciones o ambiente.....0
<p style="text-align: center;">Flexibilidad operacional</p> No existe opción de producción y no Existe función de repuesto4 Hay opción de repuesto compartido.....2 Función de repuesto disponible.....1	

Figura 5.- Modelo de criticidad de factores ponderados basado en la teoría del riesgo-cualitativo
Fuente: (Faneite, 2013)

Posteriormente de realizar y asignar cada valor a los equipos analizados, de acuerdo al valor obtenido realizando la ecuación:

CONSECUENCIA ((IO*FO) +CM+ISAH), se ubicará el valor de cada equipo en la matriz de criticidad, para conocer cual es nuestra escala de criticidad. (Ver figura 6).



Figura 6.- Matriz de criticidad
Fuente: (Faneite, 2013)

2.2.5 ANALISIS DE FALLA Y EFECTOS DE FALLA (AMEF)

El Análisis del Modo y Efecto de Fallas (AMEF), es un procedimiento que permite identificar fallas en productos, procesos y sistemas, así como evaluar y clasificar de manera objetiva sus efectos, causas y elementos de identificación, para de esta forma, evitar su ocurrencia y tener un método documentado de prevención. Un ejemplo del documento se muestra en la *figura 7*.

Hoja de trabajo de Información RCM II		Sistema: ACCIONAMIENTO		Responsable:	Hoja N°:	
		Sub-sistema: ACOPLAMIENTO CARDANICO		Fecha:	De:	
Función	Falla Funcional (Pérdida de Función)	Modo de Falla (Causa de la Falla)		Efecto de Falla (Que sucede cuando se produce la falla)		
1	Hermetización de los envases	A	No hermetiza los envases.	1	Perfiles de herramientas fuera de parámetro.	Se observaron ondulaciones en el cierre, poniendo en riesgo la Hermetización del producto por lo tanto va contra la seguridad del consumidor.
				2	Rotura de faja de transmisión.	Se observa desgaste, por lo tanto va contra la producción.
				3	Cortocircuito del motor de transmisión.	El equipo deja de funcionar, se puede medir la temperatura y va contra la producción.
				4	Desincronización de cabezal de cierre.	Desincronización en el cabezal ocasiona mal cierre del envase, generando mermas.
	Cierre de 120 a 180 envases por minuto.	B	Hermetiza menos de 120 envases/minutos.	1	Faja de transmisión destemplada.	Se puede visualizar, no atenta contra la seguridad ni el medio ambiente pero si con la operación.

Figura 7.- Cuadro del Documento AMEF.
Fuente: Moubray, 2004)

2.2.5.1 MODO DE FALLA.

Un modo de falla podría ser definido como cualquier evento que pueda causar la falla de un activo físico (o sistema o proceso). La mejor manera de mostrar la conexión y la diferencia entre los estados de falla y los eventos que podrían causar los es primero hacer un listado de fallas funcionales, y luego registrar los modos de falla que podrían causar cada falla funcional.

También indica que, como mínimo, la descripción de un modo de falla debe consistir en un sustantivo y un verbo. La descripción debe ser lo suficientemente detallada para poder seleccionar una estrategia de

manejo de falla apropiada, pero no tanto como para perder mucho tiempo en el propio proceso de análisis (Moubray, 2004).

2.2.5.2 EFECTO DE FALLA:

Consiste en hacer una lista de lo que de hecho sucede al producirse cada modo de falla. Esto se denomina efectos de falla. “Los efectos de la falla describen que pasas cuando ocurre un modo de falla”. La descripción de estos efectos debe incluir toda la información necesaria para ayudar en la evaluación de las consecuencias de las fallas. Concretamente, al describir los efectos de una falla, debe hacerse constar lo siguiente (Moubray, 2004):

- La evidencia (si la hubiera) de que se ha producido una falla.
- Las maneras (si las hubiera) en que la falla supone una amenaza para la seguridad o el medio ambiente.
- Las maneras (si las hubiera) en que afecta a la producción o a las operaciones.
- Los daños físicos (si los hubiera) causados por la falla.
- Qué debe hacerse para reparar la falla

2.3 DEFINICION DE TERMINOS BASICOS

2.3.1 MANTENIMIENTO

El mantenimiento se define como la disciplina cuya finalidad consiste en mantener las máquinas y el equipo en un estado de operación, lo que incluye servicio, pruebas, inspecciones, ajustes, reemplazo, reinstalación, calibración, reparación y reconstrucción (Parra, 2007).

2.3.2 MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (MCC O RCM)

Es una metodología de la aplicación del mantenimiento, donde es un proceso utilizado para determinar que se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que hagan en su contexto operacional. (Moubray, 2004).

2.3.3 CRITICIDAD

Es un indicador proporcional al riesgo que permite establecer la jerarquía o prioridades de procesos, sistemas y equipos, creando una estructura que facilita la toma de decisiones acertadas y efectivas, y permite direccionar el esfuerzo y los recursos a las áreas donde es más importante y/o necesario mejorar la confiabilidad y administrar el riesgo (Parra, 2007).

2.3.4 FALLAS FUNCIONALES

Es cuando el ítem no cumple con su función de acuerdo al parámetro que el usuario requiere (Moubray, 2004).

2.3.5 MODO DE FALLA

Es la forma por la cual una falla es observada. Describe de forma general como ocurre y su impacto en la operación del equipo. Efecto por el cual una falla es observada en un ítem fallado. Hechos que pueden haber causado cada estado de falla (Parra y cresco, 2012).

2.3.6 EFECTO DE FALLA

El efecto es la descripción que debería incluir toda la información necesaria para apoyar la evaluación de las consecuencias de la falla, tal como: Qué evidencia existe (si la hay) de que la falla ha ocurrido, qué modo representa una amenaza para la seguridad o el medio ambiente y qué daños físicos (si los hay) han sido causados por la falla (Moubray, 2004).

CAPITULO III: DESARROLLO DEL TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

En este capítulo se presenta las etapas en las que se desarrolla el trabajo, estas etapas han sido definidas en respuesta a las 7 preguntas básicas que establece la teoría del RCM, explicado en el capítulo II. Para la propuesta del "Programa de mantenimiento para mejorar la disponibilidad operacional del Sistema de Ventilación del Reactor RP-10", estableceremos una serie de procedimientos incluidos en las etapas mencionadas a continuación:

A. Etapa 1: Estudio de las condiciones iniciales: Estructura y funcionamiento del sistema de ventilación.

- ✓ Procedimiento de operación del Sistema de ventilación del Reactor RP-10.
- ✓ Descripción de los subsistemas. Especificaciones técnicas de los equipos del sistema de ventilación.
- ✓ Recopilación de registros de mantenimiento: historial de fallas.

- ✓ Determinación de la disponibilidad operacional inicial del sistema de ventilación.
- B. Etapa 2:** Selección de los equipos. Análisis de criticidad de los equipos del Sistema de ventilación.
- ✓ Estudio y jerarquización de los equipos, según el desarrollo de sus funciones.
 - ✓ Descripción del equipo más crítico y sus funciones.
- C. Etapa 3:** Análisis Modos de fallas y Efectos de Fallas.
- ✓ Evaluación de las funciones y fallas funcionales, para determinar sus modos y efectos de falla.
 - ✓ Elaboración del documento (AMEF) para los equipos seleccionados.
- D. Etapa 4:** Aplicación del mantenimiento basado en RCM. Aplicación del mantenimiento basado en RCM. Propuesta del programa de mantenimiento.
- ✓ Elaboración de nuevas tareas de mantenimiento.

2.4 ETAPA 1: ESTUDIO DE LAS CONDICIONES INICIALES - ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE VENTILACION DEL REACTOR.

El sistema de ventilación está diseñado con el fin de proveer la máxima seguridad y simpleza de operación para el personal, de modo que, la circulación de aire se establezca siempre desde las “áreas frías” hacia las zonas potencialmente contaminables, a fin de evitar contaminación de las primeras. Los equipos de ventilación son en su totalidad, fácilmente accesibles para efectuar pruebas periódicas e inspecciones durante la operación normal del reactor.

2.4.1 PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN

En el diseño del sistema de ventilación y acondicionamiento del reactor nuclear RP-10 se ha establecido dos estados operativos: Normal y Emergencia.

2.4.1.1 ESTADO OPERATIVO: VENTILACION NORMAL

El proceso operativo del sistema de ventilación en condiciones normales de funcionamiento, (entiéndase por condición normal aquella situación donde no existe un riesgo radiológico) es el siguiente:

- a. El total de aire exterior ingresa al Hall del Reactor a través de la unidad de entrada de aire del Equipo N.º 8 (ver *figura.8*); el mismo consiste en una unidad de filtrado, compuesta por filtro grueso rotativo, pre-filtrado, filtro fino y dos ventiladores (uno de reserva). El sistema cuenta con controles capaces de mantener constante el caudal de aire en circulación a medida que se van colmatando los filtros.



Figura 8.- Equipo N° 8 del sistema de ventilación.
Fuente: Registro fotográfico del Autor.

- b. El aire es expulsado al exterior, previamente filtrado, por medio del grupo extractor N.º 9 (ver *figura 9*). Este posee dos ventiladores de extracción para el 100% del caudal cada uno, con persianas de independización en la aspiración y la descarga, estas últimas con mando neumático. En caso de falla de uno de ellos, arranca automáticamente el otro. Se completa con dos (2) bancos de filtros (uno para operación normal y otro de reserva) que retienen partículas de radio yoduros y aerosoles radiactivos presentes en el aire a descargar en chimenea.



Figura 9.- Grupo N° 9 del sistema de ventilación
Fuente: Registro fotográfico del Autor.

- c. El equipo N. ° 7 (ver *figura 10*) de tratamiento y homogenización, está permanentemente funcionando. La unidad está compuesta por pre filtros, filtro fino, serpentina de enfriamiento y dos ventiladores (uno de reserva). Cuenta con persianas de cierre, tanto en la toma de aire como en la descarga de los ventiladores, operados estos últimos por actuadores neumáticos.



Figura 10.- Equipo N° 7 del sistema de ventilación.
Fuente: Registro fotográfico del Autor.

- d. Las Salas de Bombas Primarias e Intercambiadores es ventilada desde abajo hacia arriba aprovechando la circulación establecida por la convección natural de los locales.
- e. Siendo el caudal de renovación de aire del recinto del Reactor de 6.000 m³/h y, 10.00m³ la capacidad del mismo; se produce una renovación cada hora 40 minutos.
- f. Adicional se dispone del Grupo N°10, este subsistema consta de un solo ventilador, y es puesto en funcionamiento al día siguiente de haber operado el reactor, su función principal es la de homogeneizar el aire caliente que se almacena por diferencia de densidad en la parte superior del casquete del reactor, por lo general opera 3 veces por semana, durante el horario de trabajo.

2.4.1.2 ESTADO OPERATIVO: VENTILACION EN EMERGENCIA

En el caso se dé un accidente con emisión de material radiactivo detectado en la entrada de la chimenea, Según el informe del oficial de radio protección y con la

autorización del jefe de reactor se procede a pasar de ventilación normal a ventilación de emergencia del Reactor en forma manual.

El sistema operativo es el siguiente:

- a.** El sistema procede a cerrar herméticamente la persiana de toma de aire exterior, la de toma de aire de la Sala de Intercambiadores, la Sala de Máquinas. Se apaga el equipo N° 8 (inyección) de forma automática. 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 hermética en la toma de aire y persianas de cierre en la descarga de los ventiladores, todos operados por motor neumático. Esta válvula es operada al cambiar a ventilación de emergencia desde consola en sala de control.
- b.** Se cierra la persiana de expulsión de aire al exterior, abriendo la de recirculación, las dos persianas pertenecientes al Grupo N° 9 (extracción); estableciendo de este modo un circuito de aire cerrado a través de los filtros.
- c.** El equipo N.º 7, de recirculación, permanece en funcionamiento cumpliendo la función de homogeneizador y contribuyendo en el mantenimiento de la depresión, al no permitir que la temperatura se eleve debido a cargas propias del local.
- d.** Se da este procedimiento en estado de emergencia, para evitar que los gases acumulados en el recinto del Reactor salgan al exterior, reduciendo el riesgo de contaminación del medio externo.

El proceso de operación sistematizado del Sistema de ventilación se puede apreciar en la *Figura 11*.

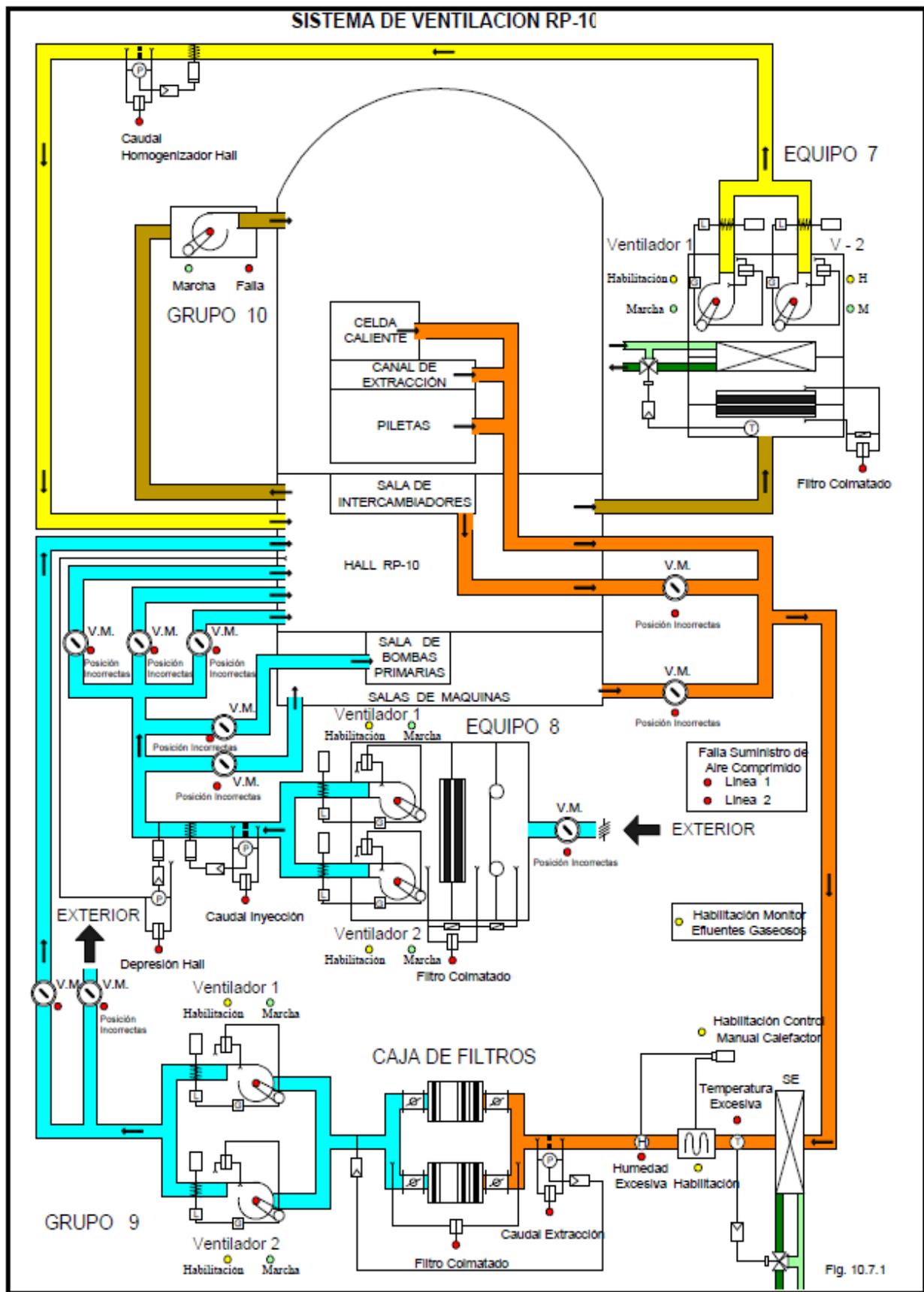


Figura 11.- Proceso operativo del Sistema de Ventilación.
 Fuente: Informe de seguridad Capítulo 10, Dirección de producción, IPEN.

2.4.2 DESCRIPCION DE LOS SUBSISTEMAS DEL SISTEMA DE VENTILACION.

Para la elaboración de este programa de mantenimiento para el sistema de ventilación es necesario conocer previamente los subsistemas y equipos que conforman este sistema, así como las especificaciones técnicas de cada uno.

2.4.2.1 LISTADO DE EQUIPOS Y COMPONENTES DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN

Se inicia por detallar la relación de equipos que componen el sistema de ventilación del Reactor y que están directamente involucrados en su funcionamiento. En la **tabla N.º 1**, se muestra la relación de los subsistemas y equipos.

Tabla N.º 1 Relación de subsistemas y equipos del Sistema de ventilación

SUBSISTEMA	EQUIPOS	AÑO INSTALACION	HOROMETRO
Equipo N.º 7 (Homogenización)	Ventilador N.º 1	1991	86016
	Ventilador N.º 2	1991	86000
	Sistema de Filtros	2013	30720
	Persianas de cierre	1991	28224
	Serpentina de enfriamiento (CHILLER)	1991	12288
Equipo N.º 8 (Inyección)	Ventilador N.º 1	1991	86100
	Ventilador N.º 2	1991	86100
	Sistema de Filtros	2013	30720
	Persianas de cierre	1992	28224
Grupo N.º 9 (Extracción)	Ventilador N.º 1	1990	86116
	Ventilador N.º 2	1990	86116
	Banco de filtros	2013	32000
	Batería de calefactor	1990	12200

	Persianas de cierre	1990	28224
	Serpentina de enfriamiento (CHILLER)	1991	12288
	Chimenea	1990	86010
Grupo N.º 10	Ventilador	1993	2688
Unidad de Enfriamiento (CHILLER)	Compresores	2016	12288
	Bomba N°1	1991	86000
	Bomba N°2	1991	85000
	válvulas	2016	12288
Subsistema de Aire comprimido	Compresor N°1	2018	3072
	Compresor N°2	2018	3072
	válvulas	2018	3072
	Tanque de reserva	2018	3072

Fuente: Elaborado por el autor.

2.4.2.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN

Se muestra a continuación las especificaciones técnicas de los subsistemas del sistema de ventilación, la información fue obtenida de manuales y registros del departamento de Mantenimiento. La información se presenta en las siguientes tablas:

Tabla N°2 Especificaciones técnicas del Equipo 7.

EQUIPO N° 7			
SISTEMA:	VENTILACIÓN	SUBSISTEMA:	HOMOGENIZADOR
CAPACIDADES MINIMAS:			
Caudal:	20.000 m ³ /h	Potencia:	5,5 HP min
Presión:	resultante del sistema	Enfriamiento:	69.430 kcal/h min
MOTOR - VENTILADOR N° 1			
COMPONENTE:	MOTOR		
FABRICANTE:	CORRADI	VOLTAJE:	220/380
MODELO/SERIE:	MTA 132 M/4 S:804246	AMPERAJE:	33/19

R.P.M:	1740	POTENCIA:	12.5 CV
COS ϕ :	0.83	FECUENCIA:	60 Hz
COMPONENTE:	VENTILADOR		
POTENCIA:	9.2 HP	PRESION:	100 mm.c.a
CAUDAL:	333.3 m ³ /min	R.P.M:	1006
MOTOR - VENTILADOR N° 2			
COMPONENTE:	MOTOR		
FABRICANTE:	CORRADI	VOLTAJE:	220/380
MODELO/SERIE:	MTA 132 M/4 S:804244	AMPERAJE:	33/19
R.P.M:	1740	POTENCIA:	12.5 CV
COS ϕ :	0.83	FECUENCIA:	60 Hz
COMPONENTE:	VENTILADOR		
POTENCIA:	9.2 HP	PRESION:	100 mm.c.a
CAUDAL:	333.3 m ³ /min	R.P.M:	1006
SISTEMA DE FILTROS			
Prefiltros:	Eficiencia: 98%		
Filtro fino.	Eficiencia: 99,99%		

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla N°3 Especificaciones técnicas del Equipo 8.

EQUIPO N° 8			
SISTEMA:	VENTILACIÓN	SUBSISTEMA:	INYECCION
CAPACIDADES MINIMAS:			
Caudal:	6,000 m ³ /h	Potencia:	4 HP min
Presión:	resultante del sistema		
MOTOR - VENTILADOR N° 1			
COMPONENTE:	MOTOR		
FABRICANTE:	CORRADI	VOLTAJE:	220/380
MODELO/SERI:	MTA 100 L2/4 S:2401100	AMPERAJE:	12.6 / 7.3
R.P.M:	1710	POTENCIA:	4 HP
COS ϕ :	0.77	FECUENCIA:	60 Hz
COMPONENTE:	VENTILADOR		

POTENCIA:	3.95 HP	PRESION:	23 mm.c.a
CAUDAL:	6,000 m ³ /min	R.P.M:	1470
MOTOR - VENTILADOR N° 2			
COMPONENTE:	MOTOR		
FABRICANTE:	CORRADI	VOLTAJE:	220/380
MODELO:	MTA 100 L2/4 S:2401100	AMPERAJE:	12.6 / 7.3
N° SERIE:	1710	POTENCIA:	4 HP
COS ϕ :	0.77	FECUENCIA:	60 Hz
COMPONENTE:	VENTILADOR		
POTENCIA:	3.95 HP	PRESION:	100 mm.c.a
CAUDAL:	6,000 m ³ /min	R.P.M:	1470

Fuente: Elaborado por el autor.

Tabla N°4 Especificaciones técnicas del Grupo 9.

GRUPO N° 9			
SISTEMA:	VENTILACIÓN	SUBSISTEMA:	EXTRACCIÓN
CAPACIDADES MINIMAS:			
Caudal:	6000 m ³ /h	Potencia:	9.8 HP
Presión:	resultante del sistema		
MOTOR - VENTILADOR N° 1			
COMPONENTE:	MOTOR		
FABRICANTE:	CORRADI	VOLTAJE:	220/380
MODELO/SERIE:	MTA 132 M/4 S:921793	AMPERAJE:	26.8 / 15.5
R.P.M:	1750	POTENCIA:	10 CV
COS	0.8	FECUENCIA:	60 Hz
COMPONENTE:	VENTILADOR		
POTENCIA:	9.8 HP	PRESION:	100 mm.c.a
CAUDAL:	6000 m ³ /h min	R.P.M:	1750
MOTOR - VENTILADOR N° 2			
COMPONENTE:	MOTOR		
FABRICANTE:	CORRADI	VOLTAJE:	220/380
MODELO/SERIE:	MTA132 M/ S:921794	AMPERAJE:	26.8 / 15.5

R.P.M:	1750	POTENCIA:	10 CV
COS	0.8	FECUENCIA:	60 Hz
COMPONENTE:	VENTILADOR		
POTENCIA:	9.8 HP	PRESION:	100 mm.c.a
CAUDAL:	6000 m ³ /h min	R.P.M:	1750
SISTEMA DE FILTROS			
	Eficiencia	Elemento filtrante	Marco
Prefiltros:	98% partículas de 5-10 micrones	fibra de vidrio	acero galvanizado
Filtro absoluto:	99,99%	fibra de vidrio	acero galvanizado
Filtro carbón activado:	99,9% I131 y 97% ICH3	carbón activado con 1% IK	acero

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla N°5 Especificaciones técnicas del CHILLER.

UNIDAD DE ENFRIAMIENTO (CHILLER)			
SISTEMA:	VENTILACIÓN	SUBSISTEMA:	EQUIPO N°7
ESPECIFICACIONES			
Capacidad:	65 TR	Potencia:	15 KW
Fabricante:	Jhonson Controls	Refrigerante:	410 A
MODELO:	YCAL0052EE28XEBS YORK	SERIE:	11551A95836090
BOMBAS DE AGUA FRIA			
COMPONENTE:	BOMBA N°1		
FABRICANTE:	CORRADI	VOLTAJE:	220/380
MODELO:	MTA 132 M1/4	AMPERAJE:	26.8 / 15.5
R.P.M:	1730	POTENCIA:	1/2 HP
COS	0.85	FECUENCIA:	60 Hz
COMPONENTE:	BOMBA N°2		
FABRICANTE:	CORRADI	VOLTAJE:	220/380
MODELO:	MTA 132 M1/4	AMPERAJE:	26.8 / 15.5
R.P.M:	1730	POTENCIA:	1/2 HP
COS	0.85	FECUENCIA:	60 Hz

Fuente: Elaborado por el autor

2.4.3 RECOPIACIÓN DE REGISTROS DE MANTENIMIENTO: HISTORIAL DE FALLAS.

La información documentada sobre el total de fallas de los subsistemas, de los equipos y las reparaciones es incompleta, a cambio de ello se registra las fechas de las fallas, el motivo de la falla y las ordenes de trabajo emitidas por el Departamento de operación hacia el Departamento de mantenimiento para solucionarlas, en base a ello se elaboró un historial de fallas de los equipos involucrados en el funcionamiento del sistema de ventilación. Gracias a ello se podrá estudiar la situación actual del sistema. En la *tabla N°6* se muestra el historial de fallas del sistema de ventilación comprendido entre los años 2017 al 2019.

Tabla N°6 Registro de historial del sistema de ventilación.

HISTORIAL DE FALLAS DEL SISTEMA DE VENTILACION			
FECHA DE REGISTRO	EQUIPO	TIPO DE FALLA	FECHA DE OT
10/02/2017	Equipo N°7	Ventilador 1 no pasa de arranque a marcha	11/02/2017
01/03/2017	Unidad CHILLER	No enciende los compresores	01/03/2017
05/04/2017	Persianas de apertura	No se accionan las persianas, no deja pasar el aire.	06/04/2017
13/06/2017	Equipo N°7	Derrame de agua de la bandeja de condensación del equipo.	13/06/2017
22/06/2017	Equipo N°8	Ventilador 2 no habilita.	24/04/2017
05/11/2017	Equipo N°7	Ventilador 1 se apaga en operación repentinamente.	
16/01/2018	Equipo N° 7	Ventilador 1 y ventilador 2 no funcionan	18/01/2018
22/01/2018	Calefactor-Grupo 9	Control de ON/OFF averiado	22/01/2018
29/01/2018	Filtros-Grupo 9	Falta reponer indicadores de presión de filtros Pre y Hepa 1.	29/01/2018
14/02/2018	Bomba #1 S. E	Fuga de agua y corrosión	14/02/2018
19/02/2018	Equipo N°7	Ventilador 1 y ventilador 2 se	19/02/2018

		apagan repentinamente	
07/03/2018	Grupo N°9	Falla del actuador neumático	07/03/2018
22/01/2019	Equipo N°8	Falla de inyección de aire a la sala de bombas primario	22/01/2019
22/01/2019	Grupo N°9	Persiana de cierre en posición incorrecta	22/01/2019
14/02/2019	Bomba #2 S.E	Fuga de agua	14/02/2019
09/03/2019	Equipo N°7	Rebalse de agua, ducto de drenaje obstruido	11/03/2019
18/03/2019	Bomba #2 S.E	Fuga de agua	18/03/2019
18/03/2019	Grupo N°9	Posición incorrecta de persiana (sala de máquinas)	18/03/2019

Fuente: Elaboración propia.

2.4.4 DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD OPERACIONAL DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN.

Para el cálculo de la disponibilidad operacional actual del sistema de ventilación, se usó la información registrada en el historial de fallas de los equipos, los registros de las horas de trabajo del cuaderno de actividades diarias de sala de control, adicional a ello se requiere hallar: Horas de operación y las Horas de paradas del sistema de ventilación de acuerdo con las horas de trabajo.

- a. El cálculo de la disponibilidad operacional del sistema será mensual, en este caso para el mes de marzo.
- b. El sistema de ventilación se encuentra operativo durante la jornada laboral de lunes a viernes y en los turnos de operación los sábados y domingos. De acuerdo con ello obtenemos las Horas de operación.
 - ❖ **Horas de Operación normal mensual:** $((8*5) *4) + (24*4) = 256$ Horas
- c. En base al Historial de fallas de los equipos obtenemos el número de paradas mensual.
 - ❖ **Número de paradas: 6**

- d. Con los datos obtenidos se procede a la aplicación de las fórmulas para hallar la disponibilidad operacional inicial del sistema.

TIEMPO MEDIO ENTRE FALLAS (MTBS):

$$\text{MTBS} = \frac{\text{Horas de operación}}{\text{Numero de paradas}}$$

$$\text{MTBS} = \frac{256}{6}$$

$$\text{MTBS} = 42.6 \text{ hrs/fallas}$$

$$\text{TASA DE FALLAS} = 0.023 \text{ fallas/hora}$$

TIEMPO MEDIO PARA REPARAR (MTTR):

$$\text{MTTR} = \frac{\text{Total de horas por paradas}}{\text{Numero de Paradas}}$$

$$\text{MTTR} = \frac{40}{6}$$

$$\text{MTTR} = 6.67 \text{ hrs/fallas}$$

DISPONIBILIDAD (%):

$$\text{Disponibilidad (\%)} = \frac{\text{MTBS}}{\text{MTBS} + \text{MTTR}}$$

$$\text{DISPONIBILIDAD} = \frac{42.6}{42.6 + 6.67}$$

$$\text{DISPONIBILIDAD} = 0.86 * 100$$

$$\text{DISPONIBILIDAD OPERACIONAL} = 86\%$$

$$\text{TASA DE FALLAS} = 0.023 \text{ fallas/hora}$$

La disponibilidad operacional actual del sistema de ventilación es del 86%. Con la propuesta del programa de mantenimiento se busca aumentar la disponibilidad operacional del sistema a un valor mayor del **92 %** en base a estándares usados para cuantificar el rendimiento de la operación de una máquina que trabaja normalmente.

La propuesta del programa de mantenimiento busca una mejora en la Disponibilidad operacional del sistema de Ventilación enfocándose a aumentar su valor. Para una disponibilidad del equipo del 92% se debe reducir el número de paradas de 6 a 2. Mas adelante se detallará las medidas a tomar en la frecuencia del mantenimiento para reducir las paradas por fallas.

2.5 ETAPA 2: SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS. ANALISIS DE CRITICIDAD DE LOS EQUIPOS DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN

2.5.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS CRÍTICOS

Para identificar los equipos críticos del Sistema de ventilación se establece criterios de evaluación según el método del riesgo, explicado en las bases teóricas, donde se evalúa las consecuencias de los factores tales como: Seguridad y medio ambiente, mantenimiento, producción y calidad, estos criterios se relacionan con una ecuación matemática. Según la tabla de factores se otorgará una puntuación para cada equipo evaluado; dichos valores fueron asignados de acuerdo con la experiencia del personal mecánico y supervisor.

Los pasos para la evaluación de criticidad son los siguientes:

- a) Primer paso, para la evaluación de criticidad es poseer una historial de fallas o paradas de los equipos para su respectivo análisis **(Ver historial de falla en el punto anterior)**
- b) Segundo paso, es evaluar o determinar su puntuación en cada ítem o factores según los factores de riesgo que establece el RCM. Ver *tabla N° 7*.

Tabla N°7 Puntuación de los equipos según los factores de riesgo.

EQUIPOS	Frecuencia de fallas	Impacto operacional (IO)	Flexibilidad operacional (FO)	Costo de mantenimiento (CM)	Impacto, seguridad, ambiente, higiene (ISAH)
EQUIPO N.º 7					
Ventilador N.º 1	4	10	2	2	8
Ventilador N.º 2	4	6	2	2	4
Filtros	1	4	4	1	8
Persianas de cierre	1	2	4	1	1
Serpentina de enfriamiento	3	2	4	2	0
EQUIPO N.º 8					
Ventilador N.º 1	4	10	2	2	6
Ventilador N.º 2	3	10	2	2	6
Filtros	1	2	4	1	1
Persianas de cierre	1	2	2	1	0
GRUPO N.º 9					
Ventilador N.º 1	4	6	2	2	6
Ventilador N.º 2	3	6	2	2	6
Banco de filtros	1	2	1	1	8
Batería de calefactor	1	1	4	1	0
Persianas de cierre	1	1	4	1	1
Serpentina de enfriamiento	2	1	2	2	1
GRUPO N.º 10					
Ventilador 1	2	2	1	2	6
UNIDAD DE ENFRIAMIENTO (CHILLER)					
Compresores	1	4	2	2	0
Bombas	4	6	2	1	0
válvulas	2	1	1	1	0
SUBSISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO					
Compresor N.º 1	1	4	2	1	0
Compresor N.º 2	1	4	2	1	0
válvulas	1	4	2	1	0
Tanque de reserva	1	1	4	1	0

Fuente: Elaborado por el autor

- c) El tercer paso es evaluar el índice de criticidad de los equipos del sistema de ventilación, mediante la ecuación matemática, como se ve en la *Tabla N° 8*.

Tabla N° 8 Valores del índice de criticidad por cada equipo.

EQUIPOS	Frecuencia de fallas	CONSECUENCIA ((IO*FO) +CM+ISAH)	INDICE DE CRITICIDAD
EQUIPO N.º 7			
Ventilador N.º 1	4	30	120
Ventilador N.º 2	3	18	54
Filtros	1	25	25
Persianas de cierre	1	10	10
Serpentina de enfriamiento	2	10	20
EQUIPO N.º 8			
Ventilador N.º 1	4	28	112
Ventilador N.º 2	3	28	84
Filtros	1	10	10
Persianas de cierre	1	5	5
GRUPO N.º 9			
Ventilador N.º 1	4	20	80
Ventilador N.º 2	3	20	60
Banco de filtros	1	11	11
Batería de calefactor	1	5	5
Persianas de cierre	1	6	6
Serpentina de enfriamiento	2	5	10
GRUPO N.º 10			
Ventilador 1	2	10	20
UNIDAD DE ENFRIAMIENTO (CHILLER)			
Compresores	1	10	10
Bombas	4	13	52
válvulas	2	2	4
SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO			
Compresor N.º 1	1	9	9
Compresor N.º 2	1	9	9
válvulas	1	9	9
Tanque de reserva	1	5	5

Fuente: Elaborado por el autor

d) Cuarto procedimiento, se realiza la matriz de criticidad para designar a cada equipo según su puntuación en críticos, semicríticos y no críticos; según se ve en la *figura 12 y 13*.



Figura 12.- Resolución de matriz de criticidad
Fuente: capítulo II del trabajo.

$C \geq 120$	$40 \leq C < 120$	$C < 40$
si	si	si
CRÍTICO	SEMI-CRÍTICO	NO CRÍTICO

Figura13.- Valores de los índices de criticidad.
Fuente: capítulo II.

e) La designación de los equipos se realiza en la *Tabla N° 9*.

Tabla N°9 Determinación de equipos críticos.

EQUIPOS	FRECUCENCIA DE FALLAS	INDICE DE CRITICIDAD	DETERMINACION
EQUIPO N.º 7			
Ventilador N.º 1	4	120	C
Ventilador N.º 2	3	54	SC
Filtros	1	25	NC

Persianas de cierre	1	10	NC
Serpentina de enfriamiento	2	20	NC
EQUIPO N.º 8			
Ventilador N.º 1	4	112	C
Ventilador N.º 2	3	84	SC
Filtros	1	10	NC
Persianas de cierre	1	5	NC
GRUPO N.º 9			
Ventilador N.º 1	4	80	SC
Ventilador N.º 2	3	60	SC
Banco de filtros	1	11	NC
Batería de calefactor	1	5	NC
Persianas de cierre	1	6	NC
Serpentina de enfriamiento	2	10	NC
GRUPO N.º 10			
Ventilador 1	2	20	NC
UNIDAD DE ENFRIAMIENTO (CHILLER)			
Compresores	1	10	NC
Bombas	4	52	SC
válvulas	2	4	NC
SUBSISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO			
Compresor N.º 1	1	9	NC
Compresor N.º 2	1	9	NC
Válvulas	1	9	NC
Tanque de reserva	1	5	NC

Fuente: Elaborado por el autor.

- f) Quinto y último paso es la designación del equipo más crítico para su respectiva evaluación de RCM, según el diagrama de Pareto (ver figura 14).

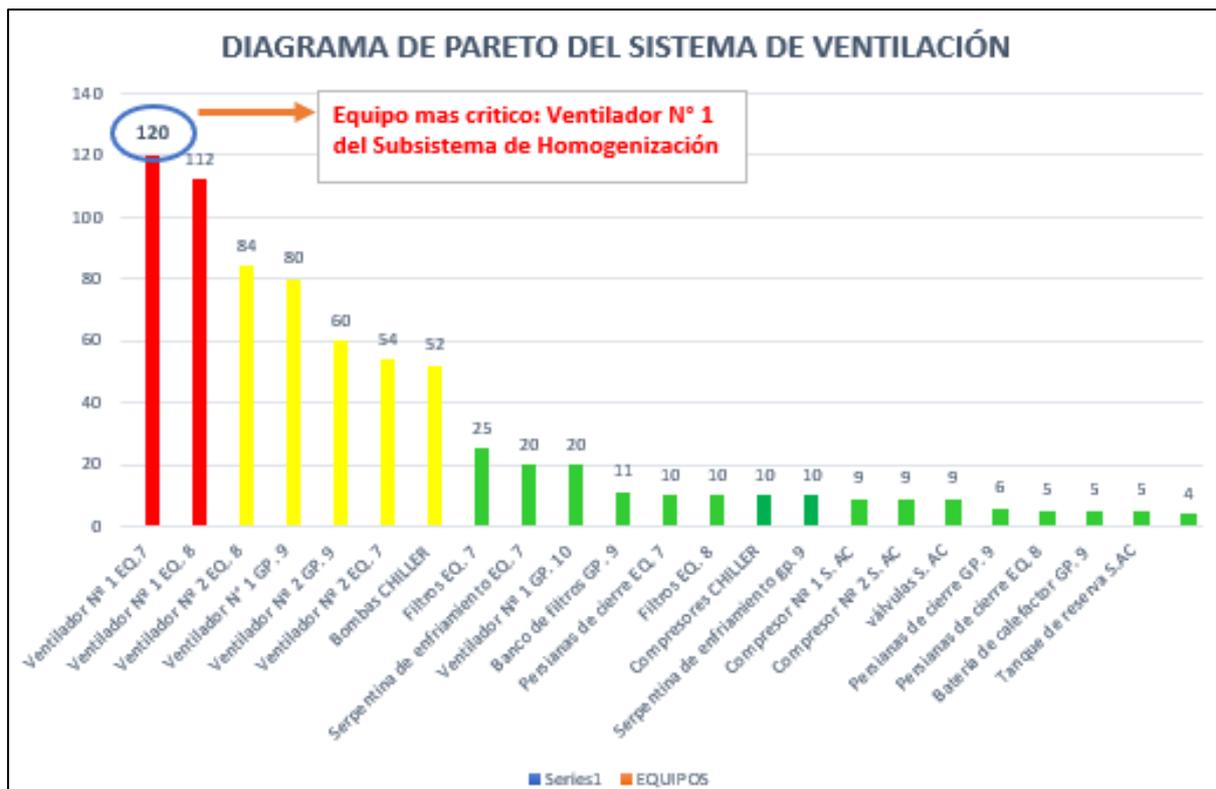


Figura 14.- Diagrama de Pareto de los equipos del sistema de ventilación.
Fuente: Elaborado por el autor.

g) Según los resultados del análisis de criticidad a los equipos del sistema de ventilación, el equipo más crítico es el Ventilador N°1 del Subsistema de homogenización Equipo N°7. La aplicación del RCM y el desarrollo del trabajo en las etapas posteriores será aplicado al Subsistema de ventilación: Equipo N° 7- Homogenización.

2.6 ETAPA 3: ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLAS (AMEF).

En esta etapa del trabajo se analizan y evalúan las funciones y fallas funcionales del subsistema de ventilación: Equipo N°7 – Homogenización, donde se ubica el equipo más crítico, para determinar sus modos y efectos de falla.

La evaluación de estos parámetros se realizará utilizando el formato del documento AMEF, que será elaborado para cada componente.

Tabla N° 10 AMEF – Subsistema de homogenización- Ventilador N.º 1.

Hoja de Información RCM	Sistema: VENTILACION DEL REACTOR					Responsable :	Hoja N°.
	Subsistema: EQUIPO N°. 7 - Homogenización					Fecha:	De:
	Elemento: Ventilador N°. 1						
Función	Falla Funcional (Pérdida de Función)		Modo de Falla (Causa de la Falla)		Efecto de Falla (Que sucede cuando se produce la falla)		
1	Acondicionar el aire al Recinto del Reactor a 333.3 m ³ /min	A	No acondiciona el aire del recinto del Reactor	1	No pasa de arranque a marcha el equipo	Activación de alarma de falla en el tablero de sala de control. No se enciende la ventilación genera aumento de temperatura dentro del Reactor.	
				2	Error en la posición de las persianas de descarga	No se activa las persianas. Emisión de alarma por posición incorrecta de persianas. Incremento de temperatura en el recinto, daño de equipos electrónicos.	
		B	La remoción de aire es menor a 333.3 m ³ /min	1	Falla en el suministro de fuerza	No se enciende las luces de habilitación en el tablero de sala de control, no se puede encender el sistema de ventilación, no se puede operar el Reactor.	
				2	Obstrucción de aire en las rejillas	Sonido y vibración a la salida. No deja pasar el total de aire a través de ellas, reducción del caudal de aire y el número de renovaciones de aire.	
2	Impulsar aire a través del serpentín de enfriamiento	A	No impulsa aire a través del serpentín de enfriamiento	1	compresores de aire apagados	Emisión de alarma por parada de emergencia de los compresores. No se reduce la temperatura del aire, aumento de la humedad, deterioro de equipos electrónicos.	
				2	Motor del ventilador fallando	Vibración y ruido en el motor del ventilador, sonido en las fajas, el aire que se inyecta al recinto del reactor no es acondicionado, no se puede realizar trabajos al interior.	
3	Mantener	A	Temperatura en	1	No está	Señal de habilitación del	

una temperatura máxima de 24°C en el Recinto del Reactor	el Recinto mayor a 24°C	habilitado el CHILLER	CHILLER apagado. Sensación de calor al interior del recinto, la duración de trabajos al interior es menor
		2 Las bombas del Chiller no están habilitadas	Bombas apagadas, tablero de habilitación apagado, el agua helada no ingresa hacia los ductos del Equipo N°7. Se detienen las tareas programadas al interior del recinto.

Fuente: Elaborado por el autor.

Tabla N° 11 AMEF – Subsistema de homogenización- CHILLER.

Hoja de Información RCM	Sistema: VENTILACION DEL REACTOR		Responsable	Hoja N°.
	Subsistema: EQUIPO N°. 7 – Homogenización		Fecha:	De:
	Elemento: UNIDAD ENFRIADORA CHILLER			
Función	Falla Funcional (Pérdida de Función)	Modo de Falla (Causa de la Falla)		Efecto de Falla (Que sucede cuando se produce la falla)
1 Enfriar el aire que circula en el Recinto del Reactor	A No enfría el aire del recinto del Reactor	1	CHILLER apagado	Señal de habilitación del CHILLER apagado. Sensación de calor al interior del recinto, la duración de trabajos al interior es menor.
		2	Válvulas de entrada y/o salida cerradas	Sonido de vibración en las válvulas, aumento de presión en las válvulas, no hay paso del agua fría del CHILLER hacia el Equipo N.º 7. No hay acondicionamiento del Recinto. Se anula el turno de operación.
	B El agua en las tuberías del serpentín no se mantiene fría	1	Válvulas de regulación averiadas	El caudal del agua fría que pasa a través de la tubería no es suficiente. Calentamiento de los componentes del sistema, condensación del agua del serpentín.
		2	Rápida condensación del agua del	Goteo de agua de la tubería del serpentín de enfriamiento hacia la

				serpentín	bandeja del Equipo N°7, manguera de purga obstruida. Filtración de agua por la base de la estructura, Derrame de agua alrededor del Equipo.
				3	Falta de revestimiento ARMAFLEX de la tubería Produce condensación del agua al exterior de las tuberías de alimentación, exposición de la tubería a corrosión, reducción de la eficiencia del Chiller, aumento de la temperatura de ingreso al serpentín.
2	Mantener la humedad en el Reactor máximo en 38 %	A	Humedad mayor al 38 %	1	Sensor de humedad Relativa averiado No emite señal por exceso de humedad, no hay un control de la humedad del aire del Reactor, deterioro de componentes electrónicos instalados en el Reactor.
				2	Grupo N° 9 apagado Reducida recirculación del aire, disminución de las renovaciones de aire. Daño y reducción de la eficiencia de los filtros de carbón activado.
3	Mantener una temperatura a máxima de 24°C en el Recinto del Reactor	A	Temperatura en el Recinto mayor a 24°C	1	No está habilitado el CHILLER Señal de habilitación del CHILLER apagado. Sensación de calor al interior del recinto, la duración de trabajos al interior es menor
				2	Las bombas del Chiller no están habilitadas Bombas apagadas, tablero de habilitación apagado, el agua helada no ingresa hacia los ductos del Equipo N°7. Se detienen las tareas programadas al interior del recinto.

Fuente. Elaborado por el autor.

2.7 ETAPA 4: APLICACIÓN DEL MANTENIMIENTO BASADO EN RCM. PROPUESTA DEL PROGRAMA DE MANTENIMIENTO.

En base a los documentos desarrollados, y con la información del AMEF que nos muestra las fallas más comunes, causas y consecuencias de los equipos más críticos, se elabora la propuesta del Programa de mantenimiento para el Subsistema más crítico, La frecuencia del mantenimiento se da en horas en base a las horas de operación de los equipos, para el nuevo programa se ha aumentado la frecuencia de mantenimiento. Tal como se muestra en la *Tabla N.º 12*.

Tabla N°12. Propuesta del Programa de Mantenimiento.

PROGRAMA DE MANTENIMIENTO DEL EQUIPO N.º7: HOMOGENIZACION			
TAREA	FRECUENCIA	REALIZADO	TAREA DE MANT.
1. SISTEMA DE ACCIONAMIENTO - FUNCIONAMIENTO			
Revisión del tablero eléctrico	168 HRS	Electricista	SA-01
Prueba del sistema de fuerza	168 HRS	Electricista	SA-02
Meghado del motor	8700 HRS	Electricista	SA-03
Revisión y/o cambio de la manguera de aire de las persianas	504 HRS	Mecánico	SA-04
Revisión del tablero neumático	2000 HRS	Mecánico	SA-05
Limpieza de las Rejillas de salida de aire	672 HRS	Mecánico	SA-06
Limpieza de rejillas entrada de aire	672 HRS	Mecánico	SA-07
Limpieza de filtros	2000 HRS	Mecánico	SA-08
Limpieza y/o cambio de la salida de purga	2000 HRS	Mecánico	SA-09
Medición de vibración en los rodamientos de las bombas.	8700 HRS	Predictivo	SA-10
Revisión de los sensores de giro, temperatura y humedad.	672 HRS	Preventivo	SA-11
Lubricación e inspección de la bomba	2000 HRS	Preventivo	SA-12
2. UNIDAD DE ENFRIAMIENTO – CHILLER			
Revisión del tablero de control	4000 HRS	Electricista	UE-01
Revisión de las válvulas de las tuberías	1500 HRS	Preventivo	UE-02

Lubricación de válvulas	4000 HRS	Mecánico	UE-03
Cambio de aceite	8700 HRS	Mecánico	UE-04
Revisión y/o cambio del revestimiento de las tuberías de agua fría	6000 HRS	Correctivo	UE-05
Revisión del nivel de refrigerante	168 HRS	Operador	UE-06
Inspección y revisión de motores	168 HRS	Mecánico	UE-07
Meghado de los motores	8700 HRS	Predictivo	UE-08
Medición de vibración en los rodamientos de las bombas.	8700 HRS	Predictivo	UE-09

Fuente: Elaborado por El autor.

Con la implementación del nuevo Programa de mantenimiento se estima una mejora en la Disponibilidad operacional del sistema de Ventilación.

CONCLUSIONES

1. Según el análisis de criticidad realizado a todos los equipos de cada Subsistema que conforma el Sistema de ventilación del Reactor RP-10, Se obtiene:
 - a. El Ventilador N°.1 del Subsistema de Homogenización es el equipo más crítico, con un índice de Criticidad de 120. Seguido del Ventilador N.º1 del Equipo 8.
 - b. 5 equipos semicríticos y 16 No críticos, cada uno perteneciente a los subsistemas restantes, lo que nos muestra la situación actual del sistema de ventilación.
2. El equipo principal más crítico del Equipo N° 7 es el ventilador N.º1, pero estando este ubicado dentro de una estructura del Equipo N.º7 se decide aplicar la metodología del RCM al Ventilador y a la unidad de Enfriamiento que se encuentran directamente relacionados.
3. La disponibilidad operacional inicial antes de cualquier implementación es del 84%, con este nuevo plan se busca mejorar la disponibilidad a un valor mayor al 92 %, para ello se debe reducir a 2 el número de paradas del sistema en operación normal.
4. La propuesta del programa de mantenimiento debe ser implementada al equipo más crítico del sistema de ventilación para aumentar su disponibilidad y por consecuente reducir el costo del mantenimiento, favoreciendo la productividad.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda seguir el procedimiento del mantenimiento centrado en confiabilidad al segundo equipo crítico que es el ventilador del Equipo N° 8, por su alto índice de criticidad según el cuadro de análisis de criticidad. Para aumentar también su disponibilidad.
2. Se recomienda que adicional a las tareas de mantenimiento establecidas para el Mantenimiento del sistema de ventilación se debe realizar y estudiar la probabilidad de automatizar el sistema de ventilación tanto para la operación normal y en emergencia, además de diseñar una nueva bandeja donde se almacena el agua condensada del Equipo N.º 7 dado los problemas de fuga de agua existentes.
3. Se debe llevar un control mensual de la disponibilidad operacional de los equipos, para evitar que este parámetro disminuya su valor. Así como registrar toda falla y tarea nueva realizada a los equipos.
4. Se recomienda el levantamiento de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad para la parte eléctrica, y así tener un plan de mantenimiento eficiente para la instalación.
5. Se recomienda continuar con el análisis de equipos y realizar pruebas periódicas como: prueba de la tasa de fuga del Recinto del Reactor, Medición de la eficiencia de los filtros, Prueba en vacío de los motoventiladores.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Mora Gutiérrez, A. (2009) *Mantenimiento Planeación, ejecución y control*. Editorial Alfaomega.
- [2] Campos Barrientos, Jorge. (2015) *Mantenimiento basado en la confiabilidad*. Tecsup. Lima, 2014.
- [3] Santiago García G. (2013) *Ingeniería de Mantenimiento*.
- [4] Moubray IV, Jhon Mitchell. 2004. *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*. España : Aladon LLC, 2004.
- [5] Parra Márquez, Carlos Alberto. 2007. *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)*. España : Igeman, 2007.
- [6] Informe de Análisis de Seguridad IAS Capitulo 10: Sistemas auxiliares, INSTITUTO PERUANO DE ENERGIA NUCLEAR IPEN, Lima.
- [7] Soto Baltazar J. (2016). *Mantenimiento basado en la confiabilidad para el mejoramiento de la disponibilidad mecánica de los volquetes FAW en GYM S.A.* Tesis de grado, Perú. Universidad Nacional del Centro del Perú, en sus conclusiones manifiesta:
- [8] Esteban de la Cruz E. (2017). *Mantenimiento centrado en confiabilidad para el equipo más crítico del área de molienda de Clinker en planta Atocongo – lima*. Tesis de grado, Perú.
- [9] Milanese Negro, C. (2013) *Diseño de un plan preventivo basado en el mantenimiento centrado en la confiabilidad en la Maquina papelera*. Informe de pasantía. Venezuela. Universidad Simón Bolívar.
- [10] Aguiar Guzmán, L. (2014) *Análisis de modos y efectos de falla para mejorar la disponibilidad operacional en la línea de producción de gaseosas N°3*. Trabajo de Grado. Colombia. Universidad Libre de Colombia.