

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DESARROLLO DE UN MODELO DE GESTIÓN DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL

TUTOR ACADÉMICO: Ing. José L. Perera.

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Carlos A. Parra .

SUPERVISOR: Ing. José L. Kum

ASESORES:

- Ing. Alberto S. Windmüller.
- Ing. Ricardo F. Palma.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
para optar por el Título de
Ingeniero Mecánico
Por el Br. López A. Rolando A.

Caracas, 2001

López A. Rolando A.

DESARROLLO DE UN MODELO DE GESTIÓN DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL

Tutor Académico: Prof. José L. Perera. Tutor Industrial: Ing. Carlos Parra.

Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Mecánica.

2001, n° pag. 74

Palabras Claves: Confiabilidad, Disponibilidad, Gestión, Índices, Riesgo.

RESUMEN

El objetivo fundamental de este trabajo, fue desarrollar un modelo de gestión de confiabilidad operacional que involucre herramientas técnicas de confiabilidad y herramientas de desarrollo organizacional, con el fin de generar planes y programas optimizados de mantenimiento. Este proyecto surge de la necesidad de maximizar el aprovechamiento de las herramientas de confiabilidad que actualmente se aplican en las diversas áreas de PDVSA. La primera fase consistió en la estructuración de una metodología sistemática para el proceso de gestión, luego se seleccionaron los índices básicos a considerar en el proceso de evaluación de la gestión y se definieron los modelos matemáticos que se ajustan a los comportamientos de estos índices bajo condiciones específicas. Finalmente se desarrolló un programa que permite la estimación sistemática de los índices seleccionados. La aplicación de este modelo de gestión también trae consigo el seguimiento y análisis continuo del estado de los componentes de los sistemas y su ciclo de vida útil.

DEDICATORIA

Este trabajo que representa el crepúsculo de mi carrera de pregrado y el alba de mi vida profesional, lo dedico con sentimiento profundo:

A mis viejos *Saturno* y *Justina*, quienes sembraron en mí los tres factores esenciales para alcanzar mis metas: Honestidad, Verdad y Amor.

A mis hermanos *Ramón*, *Diana*, *Orlando* y *Josefina*, quienes han sido mi apoyo en horas difíciles y en horas de sonrisas.

A mis sobrinos *Romny*, *Gustavo*, *Jesús* y *Oriana* a quienes deseo dejar este humilde legado.

A mi novia *Maybeth*, quien con una pizca de su cariño me motivó a superar mis retos.

A todos aquellos ideales por los que seguiré luchando hasta el ocaso de mis días.

Rolando López

AGRADECIMIENTOS

Agradezco con sinceridad a todos aquellos que de una forma u otra fueron elemento esencial en la realización de este trabajo:

A *Dios* quien ha estado presente en mí, desde los inicios de mi carrera.

A la *U.C.V.* por permitir mi desarrollo como futuro ingeniero y formar parte de ella.

A *INTEVEP*, por brindarme la oportunidad de tener una valiosa experiencia y permitirme culminar la etapa final de mi carrera.

A mi tutor académico *José Luis Perera*, quien me ayudó en todo momento.

A mi tutor industrial *Carlos Parra*, quien me transmitió su experiencia y me aportó sus valiosos conocimientos para la realización de este trabajo.

A mis asesores *José Luis Kum*, *Alberto Windmüller* y *Ricardo Palma* quienes me prestaron su apoyo y aportaron importantes ideas durante curso del trabajo.

A todos Mil Gracias

Rolando López.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
LISTA DE ANEXOS	x
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE CONFIABILIDAD

1.1	Antecedentes	3
1.2	Influencia de la Confiabilidad Operacional dentro del proceso de gestión de activos clase mundial	6
1.3	Gestión de activos clase mundial	7
1.4	Gestión de confiabilidad operacional	10

CAPÍTULO II

MODELO PROPUESTO DE GESTIÓN DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL

2.1	Definición del activo, evaluación del estado actual y detección de oportunidades	15
2.2	Asignación de recursos humanos y económicos para el desarrollo del plan de confiabilidad operacional	16
2.3	Formación de equipos naturales de trabajo	17
2.4	Jerarquización de sistemas y/o equipos; antecedentes; contexto operacional	17
2.5	Estrategia de aplicación de las herramientas técnicas de confiabilidad operacional	18

2.6	Evaluación costo riesgo beneficio	20
2.7	Generación de planes y programas	21
2.8	Insumo para otras gerencias	21
2.9	Implantación, delegación de responsabilidades, control y evaluación de resultados	22
2.10	Actualización	23

CAPÍTULO III

HERRAMIENTAS DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL

3.1	Herramientas de desarrollo organizacional	24
3.2	Herramientas técnicas	25
3.2.1	Generalidades de las herramientas técnicas	26
3.2.1.1	<i>MCC</i> : Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad	26
3.2.1.2	<i>IBR</i> : Inspección Basada en Riesgos	30
3.2.1.3	<i>AC</i> : Análisis de Criticidad	33
3.2.1.4	<i>ACR</i> : Análisis de Causa Raíz	34
3.2.1.5	<i>ACRB</i> : Análisis de Costo Riesgo Beneficio	36

CAPÍTULO IV

ÍNDICES BÁSICOS DE EVALUACIÓN

4.1	Instrumento para estimar índices básicos de evaluación	44
4.1.1	Estimación de la confiabilidad del activo	45
4.1.1.1	Confiabilidad según la distribución de Weibull	45
4.1.1.2	Confiabilidad según la distribución exponencial	47
4.1.1.3	Confiabilidad según la distribución Log-Normal	48
4.1.2	Estimación de la confiabilidad de los sistemas	50
4.1.2.1	Configuración en serie	50
4.1.2.2	Configuración en paralelo (con todos los equipos activos)	51
4.1.2.3	Configuración en paralelo (con un componente en standby)	51
4.1.3	Estimación de la disponibilidad del activo	52

4.1.4 Estimación de la disponibilidad de los sistemas	53
4.1.5 Estimación de los tiempos promedios básicos del activo	54

CAPÍTULO V

ANÁLISIS SISTEMÁTICO PARA LA ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE CONFIABILIDAD Y DISPONIBILIDAD.

(Manual para el uso del programa Icd2000)

5.1	Entrada al programa Icd2000	55
5.2	Archivo CONDISMAN 001.xls	56
5.2.1	Ingreso de datos a CONDISMAN 001.xls	57
5.2.2	Resultados de CONDISMAN 001.xls	59
5.2.2.1	Área de resultados por equipo	59
5.2.2.2	Área de resultados por componentes	61
5.3	Archivo CONDISMAN 002.xls	62
5.3.1	Ingreso de datos a CONDISMAN 002.xls	63
5.3.2	Resultados de CONDISMAN 002.xls	64
5.3.2.1	Área de resultados por equipo	65
5.3.2.2	Área de resultados por componentes	66
5.4	Archivo CONDISMAN 003.xls	67
5.4.1	Ingreso de datos y obtención de resultados en CONDISMAN 003.xls	68
	CONCLUSIONES	70
	RECOMENDACIONES	71
	BIBLIOGRAFÍA	73
	ANEXOS	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Nº		
1	Objetivos de una gestión de activos clase mundial	8
2	Factores que intervienen en una gestión de activos	10
3	Parámetros de gestión de confiabilidad	10
4	Parámetros de gestión de confiabilidad	11
5	Proceso de jerarquización	15
6	Jerarquización de sistemas y/o equipos	17
7	Modelo de Criticidad	18
8	Estrategias de aplicación de herramientas técnicas	19
9	Uso de los APT en la aplicación de un ACRB	20
10	Proceso de implantación, evaluación y control	22
11	Influencia de las herramientas sobre los cuatro parámetros de confiabilidad operacional	24
12	Complejión de un equipo natural de trabajo	27
13	Pasos que debe seguir un equipo natural de trabajo en MCC	28
14	Pasos en el análisis de MCC	28
15	Árbol de decisiones	29
16	Hoja de decisiones	30
17	Pasos que debe seguir un equipo natural de trabajo en IBR	31
18	Matriz de riesgos	32
19	Pasos que debe seguir un equipo natural de trabajo en AC	33
20	Matriz de criticidad	34
21	Pasos que debe seguir un equipo natural de trabajo en ACR	35
22	Análisis del problema	35
23	Pasos que debe seguir un equipo natural de trabajo en ACRB	36
24	Limitación por datos históricos	36
25	Intervalo óptimo	38
26	Curva típica APT Maintenance	38

27	Curva típica APT Inspection	39
28	Resultados típicos APT Project	39
29	Resultados típicos APT Spare	40
30	Proceso de análisis de ACBR	40
31	Apoyo de los APT para otras metodologías	41
32	Carpeta Icd2000 con el contenido de archivos .xls	56
33	Ventana de inicio a CONDISMAN 001.xls	56
34-a	Entrada de datos	57
34-b	Entrada de datos	58
34-c	Entrada de datos	58
35	Opción de cálculo breve de confiabilidad en forma puntual	59
36	Resultados de CONDISMAN 001 por equipo	60
37	Gráfica de confiabilidad vs tiempo	60
38	Gráfica de TFS vs N° de eventos	60
39	Resultados por componentes	61
40	Ventana de inicio a CONDISMAN 002.xls	62
41-a	Entrada de datos	63
41-b	Entrada de datos	64
41-b	Entrada de datos	64
42	Resultados de CONDISMAN 002 por equipo	65
43	Gráfica de confiabilidad vs tiempo	65
44	Gráfica de TFS vs N° de eventos	66
45	Resultados por componentes	66
46	Ventana de inicio a CONDISMAN 003.xls	68
47	Cálculo de sistema en serie	68
48	Cálculo de sistema en paralelo (todos los componentes activos)	69
49	Cálculo de sistema en paralelo (con un componente en standby)	69

LISTA DE ANEXOS

- A** Datos recopilados y análisis de resultados de la planta compresora Jusepín 6 en el Estado Monagas.
- B** Resumen de fórmulas y curvas usadas para el desarrollo del programa Icd 2000.
- C** Generalidades sobre la teoría de Confiabilidad.

INTRODUCCIÓN

A través de los años la globalización ha llevado a grandes cambios estructurales en el sistema de gerencia del mundo empresarial y uno de los mecanismos para efectuar notables transformaciones fue el enfoque hacia las probabilidades de fallas dentro del sistema. Cada día se hace más exigente los niveles de producción, calidad, demanda, seguridad, ambiente, mantenimiento; induciendo de esta forma la competencia en la economía global y manteniendo a las empresas bajo una intensiva presión por reducir costos. Es por ello que la industria debe ir sobre la marcha de estos desarrollos.

En el ámbito mundial se ha observado que muchas compañías han aplicado nuevas técnicas y estrategias en la búsqueda de una cultura de confiabilidad mejorando de esta forma sus gestiones. Básicamente todas las compañías están centrando sus esfuerzos sobre la manera de dirigir sus prácticas de mantenimiento; específicamente se preguntan: ¿Qué podemos hacer para disminuir los costos de mantenimiento?, ¿Cómo podemos aumentar los tiempos entre fallas?, ¿Cómo garantizar seguridad, calidad, productividad? y orientando sus gestiones en forma distinta de las tradicionales, logran aumentar sus niveles de capacidad.

En Venezuela ya comienzan a aplicarse técnicas para aumentar la probabilidad del buen funcionamiento de los sistemas (confiabilidad) como una alternativa para el mejoramiento de las gestiones empresariales. Sin embargo, aún la cultura de confiabilidad dentro del ámbito empresarial venezolano no se ha desarrollado en forma plena. En PDVSA, ya se han comenzado a aplicar herramientas técnicas de confiabilidad y los resultados han sido satisfactorios.

Por todo lo expuesto anteriormente surge la iniciativa del presente trabajo, el cual consiste el desarrollo de un Modelo para optimizar el proceso de Gestión de Confiabilidad Operacional con la visión de alcanzar una gestión de mantenimiento optimizado conocido como Gestión de Activo Clase Mundial.

El nuevo enfoque que presenta este trabajo sobre estrategias para ejecutar una gestión de confiabilidad operacional, permite el uso simultáneo de las distintas metodologías (Inspección Basada en Riesgo IBR, Mantenimiento Centrado en Confiabilidad MCC, Análisis de Causa Raíz ACR, Análisis de Criticidad AC y Análisis de Costo Riesgo Beneficio ACRB) dentro del mismo ámbito y donde la información extraída de cada una de ellas sirve como insumo a las demás; adicionalmente permite evaluar la gestión técnica de confiabilidad a través de índices básicos.

El trabajo se inicia con una introducción a la teoría de confiabilidad (Capítulo I), donde se describen los antecedentes más notables a través de la historia, luego se presentan un conjunto de nociones preliminares que permiten visualizar de una manera holística el concepto de Gestión de Activos Clase Mundial y la influencia que posee una gestión de Confiabilidad Operacional dentro del mismo.

Una vez descrito el ámbito que envuelve el concepto de confiabilidad, se presenta el modelo propuesto de confiabilidad operacional (Capítulo II), donde se describen de manera práctica y sucinta las diferentes fases del proceso de gestión de confiabilidad operacional.

Posteriormente se describen las diversas herramientas de confiabilidad operacional (Capítulo III), con la finalidad de dar una visión más detallada del uso de las mismas en el proceso de gestión contenido dentro del modelo propuesto.

Seguidamente se presenta una breve explicación sobre la teoría y las bases matemáticas utilizadas en la determinación de los índices básicos de evaluación (Capítulo IV), permitiendo de esta forma visualizar los principios que sustentan todas las herramientas usadas en el diseño del programa Icd2000 para el cálculo de índices de confiabilidad operacional (Confiabilidad, Disponibilidad).

Finalmente se muestra un manual para el uso del programa Icd200 (Capítulo V), en el cual se dan los detalles para el uso eficiente del mismo.

CAPÍTULO I

Las grandes obras no ocurren por impulso, son una serie de pequeños pasos que hacen el conjunto...

Van Gogh

1.- INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE CONFIABILIDAD

1.1.- ANTECEDENTES

Los primeros pasos en la cuantificación de la confiabilidad se iniciaron en la industria aeronáutica. A partir de la Primera Guerra Mundial, el número de tráfico aéreo y caídas de aviones se incrementó, surgieron entonces los criterios de confiabilidad y seguridad orientados hacia el mejoramiento de la eficiencia de los equipos.

Durante la Segunda Guerra Mundial surgió la necesidad de una respuesta a rápidos desarrollos tecnológicos y la gran exigencia sobre el funcionamiento de los equipos bélicos; por tal causa comenzaron a desarrollarse técnicas de confiabilidad en el ámbito de los circuitos eléctricos y áreas de la electrónica.

Los primeros análisis sistemáticos de confiabilidad fueron realizados por el alemán Werner Von Braun quien manifestó la iniciativa de mejorar la eficacia de los cohetes V-1 cuya primera serie resultó totalmente desconfiable. Estudió entonces las causas de las fallas y ajustó sus resultados en modelos con diseños mejorados.

Una anécdota relevante en este período tuvo lugar cuando el grupo de investigadores encabezado por Werner Von Braun, consultó acerca de la problemática de los cohetes V-1 con Robert Lusser, un matemático inglés quien respondió con la famosa frase: *“No existe cadena alguna que sea más fuerte que el más débil de sus eslabones”*. Con esto, él se refería a que la metodología usada no era aplicable sobre un sistema en serie

con componentes que presentaban fallas aleatorias. Lusser desarrolló entonces la ley de la confiabilidad de los componentes en serie la cual se enuncia como: *“la confiabilidad de un sistema cuyos componentes están dispuestos en serie, es igual al producto de las confiabilidades de cada uno de ellos”*.

Por otra parte, durante este período también se presentaron progresos notables a través de los procesos de endurecimiento de superficies de cigüeñales y árboles de levas, avances donde los diseños se orientaron hacia la accesibilidad para mantenimiento, proporción de planes, técnicas, planificaciones del mantenimiento preventivo, planes de inspección, cartas de control para herramientas de máquinas de alta producción, etc. Esto marcó la entrada de la ingeniería industrial en el campo y nuevas técnicas estadísticas asociadas.

Al final de la Segunda Guerra Mundial, continuaron evolucionando los estudios de confiabilidad cuyo impulso fue la guerra fría, la carrera espacial y el desarrollo de la industria nuclear.

En la década de los 50 ya se empezó a estudiar la confiabilidad en el campo computacional, reactores nucleares y aeromodelismo; se le otorgó un papel preponderante a la seguridad, se dió inicio a los análisis de confiabilidad al nivel de componentes basada en tasa de fallas, esperanza de vida útil, eficiencia del plan y predicción de fallas.

También en este período se unieron esfuerzos para estudiar y corregir errores humanos que contribuyen a la falla de los sistemas. Una de las primeras estimaciones de la influencia del factor humano se elaboró en los laboratorios de Sandia en 1952, a través de un estudio clasificado sobre un avión con sistemas de arma nuclear.

En los años 60 el concepto de confiabilidad alcanzó el área de la industria misilística. Es en este período donde se presentó la mayor necesidad de nuevas técnicas de confiabilidad y las más vastas aplicaciones especializadas.

Se extendió el análisis del comportamiento de los componentes, discriminando los sistemas como mecánicos, eléctricos e hidráulicos y se hizo énfasis en los efectos que las fallas de dichos componentes producían sobre el sistema al cual integraban. La era de los proyectiles intercontinentales junto a los proyectos y programas subsecuentes tales como Mercurio y Géminis, aceleraron la búsqueda del éxito a través del mejoramiento continuo.

Se desarrollaron sistemas de análisis utilizando diagramas de bloques y un extenso número de modelos exitosos para el logro de las metas trazadas en seguridad y Confiabilidad.

Con la creciente complejidad de diagramas de bloques más sofisticados, surgió en 1961 el concepto de *análisis de árbol de fallas* originado por H. A. Watson como un plan para analizar la seguridad del sistema de control de un contador de lanzamientos espaciales. Mas tarde la Boeing Company modifica este programa con el uso de computadoras.

En 1965, D.F. Haasl, desarrolló una técnica de construcción del árbol de fallas y esta nueva aplicación abarca una amplia gama de problemas concernientes a confiabilidad y seguridad industrial.

Además se desarrollaron estudios sobre la disponibilidad y la mantenibilidad para equipos individuales. En fin, en este período se presentan cambios notorios con la presencia de distinguidos matemáticos tales como Z.W. Birnbaum, R. Barlow, F. Proschan, J. Esary, y W. Weibull; llevando a cabo el desarrollo de técnicas estadísticas avanzadas y genéricas para el análisis de problemas de mantenibilidad y confiabilidad.

En los años 70 se profundizó el estudio de árboles de eventos, árboles de fallas, técnicas de análisis de riesgo – consecuencia y estas herramientas fueron aplicadas a diversas industrias, principalmente la de procesos químicos.

El desarrollo de los análisis de Confiabilidad avanzó hasta la década de los 80 con modelos estadísticos basados en tasa de fallas constantes, esto limitó el análisis de equipos cuya tendencia de fallas no presentara tal comportamiento.

A partir de los años 80 con el desarrollo computacional y el uso de software, se produjeron notables cambios en las técnicas de análisis de la confiabilidad, generando el mejoramiento de la misma con modelos estadísticos basados en tasa de fallas aleatorias, costos y riesgo.

Ya en la década de los 90 la Confiabilidad se convirtió en un concepto involucrado en industrias petroquímicas, industrias de procesos continuos y compañías de vanguardia. Estas han desarrollado aplicaciones particulares de técnicas de confiabilidad para la optimización de sus gestiones dando origen al concepto de *Confiabilidad Operacional*.

1.2.- INFLUENCIA DE LA CONFIABILIDAD OPERACIONAL DENTRO DEL PROCESO DE GESTIÓN DE ACTIVOS CLASE MUNDIAL

A menudo cuando se escucha el término *Confiabilidad*, se establece un enfoque hacia “*Probabilidad de que una planta, sistema, equipo o componente; opere sin presencia de fallas durante un intervalo de tiempo dado y bajo condiciones específicas*”.

En esencia, no es incorrecto centrarse en este concepto, sin embargo la confiabilidad engloba un área mucho más extensa dentro el campo empresarial; abarcando de esta manera al ámbito estadístico, al recurso humano, a los procesos; a las metodologías de diseño, al ensamblaje, al mantenimiento; entre otros.

Un mejoramiento de la confiabilidad puede ser inducido por: un mejoramiento de la mantenibilidad, una mejor capacitación del personal operativo, una mejor estrategia de ensamblaje, una mejor estrategia gerencial, un mejoramiento de diseño, etc.

A continuación se mostrará el entorno que involucra el concepto de la Confiabilidad.

1.3.- GESTIÓN DE ACTIVOS CLASE MUNDIAL

Con el transcurrir del tiempo, el ámbito empresarial ha experimentado la necesidad de mejorar sus prácticas operacionales, organizacionales y de mantenimiento con una visión de negocio. En la década de los 80, surgió en los países desarrollados la iniciativa de llevar a cabo diversas metodologías tales como: calidad (ISO), Mantenimiento productivo Total (MPT), Mantenimiento Predictivo y Costo Basado en Actividades (ABC); esto con la finalidad de generar ahorros en el campo financiero.

Esta iniciativa consistió en la búsqueda y selección en todo el mundo de aquellas herramientas que hasta entonces habían aportado notables beneficios, bien sea en el área de mantenimiento, de recurso humano, de control de calidad, de comercio, de seguridad, etc., lo cual garantizaba que se disponía de las herramientas y técnicas más eficaces a escala mundial. A este conjunto de prácticas se les adicionó la terminología de “*Clase Mundial*”, naciendo de esta forma la filosofía de *Gestión de Activos Clase Mundial*.

La *Gestión de Activos Clase Mundial* promueve la revisión continua y actualización de las mejores prácticas en el ámbito mundial ajustando las mismas al recurso humano, a los procesos y la tecnología. Además centra sus objetivos en facultar al personal en su desempeño a través del desarrollo de nuevas estrategias.

Por otra parte, la *Gestión de Activos Clase Mundial* establece una visión holística de negocio, al estructurar estrategias orientadas a la integración de los diversos entes que participan en la cadena de valores de los procesos. También da importancia a la tecnología de información como habilitador esencial para la integración de los mismos y asigna una ponderación a la planificación, como función del proceso gerencial.

Con la aplicación de la *Gestión de Activos Clase Mundial* se fomenta la identificación de oportunidades para el mejoramiento, generando cambios de paradigmas en los negocios, orientando y gerenciando los cambios planificados como un objetivo estratégico a través del desarrollo y educación permanente del personal.

Llegado a este nivel, se define a la **Gestión de Activos Clase Mundial** como *un conjunto de prácticas operacionales que agrupan elementos de índole organizacional orientadas bajo la Filosofía de Clase Mundial, que genera ahorros sustanciales dentro del ámbito de una corporación.*

Cuando se ejecutan prácticas bajo el concepto de Gestión de Clase Mundial, deben considerarse los objetivos que este tipo de oficio persigue; tales como: (véase Fig. 1)

- ✓ Establecer la excelencia de los procesos administrativos principales del sistema.
- ✓ Definir una alta calidad del producto.
- ✓ Elevar la rentabilidad del producto.
- ✓ Fundamentar la producción óptima del sistema.
- ✓ Producir la motivación del personal.
- ✓ Producir la satisfacción del cliente.
- ✓ Proveer la máxima confiabilidad, seguridad y protección ambiental, etc.

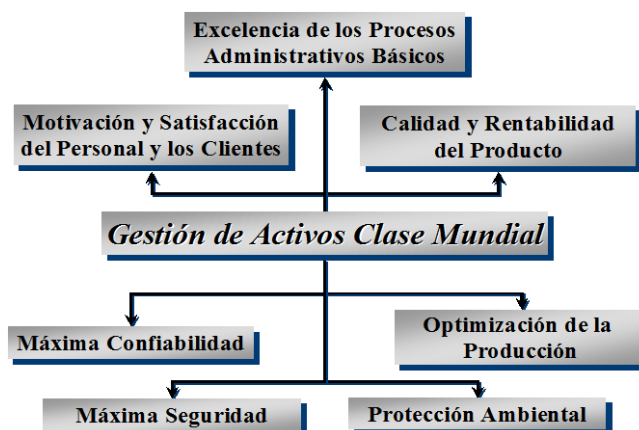


Fig. 1.- Objetivos de una Gestión de Activos Clase Mundial

Por otra parte, para poder orientar una gestión hacia la categoría de clase mundial, deben manejarse cuidadosamente algunos factores que influyen directamente en el desarrollo de la misma, entre los que se encuentran:

- ✓ La Calidad
- ✓ La Gestión de Procura y Materiales
- ✓ El Mantenimiento
- ✓ La Gerencia de Recursos Humanos
- ✓ La Investigación y El Desarrollo
- ✓ El Medio Ambiente
- ✓ La Salud y La Seguridad
- ✓ Las Operaciones y Los Procesos
- ✓ El ámbito Financiero
- ✓ ***La Confiabilidad Operacional,***

Dichos factores a través de una continua interacción establecen una estructura sistemática, que manejada con estrategias específicas inciden directamente sobre el ente que se desea gerenciar al cual se denominará *ACTIVO*.

Este trabajo está orientado hacia el análisis del proceso de optimización de la Gestión de Confiabilidad Operacional, como factor influyente en el proceso de Gestión de Activos Clase Mundial, sin olvidar que los factores restantes son de gran importancia para el logro del mismo.

1.4.-GESTIÓN DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL

Como se puede observar en la Fig. 2, la confiabilidad es uno de los factores que incide sobre la gerencia del activo y su efecto directo sobre el nivel de gestión, está vinculado a los efectos que se manifiestan en ella por la acción de los otros factores. A este nivel de aplicación se presenta como Confiabilidad Operacional.



Fig. 2.- Factores que intervienen en una Gestión de Activos Clase Mundial

A través de la Confiabilidad Operacional se pueden producir efectos en sectores como el Financiero, Calidad, Ambiente, Seguridad, Producción, Mantenimiento, Procesos y otros que su vez proporcionan cambios sobre la misma (véase Fig. 3).

Visto esto, la **Confiabilidad Operacional**, se define como “*la capacidad de una instalación o sistema (procesos, tecnología y personal), para cumplir su función dentro de sus límites de diseño y bajo un contexto operacional específico.*”

A partir de este concepto, un proceso de Gestión de Confiabilidad se basa en cuatro parámetros fundamentales: (véase Fig. 4)

- ✓ La **Confiabilidad Humana** que involucra “la parte blanda” de la empresa, es decir, la estructura organizacional de todo el

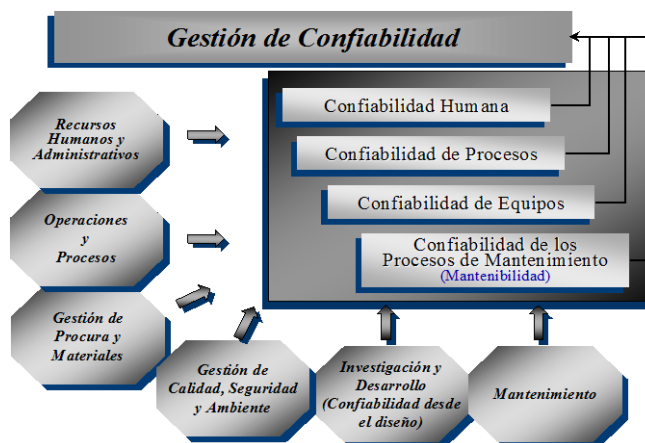


Fig. 3.- Parámetros de Gestión de Confiabilidad

personal, tipo de gerencia, cultura de la empresa, sistemas administrativos, etc.

- ✓ *La Confiabilidad de Procesos* que engloba todo lo concerniente a procedimientos, procesos y operaciones.
- ✓ *La Confiabilidad de Equipos* que se orienta hacia la confiabilidad desde su diseño, es decir, involucra el tipo de diseño, cambios del tipo de material, la forma y procedimientos del ensamblaje. Todo esto con la finalidad de un aumento del tiempo promedio entre fallas (TPEF).
- ✓ *La Confiabilidad de los Procesos de Mantenimiento (Mantenibilidad)* que se enfoca hacia el mantenimiento de los activos, las habilidades básicas que puede desarrollar el personal, la efectividad y calidad del mantenimiento y el tiempo promedio para reparar (TPPR).

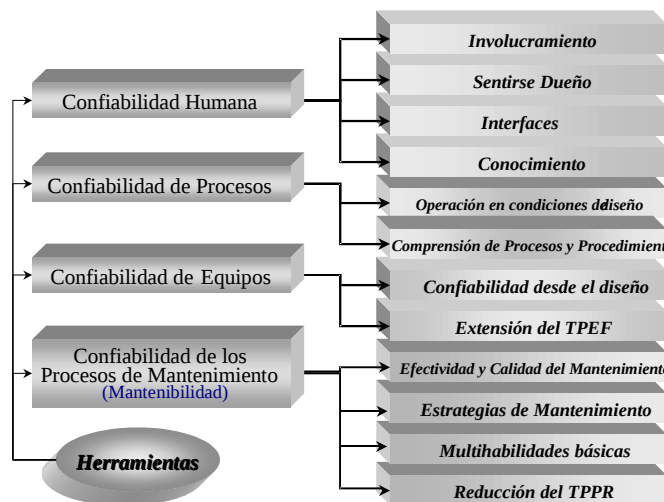


Fig. 4.- Parámetros de Gestión de Confiabilidad

Estos parámetros interactúan con áreas diversas como: Recursos Humanos y Administrativos; Operaciones y Procesos; Gestión de Procura y Materiales; Gestión de Calidad, Seguridad y Ambiente; Investigación y Desarrollo; Mantenimiento, etc.

Además de esta interacción, estos parámetros se pueden manipular a través de dos medios esenciales como fundamentos para el logro de una Gestión de Confiabilidad. Estos son representados a través de metodologías clasificadas como: **Herramientas Técnicas** y **Herramientas de Desarrollo Organizacional**.

La aplicación de herramientas técnicas se orienta hacia el área de plantas, sistemas, equipos y componentes; mientras la aplicación de herramientas de desarrollo organizacional, está orientada hacia el desarrollo y la capacitación del recurso humano.

CAPÍTULO II

Lo más importante no es dónde estamos, sino la dirección en que nos movemos.

Goethe.

2.- MODELO PROPUESTO DE GESTIÓN DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL

Cuando se alcanza el nivel adecuado en el uso y manejo de las herramientas de confiabilidad operacional, es necesario establecer un criterio de optimización para la aplicación de las mismas, logrando de esta manera una mayor efectividad y generando ahorros en el proceso de aplicación.

Modelar la Gestión de Confiabilidad Operacional, permite orientar sistemáticamente el desarrollo de un proceso para la generación de planes y programas con visión de negocio. Sin embargo, es de capital importancia que en todo momento interactúen las herramientas técnicas con las herramientas de desarrollo organizacional, para garantizar la incidencia del modelo sobre todo el ámbito de la empresa.

A continuación se describirá el modelo propuesto para la optimización del proceso de Gestión de Confiabilidad Operacional, el cual está estructurado en diez etapas donde se aplican las herramientas técnicas y de desarrollo organizacional. Posteriormente se dará una explicación de cada una, con el fin de ilustrar de forma más detallada la estructura del proceso de gestión.

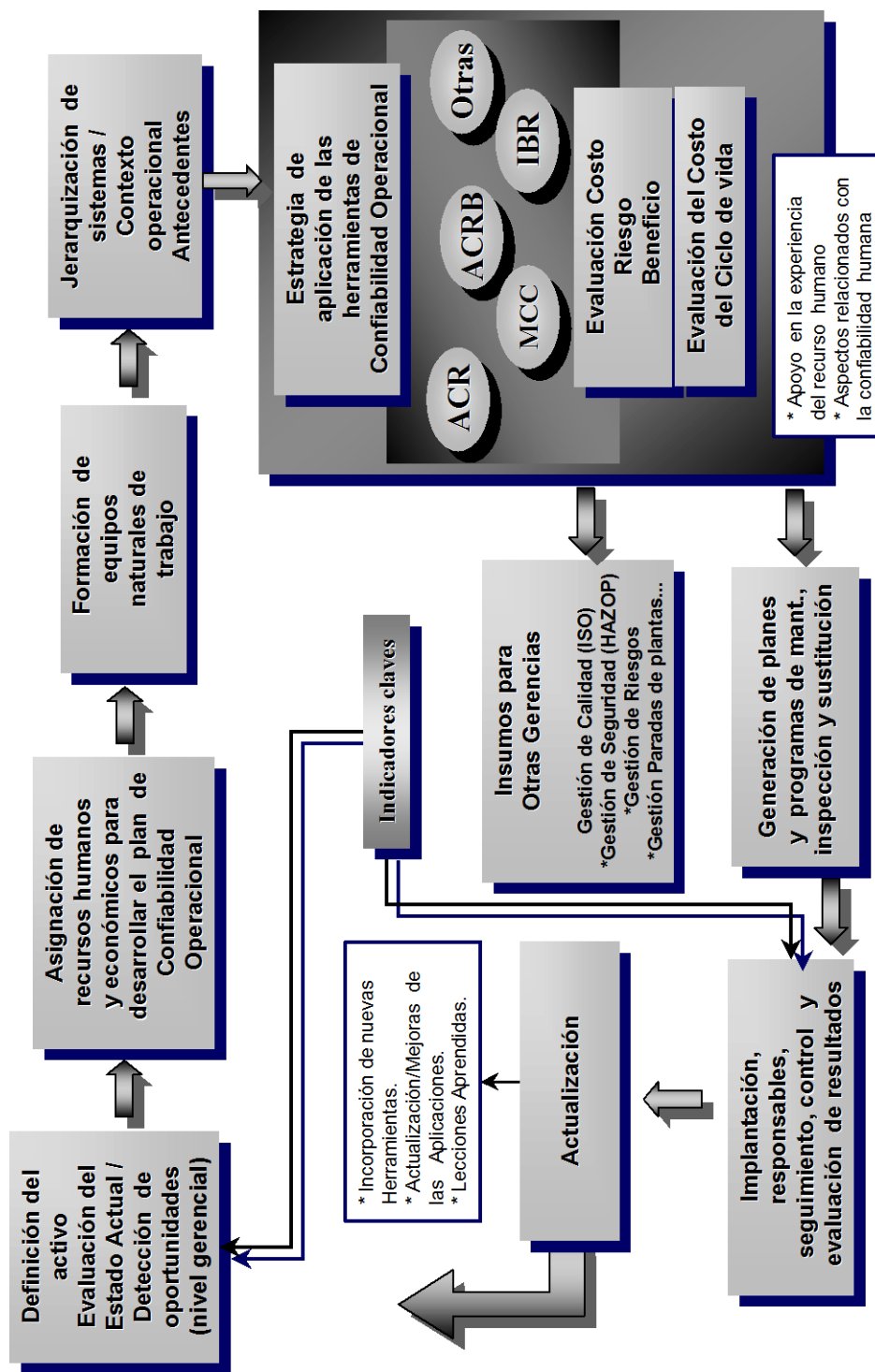


LÁMINA 1: Flujograma del Modelo Propuesto de Gestión de Confiabilidad Operacional.

2.1.- DEFINICIÓN DEL ACTIVO, EVALUACIÓN DEL ESTADO ACTUAL Y DETECCIÓN DE OPORTUNIDADES

En el preámbulo de una Gestión de Confiabilidad Operacional, la iniciativa del cambio debe germinar en el eslabón fundamental de la cadena: *la gerencia*. Esto permite mayor fluidez en la toma de decisiones e involucra de antemano a la misma a lo largo de todo el proceso de gestión.

La gerencia comenzará definiendo el activo; establecerá una evaluación del estado actual y realizará una búsqueda de oportunidades, aplicando de una de las herramientas de Confiabilidad Operacional: *Análisis de Criticidad*.

Para establecer una evaluación del estado actual se debe estudiar el tipo de información que se posee del activo y al mismo tiempo cuestionar si es ésta suficiente para realizar una evaluación cualitativa o cuantitativa del mismo.

En la evaluación cualitativa hay que definir cuidadosamente los parámetros que han de ser considerados; mientras que en la evaluación cuantitativa deben estimarse los índices de confiabilidad y disponibilidad actuales.

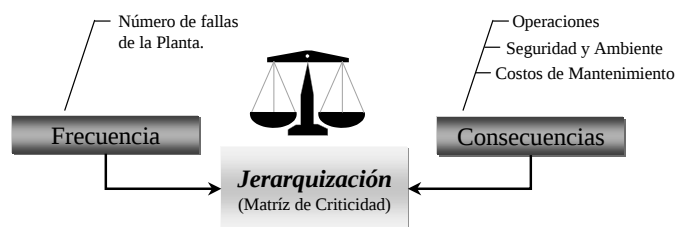


Fig. 5.- Proceso de Jerarquización

El análisis de criticidad permitirá jerarquizar los activos al nivel de plantas a través de una evaluación cualitativa del riesgo.

Para la estructuración del análisis cualitativo, se formulan algunas preguntas tales como:

- ✓ ¿ Se han presentado paradas en la planta?
- ✓ ¿ La planta tiene altos riesgos de seguridad y ambiente?
- ✓ ¿ La planta posee un alto impacto operacional?
- ✓ ¿ La planta genera altos costos globales de mantenimiento?, etc.

Cuando se ejecuta una jerarquización a este nivel, se debe considerar las necesidades actuales de la gerencia, de forma tal que se adjudique una primera orientación a la aplicación del plan de confiabilidad. Es importante definir si la prioridad en el momento de evaluar se debe encausar hacia seguridad y ambiente, hacia impacto operacional, hacia costos de mantenimiento, hacia producción, etc.

2.2.- ASIGNACION DE RECURSOS HUMANOS Y ECONÓMICOS PARA EL DESARROLLO DEL PLAN DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL

En esta fase se seleccionará y designará el recurso humano requerido para el desarrollo del plan.

Seguidamente, se debe facultar al recurso humano a través de inducciones para suavizar las posibles resistencias al cambio de paradigmas. Igualmente, se debe potenciar la cultura de compilación y suministro de data confiable. Adicionalmente, asegurar una visión sistemática del proceso y fomentar el desarrollo del trabajo armónico en equipo.

Para la continuidad del plan, el recurso humano debe estar en capacidad de manejar las herramientas técnicas de confiabilidad operacional y discernir entre ellas en casos de aplicaciones específicas.

Por otra parte, a este nivel es necesario realizar un análisis económico para asignar los recursos financieros requeridos en la ejecución del plan.

Criticidad Total = Frecuencia de fallas x Consecuencia			
Consecuencia = ((Impacto Operacional x Flexibilidad) + Costos de Mtto. + Impacto SAH)			
Frecuencia de Fallas		Costo de Mtto.	
Pobre mayor a 2 fallas/año	4	Mayor o igual a 20000 \$	2
Promedio 1 - 2 fallas/año	3	Inferior a 20000 \$	1
Buena 0.5 - 1 fallas/año	2		
Excelente menos de 0.5 fallas/año	1		
Impacto Operacional		Impacto en Seguridad Ambiental e Higiene SAH	
Pérdida de todo el despacho	10	Afecta la seguridad humana tanto externa como interna y requiere la notificación a entes externos a la organización	8
Parada del sistema o subsistema y tiene repercusión en otros sistemas	7	Afecta al Ambiente/ instalaciones	7
Impacta en niveles de inventario o calidad	4	Afecta las instalaciones causando daños severos	5
No genera ningún efecto significativo sobre operaciones y producción.	1	Provoca daños menores (Ambiente/Seguridad)	3
Flexibilidad Operacional		No provoca ningún tipo de daños a personas, instalaciones o al ambiente	
No existe opción de producción y no hay función de repuesto	4		1
Hay opción de repuesto compartido/ almacén	2		
Función de repuesto disponible	1		

Fig. 7. - Modelo de Criticidad

Cuando se tiene una lista jerarquizada de sistemas y/o equipos se debe compilar todo tipo de información necesaria para tener una visión definida de los antecedentes del mismo. Puede realizarse un análisis sistemático de información con registros

del comportamiento del equipo durante un período de tiempo determinado, sustentado por su histórico de paradas.

Paralelamente, los equipos naturales de trabajo definirán el contexto operacional al cual está sometido el sistema y/o equipo en cuestión. Esto se basa fundamentalmente en identificar la función del sistema y/o equipo; estructurar los diagramas de PI&D, estructurar los diagramas EPS; determinar las condiciones de operación; detectar de funciones secundarias; determinar la probabilidad de fallas ocultas, etc.

2.5.- ESTRATEGIA DE APLICACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS TÉCNICAS DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL

Una vez clasificados los sistemas y/o equipos en críticos o semicríticos y no críticos, el siguiente paso es la aplicación de las herramientas específicas para cada circunstancia, tal como se muestra en la Figura 8, en forma jerarquizada.

En los equipos críticos o semicríticos, pueden presentarse el caso de ser equipos rotativos, estáticos, eléctricos, de instrumentación y control, líneas y tuberías, etc.

Determinar fallas recurrentes en estos equipos, indicará si es preciso aplicar la herramienta idónea para este tipo de caso: *Análisis de Causa Raíz*.

Ejecutado el Análisis de Causa Raíz, se seleccionará la herramienta más idónea con el objetivo de establecer un análisis adecuado al equipo en cuestión.

En el caso de equipos rotativos, eléctricos y de instrumentación, la herramienta más recomendable es Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, con la cual se obtendrá una planificación sistemática del mantenimiento para evitar modos de fallas específicos. Generalmente este tipo equipos presentan frecuencia de fallas mayores y modos de fallas más diversos.

En el caso de equipos estáticos, líneas y tuberías, la herramienta más recomendable es Inspección Basada en Riesgo, a través la cual se analizará el deterioro y alcance del nivel crítico de este tipo de equipos. De esta forma se puede optimar decisiones como planes de inspección, rediseño, renovación y alcances de paradas de planta. Cabe destacar que con la aplicación de esta herramienta sobre equipos estáticos, se consiguen ahorros importantes porque se concentran los recursos en las fallas que ocasionan mayores costos.

Tal como se muestra en la Figura 8, si el equipo que se está analizando no presenta fallas recurrentes, entonces lo que se recomienda es aplicar directamente la herramienta técnica de confiabilidad operacional más idónea. Esto conduce a un ahorro de tiempo y de recursos económicos durante la ejecución del plan.

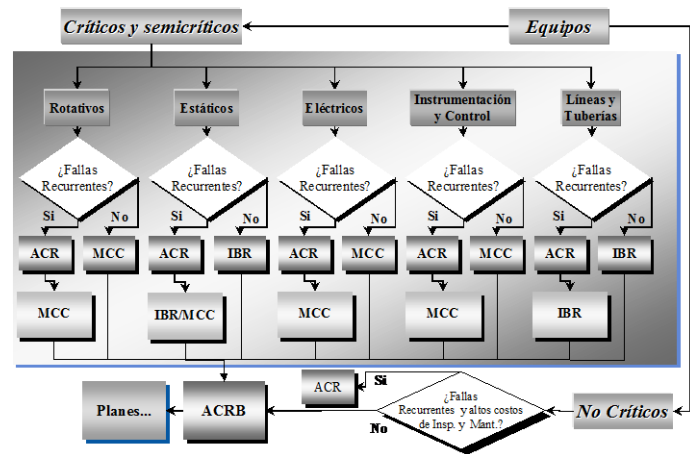


Fig. 8. - Estrategias de Aplicación de herramientas Técnicas

2.6.- EVALUACIÓN COSTO RIESGO BENEFICIO

La aplicación de las herramientas de confiabilidad operacional da como resultado

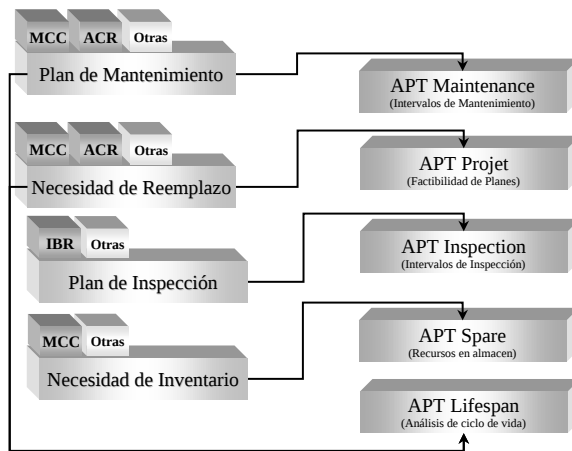


Fig. 9.- Uso de los APT en la aplicación de un ACRB

una serie de planteamientos que deben ser “filtrados” por un *Análisis de Costo Riesgo Beneficio*, logrando así garantizar la efectividad de los planes y programas generados.

Como una herramienta de soporte al Análisis de Costo Riesgo Beneficio, están el uso de los APT (Asset Performance Tools) mostrados en la Figura 9. Estos son programas diseñados por Woodhouse

Partnership, que establecen un estudio de intervalo óptimo de mantenimiento (APT Maintenance), un estudio de intervalo óptimo de inspección (APT Inspección), un estudio de equipos en almacén (APT Spare), un estudio al momento de reemplazar un equipo (APT Lifespan y APT Project).

El criterio de los APT se basa en el análisis del riesgo, es por ello que detrás de toda la base de datos se involucran: frecuencias de fallas, costos de mantenimiento, costos por penalización, etc.

Un ACRB puede estructurarse según las necesidades y condiciones que presente el sistema y/o equipo a evaluar, lo que no significa que sin la disposición de los APT no se pueda establecer dicho análisis.

Adicionalmente dentro del ACRB se plantea la evaluación del costo del ciclo de vida de los equipos, con la cual se puede determinar el punto óptimo de duración de un equipo, lo que ayudará a definir el momento de su reemplazo o bien seleccionar entre un

equipo específico y otro que presente características de vida diferentes, bajo un mismo contexto operacional. Esta evaluación está inmersa en el software APT Lifespan.

Una vez realizado el Análisis Costo Riesgo Beneficio, queda el cuadro abierto a la generación de planes y programas de mantenimiento.

2.7.- GENERACIÓN DE PLANES Y PROGRAMAS

Toda la información compilada a través del uso de herramientas técnicas de confiabilidad operacional, será sustentada además por todos aquellos aportes que pueda brindar la experiencia del recurso humano.

En esta fase, juega un papel importante la confiabilidad humana, ya que para la generación de planes y programas debe tomarse en cuenta factores relacionados con ella. Es aquí donde intervienen también las herramientas de desarrollo organizacional, es decir una fase de preparación para los futuros cambios que se presentarán.

Organizada toda la información, se estructurarán los planteamientos, ordenes, planificaciones, programas y estrategias de mantenimiento, programas de inspección y sustituciones, etc. Todo esto basándose en los objetivos de la empresa.

2.8.- INSUMOS PARA OTRAS GERENCIAS

La información obtenida durante el proceso de aplicación de las herramientas técnicas de confiabilidad, servirán de apoyo a otras áreas gerenciales tales como:

- ✓ Gestión de Calidad ISO.
- ✓ Gestión de Seguridad HAZOP.
- ✓ Gestión de Riesgos
- ✓ Gestión de Paradas de Planta.

Con lo cual se generarán ahorros sustanciales tanto de tiempo como financieros.

2.9.- IMPLANTACIÓN, DELEGACIÓN DE RESPONSABILIDADES, CONTROL Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Con la generación de planes y programas se da inicio a una fase previa a la

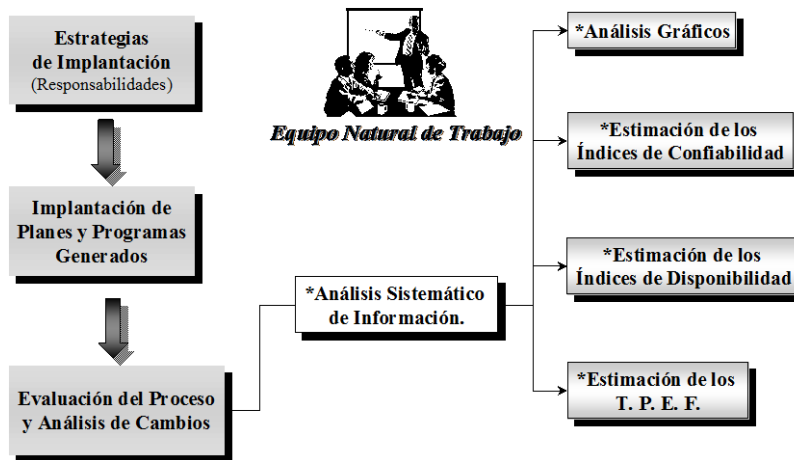


Fig. 10.- Proceso de implantación, evaluación y control.

la implantación, en la que se definirán las estrategias de ¿quién va a implementar?, ¿cómo se va a implementar?, ¿cuáles recursos están disponibles?, ¿frecuencia de evaluación?, ¿quién va a evaluar?, ¿cómo se va a evaluar? y ¿qué índices comparativos se van a utilizar durante la evaluación?.

En esta fase le será delegada la responsabilidad de la evaluación a un equipo que puede ser distinto o no al equipo natural de trabajo, que estuvo a cargo del proceso de gestión hasta este nivel. Este equipo de evaluación es responsable de llevar un seguimiento en el cumplimiento de todas las pautas definidas durante el proceso de generación de planes y programas.

Como se muestra en la Figura 10; definidas las estrategias se da inicio al proceso de implantación de los planes y programas generados, lo cual representa el primer paso a los nuevos cambios que se espera de la gestión. A partir de ese instante, comenzará la evaluación del proceso a través un análisis sistemático de información que consistirá en:

- ✓ Analizar gráficos de Información.
- ✓ Estimar índices de confiabilidad.
- ✓ Estimar índices de disponibilidad.
- ✓ Estimar los tiempos promedios entre fallas (TPEF).

La estimación de los índices de confiabilidad, disponibilidad y los tiempos promedios entre fallas, serán explícitamente presentados en el siguiente capítulo.

La evaluación continua del proceso de implantación permitirá:

- ✓ Que los planes y programas generados no queden archivados sin llegar a ejecutarlos.
- ✓ Que se observe constantemente el proceso de transformación, a través de los índices estimados.
- ✓ Que se generen nuevas propuestas para el próximo ciclo de gestión.
- ✓ Que se establezca un fácil control de la gestión.

2.10.- ACTUALIZACIÓN

La actualización representa la fase final del proceso de gestión de confiabilidad operacional, en ella se abre una brecha para la incorporación de nuevas herramientas tanto técnicas como de desarrollo organizacional, con la finalidad de enriquecer el nivel de gestión.

También se inicia un proceso de mejoras en las técnicas empleadas y se buscan nuevas tecnologías que las fortalezcan.

Adicionalmente en esta etapa se plantea la “moraleja” de todo el trabajo que se ha realizado precisando de esta forma las lecciones aprendidas en el mismo.

CAPÍTULO III

Lo que conduce y arrastra al mundo no son las máquinas sino las ideas...

Victor Hugo

3.- HERRAMIENTAS DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL

Las herramientas de Confiabilidad Operacional influyen directamente sobre los cuatro parámetros que la conforman, lo cual permite el acceso a la manipulación gerencial de los mismos.

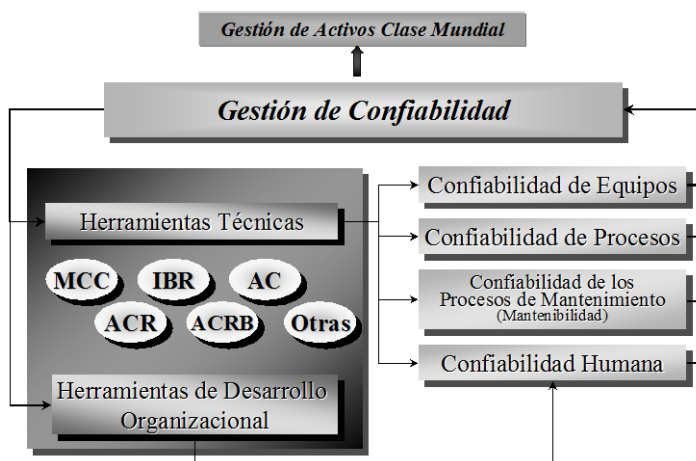


Fig. 11.- Influencia de las herramientas sobre los cuatro parámetros de confiabilidad operacional

Es en este punto, donde comienza el proceso de generación de modelos de confiabilidad operacional a través del uso de las herramientas, incidiendo sobre los sus parámetros y al mismo tiempo orientando dicho proceso hacia el alcance de una gestión de activos Clase Mundial. (véase Fig. 11)

A continuación se presenta una breve descripción de dichas herramientas:

3.1.- HERRAMIENTAS DE DESARROLLO ORGANIZACIONAL

Las herramientas de desarrollo organizacional, comprenden todo el conjunto de metodologías y estrategias que inducen a la aceptación de cambios de paradigmas dentro de la empresa, es decir, todas aquellas prácticas que se ejecutan para abolir la resistencia al cambio cuando nuevas culturas pretenden ser incluidas dentro del ambiente de trabajo.

Igualmente las herramientas de desarrollo organizacional, comprenden los sistemas de inducción para la formación de equipos dentro de las diversas dependencias de la empresa; bajo este concepto se genera el *Equipo Natural de Trabajo*, el cual está integrado por personas que se desempeñan en diversas áreas de la organización, quienes trabajan juntas por un período de tiempo determinado en un clima de potenciación para analizar problemas comunes de los distintos departamentos, apuntando al logro de un objetivo común.

Dentro de las herramientas organizacionales, se toma en cuenta el aporte que puede suministrar el personal basándose en su experiencia, enriqueciendo de esta forma las decisiones que se puedan tomar en un momento dado con hechos ya experimentados en el pasado.

Por otra parte, estas herramientas instigan a la organización a revisar y evaluar las metodologías una vez aplicadas, incluyendo mejoras y cambios para el futuro

3.2.- HERRAMIENTAS TÉCNICAS

Las herramientas técnicas sustentan la Confiabilidad Operacional a la luz de resultados obtenidos en diversas áreas operacionales, orientadas hacia un enfoque más práctico.

En la actualidad, se han desarrollado diversas herramientas técnicas específicas para el desarrollo de la Confiabilidad Operacional, muchas de ellas generadas dentro de un esquema de análisis proactivo tales como:

- ✓ Análisis de Conteo de Partes.
- ✓ Análisis de Pareto.
- ✓ Análisis de Riesgo.(FRR)
- ✓ Jerarquización Relativa.
- ✓ Lista de Chequeo
- ✓ Análisis de What-if
- ✓ Análisis de Riesgo y Operabilidad (HAZOP).
- ✓ Instrucción y evaluación de Seguridad (WISE).
- ✓ Análisis de Modos y Efectos de Fallas. (AMEF).
- ✓ Análisis de intercambio al último minuto (SMED).
- ✓ Análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad (RAM)

Adicionalmente, en PDVSA S.A. se ha experimentado (obteniendo buenos resultados), con cinco metodologías básicas que son fundamentos de este trabajo; éstas son:

- ✓ Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC).
- ✓ Inspección Basada en Riesgos (IBR).
- ✓ Análisis de Criticidad (AC)
- ✓ Análisis de Costo Riesgo Beneficio (ACRB).
- ✓ Análisis de Causa Raíz (ACR)

3.2.1.- GENERALIDADES DE LAS HERRAMIENTAS TÉCNICAS

3.2.1.1.- MCC: “Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad”: Es una metodología utilizada en la estructuración sistemática de las pautas que deben realizarse para el aseguramiento de la continuidad de los equipos en el logro de los requerimientos del usuario.

MCC es aplicable en equipos y/o sistemas críticos para la producción, seguridad y ambiente; en equipos y/o sistemas con altos costos de mantenimiento debido a trabajos preventivos o correctivos; en equipos y/o sistemas genéricos con un alto corte colectivo de mantenimiento y particularmente, si no existe confianza en el mantenimiento existente.

En MCC los proyectos deben ser cuidadosamente seleccionados y definidos; es de suma importancia el involucramiento del cliente; debe hacerse uso de la mejor información de fallas disponibles; los beneficios deben ser mensurables antes y después.

Para ejecutar una metodología, inicialmente se debe definir el *Equipo Natural de Trabajo*, constituido por: (véase Fig. 12)

- ✓ Ingeniero de procesos, quien tiene una visión global de los procesos.
- ✓ Facilitador, quien es un asesor metodológico.
- ✓ Mantenedor, quien es experto en reparación y mantenimiento de sistemas y equipos.
- ✓ Programador, quien otorga una visión sistemática de la actividad.
- ✓ Operador, quien es experto en manejo y operabilidad de sistemas y equipos.
- ✓ Especialista, quien es especialista en un área específica.

Este equipo natural de trabajo es el ente responsable del desarrollo del MCC o cualquier otra herramienta.

Particularmente en MCC, se debe comenzar por un análisis general, al cual se le hará una auditoría para luego establecer una planificación que al ejecutarse deberá ser revisada en el tiempo. (véase Fig.13)

En un análisis del MCC el equipo natural de trabajo, debe definir el contexto operacional del equipo y/o sistema que va a ser estudiado. (véase Fig.14).



Fig. 12.- Compleción de Un equipo Natural de Trabajo.

El contexto operacional puede ser analizado desde un enfoque operativo donde se toma en cuenta el propósito del sistema; la descripción de los equipos; descripción de los procesos; dispositivos de seguridad; inquietudes, planes a futuro, metas de seguridad, ambiente y operación. Puede ser analizado también desde un enfoque del personal donde se toma en cuenta los turnos rotativos, operaciones, mantenimiento, parámetros de calidad y

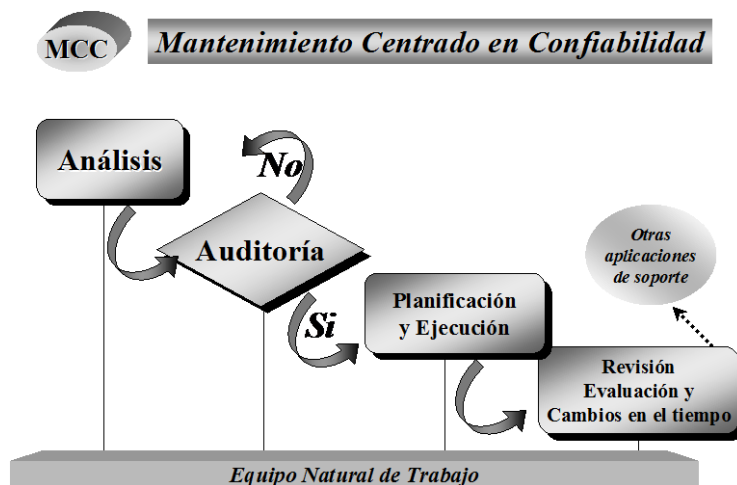


Fig.13.- Pasos que debe seguir un equipo natural de trabajo en MCC

gerencia. También puede ser analizado desde un enfoque de los procesos, donde se toma en cuenta la división de éstos en sistemas, se definen los límites del sistema y se registran listados de componentes para cada sistema.

Una vez definido el contexto operacional del equipo y/o sistema, el equipo natural de

trabajo se debe plantear las 7 preguntas del MCC, de las cuales 5 de ellas corresponden al análisis de efectos y modos de fallas (AMEF): ¿Cuál es la función del activo?, ¿De qué manera puede fallar?, ¿Qué origina la falla?, ¿Qué pasa cuando falla?, ¿Importa si falla?.

Básicamente con un AMEF lo que se persigue es definir las funciones del equipo y/o sistema, determinar la fallas funcionales, identificar los modos de fallas y los efectos de fallas. Las dos preguntas restantes que pertenecen a la lógica de decisiones:

¿Se puede hacer algo para prevenir la falla? , ¿Qué pasa si no podemos prevenir la falla?; permiten orientar la toma de decisiones ante un evento específico.

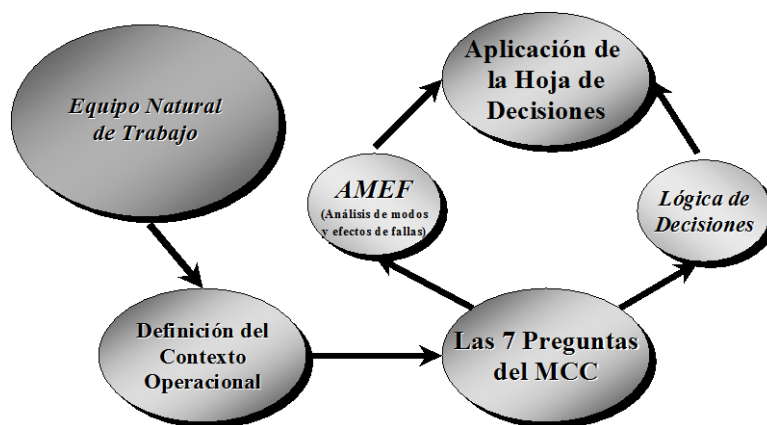


Fig.14.- Pasos en el análisis de MCC

Finalmente con la formulación de estas preguntas y las respuestas de las mismas, el equipo natural de trabajo está en capacidad de estructurar un árbol de decisiones que servirá como base a la elaboración de una hoja de decisiones la cual presenta la información necesaria para el desarrollo de los planes de mantenimiento que se van a generar.

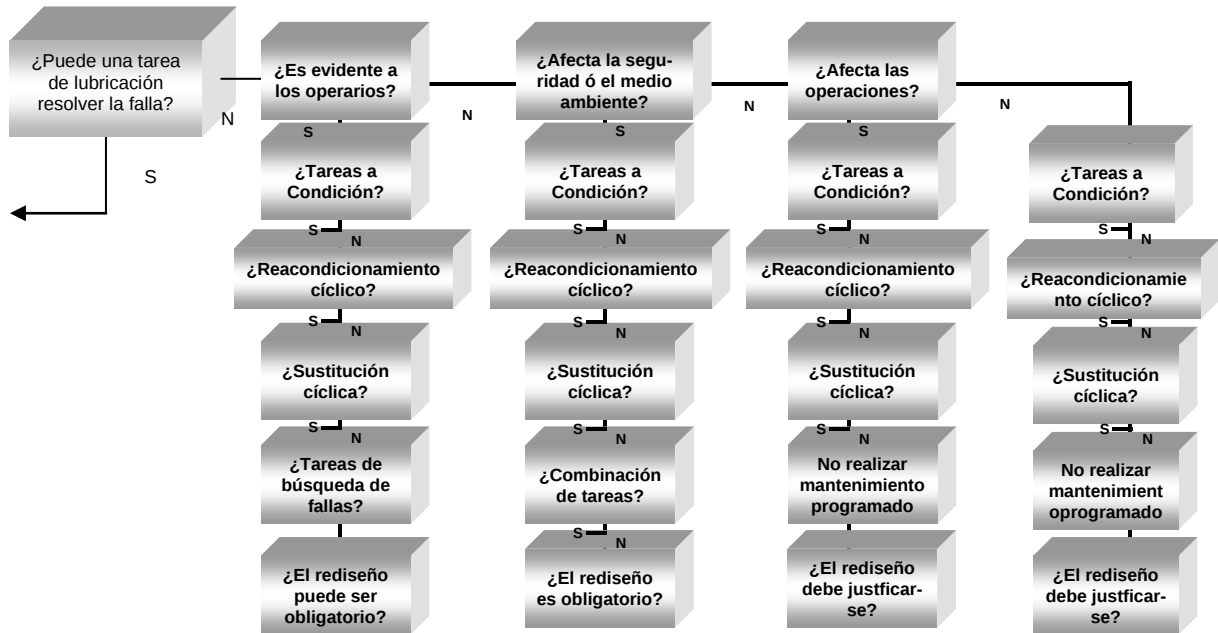


Fig. 15.- Árbol de decisiones.

Una hoja de decisiones es el instrumento donde se registrará tanto el análisis de modo y efectos de falla en conjunto con el estándar de ejecución, actividad del mantenimiento, acción de mantenimiento a ejecutar, frecuencia de aplicación del mantenimiento, número óptimo de repuestos en almacén y el personal que se responsabilizará de ésta tarea.

La Figura 16 muestra una hoja de decisiones. En ella se representan los planes de mantenimiento generados por el equipo natural de trabajo sobre un activo específico, después de un exhaustivo análisis del mismo.

MCC: HOJA DE REGISTRO DEL AMEF. SISTEMA DE SUMINISTRO CARENERO- GUATIRE PLANTA DE DISTRIBUCION CARENERO		SISTEMA: BOMBEO PRINCIPAL CARENERO EQUIPOS PRINCIPALES :BOMBAS PRINCIPALES Y AUXILIARES, VÁLVULAS, INSTRUMENTACIÓN.				Facilitadores: Carlos Parra Juan González Fecha de inicio: 08 Junio Fecha de culminación: 09 Agosto # reuniones: 4 sesiones		PLAN DE MANTENIM
#	Estándar de ejecución	#	Falla Funcional	#	Modo de falla	Frecuencia de ocurrencia del modo del falla	Efecto de Falla	Actividad de mantenimiento utilizando el árbol lógico de decisión del MCC
1	Suministrar en condiciones seguras y de óptima calidad productos derivados de hidrocarburos desde Carenero hasta planta Guatire (Caudal promedio Diesel y GLP: 2500 bls/h (min. 2200 y max. 2500 bls/h), Gasolinas: 2700 bls/h (min. 2200 y max. 2700 bls/h). Presión de bombeo Diesel: 900 psi, GLP: 700 psi y gasolinas: 850 (min. 700 y max. 1100 psi).	A	No ser capaz despachar productos derivados de hidrocarburos por el poliducto (en función de las condiciones del producto manejado) - PÉRDIDA TOTAL DE LA FUNCIÓN	1A1	Falla eléctrica	EDECENTRO (paradas programadas: 2/año), NO PROGRAMADAS: 10/año. Capacidad contratada: 12,543 MMBs/mes.	A nivel operacional, se produce una pérdida inmediata de la capacidad de bombeo. Al ocurrir una falla eléctrica, arranca el sistema el cual supe los sistemas de esenciales (instrumentación, control y servicios). Las medidas de corrección son el aseguramiento del sist. de bombeo (cierre de válvula). Periodo de reposición (1-3 horas máximo)	Actividades externas (EDECENTRO)
				1A2	Falla línea tendido eléctrico de la planta Carenero	24 eventos al año (cortas)	ESCENARIO CRÍTICO: Pérdida de las dos líneas / Ident al anterior - Causa ambiental, o falla de componente / caso de causa ambiental (caída de ramas, choques con animales) se puede reparar entre 1-3 h. Operacionalmente se pierde la línea asociada a la bomba que en el momento está en servicio (rango de re abastecimiento: 1,5 h). ESCENARIO NORMAL: la falla solo afectará parcialmente el proceso de bombeo.	Preventivo
				1A3	Fallas del sistema de aterramiento	2 eventos en 7 años	Cuando cae un rayo (esto ha ocurrido dos veces) se para el sistema de bombeo, aseguran el sistema y se inicia el proceso de restablecimiento. El tiempo depende de la falla (entre 5 horas y dos días).-oculta	Pesquisa de falla
				1A4	Evento natural (alta caída pluviométrica)	1 evento en 13 años	Parada preventiva para inspección y verificación de la integridad física del poliducto. Tiempo 24 horas.	Preventivas

Fig.16.- Hoja de decisiones

3.2.1.2.- IBR: “Inspección Basada en Riesgos” es una metodología que permite determinar la probabilidad de falla en equipos que transportan y/o almacenan fluidos y las consecuencias que esta pudiera generar sobre los operarios, el ambiente y los procesos.

IBR se aplica cuando se quiere revisar y/o fijar frecuencias de inspección, cuando se desea optimizar costos de inspección; cuantificar y/o modificar niveles de riesgos y particularmente cuando se requiere mejorar la productividad y la rentabilidad.

Con la aplicación de IBR, se logra optimizar los esfuerzos de inspección (alcance, costos y frecuencia), se evalúa el impacto sobre riesgo de acciones (Modificaciones de procesos, instalación de válvulas de aislamiento, instalación de sistemas de detección y mitigación); finalmente se logra apoyar la toma de decisiones, considerando el riesgo cuantificado.

Para ejecutar IBR (véase Fig.17), inicialmente el equipo natural de trabajo debe realizar una selección de la unidad como objeto de estudio. Posteriormente, se recopila toda la información necesaria para el análisis. Luego en una fase siguiente se establece un análisis del riesgo y finalmente se emite la matriz de riesgo, la cual indica la zona de riesgo donde el equipo se encuentra ubicado.

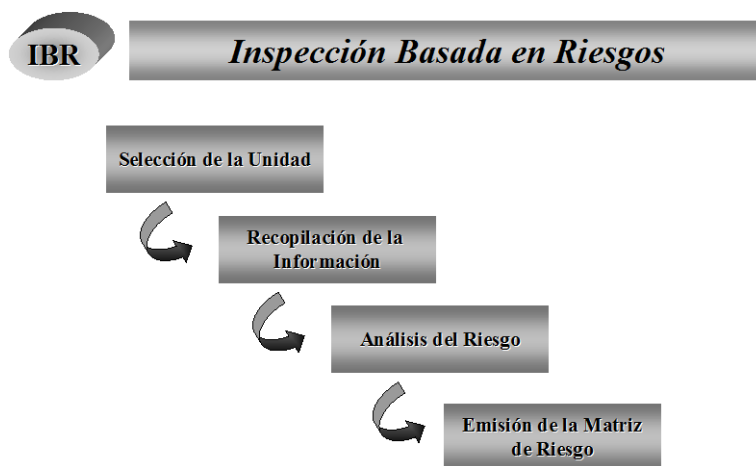


Fig. 17.- Pasos que debe seguir un equipo natural de trabajo en IBR

Dentro de la recopilación de información se contempla la descripción del proceso; los parámetros de diseño y operación; registro de inspección y mantenimiento; mecanismos de degradación; sistemas de detección, aislamiento y mitigación, costo de reemplazo de equipos, costo diario de parada, etc.

El análisis del riesgo se basa en un estudio cualitativo y cuantitativo, donde se analiza la frecuencia de fallas y la consecuencia de las mismas tomando en cuenta parámetros indicativos preestablecidos por las características del riesgo. Esto conduce a la ubicación de eventos característicos, de acuerdo a la severidad de sus consecuencias. Ejemplos típicos de estos eventos son: fugas sin incendio; incendios menores; lesiones menores; baja de carga en la unidad; productos ligeramente fuera de especificación; derrames con impacto ambiental limitado; incendio severo, lesiones severas, parada de planta no planificada de media duración, fuga de productos tóxicos, incendio severo, impacto ambiental severo, fatalidad, etc.

Posteriormente se clasifican las frecuencias, desde extremadamente improbables hasta muy probables, variando la probabilidad anual entre 10^{-6} y 10^{-1} .

Las combinaciones de frecuencias y consecuencias permitirán definir los espacios de riesgos intolerables (altos), reducibles (medios altos), optimizables (medios) y mínimos (bajos).

Para el cálculo de las consecuencias se han desarrollado ecuaciones enfocadas hacia el punto de vista de incendios, explosiones y fugas de productos tóxicos. Además se han desarrollado software especializados para realizar estos cálculos. Las unidades de medida de las consecuencias se pueden referir al número de personas lesionadas, al tiempo de recuperación del impacto ambiental, al costo económico de las pérdidas o a ciertos intangibles, como el prestigio, las relaciones con la comunidad etc.

Cuando se calcula una equivalencia económica del riesgo, estimando el valor de las vidas humanas, se genera un indicador global que no reemplaza otras unidades de medida, sino que orienta sobre el impacto.

Toda esta información representa la base para la elaboración de una matriz de riesgo.

A través de una matriz de Riesgo se obtiene información necesaria para la toma de decisiones con respecto a la unidad (véase Fig.18).

En esta matriz, se ubican las consecuencias cuantificadas en el eje de las abscisas y en el eje de las ordenadas la frecuencia de fallas correspondientes al equipo en análisis. Finalmente partiendo del concepto de riesgo:

$$\text{Riesgo} = \text{Frecuencia} \times \text{Consecuencia}$$

Se puede adjudicar una posición al equipo dentro de la matriz.

5			2		
4		4			
3			1		
2	1	5	9	9	3
1	20	7	21	36	10
	A	B	C	D	E

consecuencias

Fig.18.- Matriz de Riesgos

3.2.1.3.- AC: “Análisis de Criticidad” es una metodología que permite jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global con el fin de facilitar la toma de decisiones.(véase Fig.19).

La metodología AC posee cierta analogía a la metodología de IBR con la diferencia de que es un análisis más cualitativo del sistema y/o equipo a evaluar.

Para aplicar AC se deben definir los alcances y propósitos del análisis; se debe establecer criterios de importancia y se debe seleccionar un método de evaluación para jerarquizar la selección del sistema objeto del análisis.

Generalmente los criterios establecidos para AC son: Seguridad, Ambiente, Producción, Costos de Operación, costos de Mantenimiento, Frecuencia de Fallas y tiempo promedio para reparar.

Con estos criterios, se genera un modelo de criticidad definido por:

$$\text{Criticidad} = \text{Frecuencia} \times \text{Consecuencia}$$

Donde la consecuencia está ahora en función de los criterios de impacto operacional, costo de mantenimiento, impacto de seguridad ambiental e higiene y el concepto de *flexibilidad operacional*, el cual

indica si existe o no la posibilidad de producción durante la falla, si hay o no función del repuesto, si hay repuestos en el almacén y si el repuesto está disponible, etc.

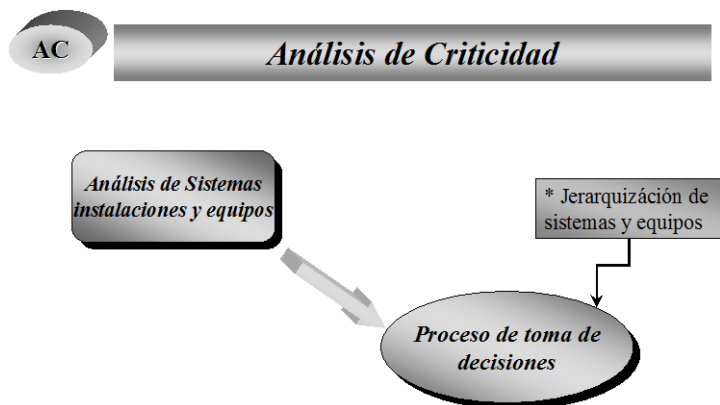


Fig. 19.- Pasos que debe seguir un equipo natural de trabajo en AC

De esta manera se define la consecuencia como el producto de los factores de impacto operacional y la flexibilidad operacional agregado a los costos de mantenimiento e impacto de seguridad ambiental, esto es:

$$\text{Consecuencia} = ((\text{Impacto Operacional} \times \text{Flexibilidad}) + \text{Costos de Mtto.} + \text{Impacto SAH})$$

Una vez realizado el análisis cuantitativo de la consecuencia y por ende de la criticidad, se emite una matriz de criticidad (véase Fig. 20), en la cual se ubica el equipo según su nivel, bien sea, crítico (C), medianamente crítico (MC) y no crítico (NC).

Un AC debe aplicarse cuando se requiera de fijar prioridades en sistemas complejos, administrar recursos escasos, crear valor, determinar impacto en el negocio, aplicar metodologías de confiabilidad operacional, etc.

AC puede ser aplicado en cualquier conjunto de procesos, plantas, sistemas, equipos y/o componentes que requieran ser jerarquizados en función de su impacto dentro del ámbito en estudio.

F R E C U E N C I A	4	MC	MC	C	C	C
	3	MC	MC	MC	C	C
	2	NC	NC	MC	C	C
	1	NC	NC	NC	MC	C
		10	20	30	40	50
		CONSECUENCIA				

Fig. 20.- Matriz de Criticidad

3.2.1.4.- ACR: “Análisis de Causa Raíz” es una metodología utilizada para identificar las causas que originan las fallas o problemas, las cuales al ser corregidas evitarán la ocurrencia de los mismos. ACR permite buscar la razón por la cual un sistema, instalación, equipo, componente o elemento, no funciona satisfactoriamente.

Su identificación y análisis, requieren un profundo conocimiento del sistema, las operaciones, el personal y los métodos de trabajo; es por ello que es el resultado de un trabajo en equipo.

Cuando se ejecuta ACR inicialmente es por la pérdida de una función (suele aplicarse para fallas recurrentes). Como se muestra en la Figura 21, el objetivo es definir el problema, identificando las soluciones efectivas e implementando las mismas.

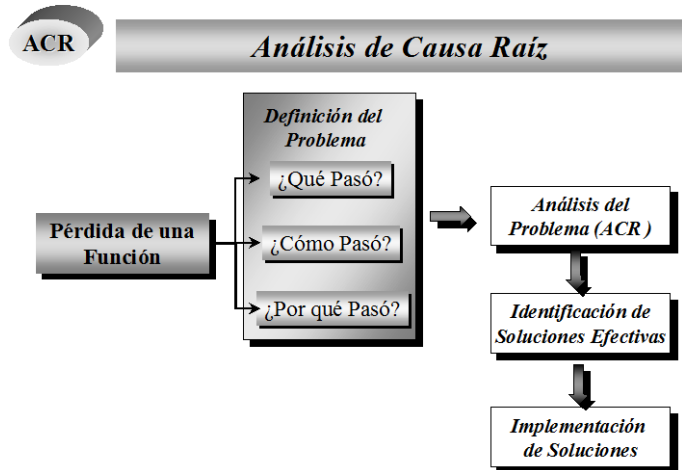


Fig. 21.- Pasos que debe seguir un equipo natural de trabajo en ACR

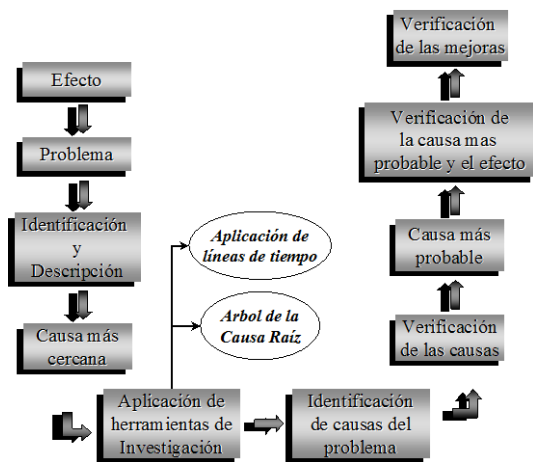


Fig. 22.- Análisis del problema (ACR)

causas del problema. En una siguiente fase se verifican las causas y el efecto. En una fase final se verifican las mejoras una vez aplicadas las soluciones efectivas planteadas

ACR resiste cualquier análisis cuantitativo o lógico porque se basa en hechos mensurables y cuantificables, no suposiciones o conjeturas y las causas reales han sido identificadas mediante razonamientos ordenados y racionales. Además es expresado en formas y lenguajes simples.

ACR es aplicable cuando se requiere de análisis de fallas repetitivas de equipos o procesos críticos; cuando se requiere de análisis de errores humanos, en el proceso de diseño y aplicación de procedimientos y su supervisión; cuando se requiere de análisis de diferencias organizacionales y programáticas, etc.

3.2.1.5.- ACRB: “Análisis de Costo Riesgo Beneficio” es una metodología que permite identificar la frecuencia óptima de las actividades de mantenimiento preventivo, con base en el costo total óptimo que genera. Esto se logra a través del balance de los costos – riesgos asociados a tales actividades y los beneficios que se generan.

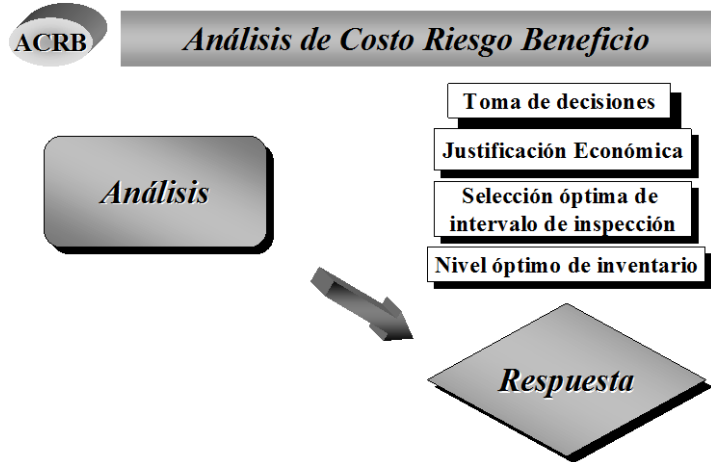


Fig. 23.- Pasos que debe seguir un equipo natural de trabajo en ACRB

Con ACRB se pueden determinar intervalos óptimos de mantenimiento, intervalos óptimos de inspección, análisis de factibilidad de reemplazo, análisis de factibilidad de inventario y análisis de ciclo de vida de las unidades.

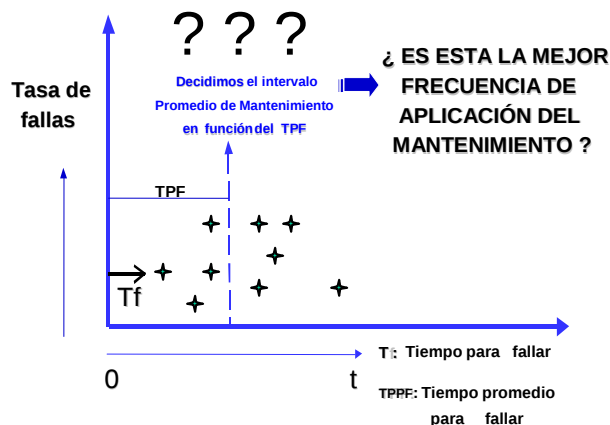


Fig. 24.- Limitación por datos históricos

Generalmente las gestiones de mantenimiento son aplicadas sólo para disminuir las frecuencias de fallas, sin analizar las consecuencias que generan éstas en el contexto operacional. En la selección de frecuencia de aplicación de las actividades de mantenimiento, el criterio usado ha sido la data histórica de fallas: tiempo promedio para fallar (TPPF). (véase Fig.24).

Actualmente la función del mantenimiento no puede limitarse únicamente a la reducción de fallas con acciones de mantenimiento basadas en registros históricos de fallas. De esta manera el mantenimiento se puede describir como: “Preservar la función de los

equipos aplicando estrategias efectivas de mantenimiento “costo/riesgo/beneficio”, que ayuden a minimizar los riesgos asociados a las consecuencias que generan los distintos modos de fallas dentro del contexto operacional”.

Para determinar los beneficios que aporta el mantenimiento, es necesario tomar en cuenta las razones que justifican las actividades de mantenimiento, esto es: ¿Cuál es el motivo para invertir dinero en mantenimiento?

Las razones principales que sustentan a este cuestionamiento son:

- ✓ Evita fallas o permite recuperarse de ellas.
- ✓ Mejora la eficiencia del equipo.
- ✓ Prolonga la vida útil.
- ✓ Permite el cumplimiento de las regulaciones.
- ✓ Mejora la imagen.

Un inconveniente, es relacionar las ganancias que se obtienen a partir de lo que se invierte en un departamento y los beneficios que se reflejan en otro sector. Esto conduce a la cuantificación de las variables involucradas y además relacionarlas con la cantidad obtenida con un gasto adicional o reducido, hecho que es complejo.

Una definición sólida debe involucrar las relaciones de precio-valor. Se debe adoptar algún tipo de unidades que permitan cuantificar cosas disímiles. El impacto total en la hoja de balance debe ser factor que determine la mejor oferta. Esto significa, minimizar el costo total de producción o maximizar las ganancias. Sólo a este nivel podemos determinar la combinación óptima entre los costos y los logros. La forma más común de expresar todo esto es a través de una gráfica como la que se muestra en la Fig.25.

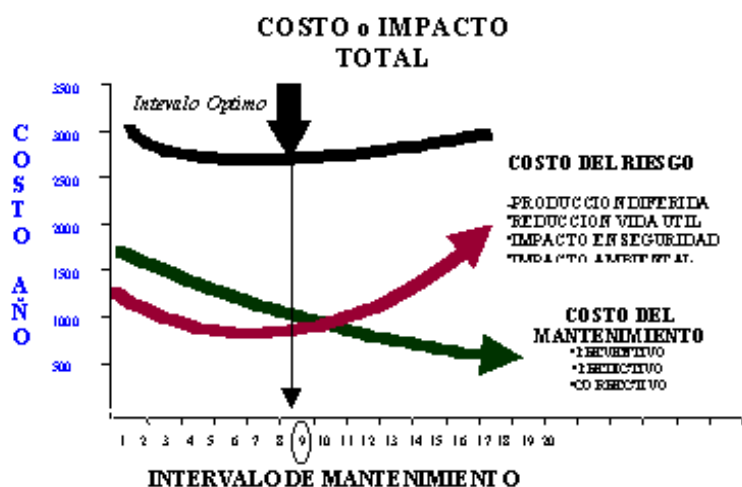


Fig. 25.- Intervalo Óptimo

Para este tipo de análisis en PDVSA se han aplicado las herramientas de *Assets Performance Tools (APT)* modelados por Woodhouse Partnership.

A continuación se definen de forma general cada una de las herramientas APT, utilizadas actualmente en PDVSA:

- ✓ **APT-MAINTENANCE:** Utilizada para definir intervalos óptimos de mantenimiento, gerencia del deterioro, confiabilidad, desempeño y efectos del ciclo de vida. En la Figura 26 se muestra una curva típica de resultados obtenidos a partir del APT Maintenance:

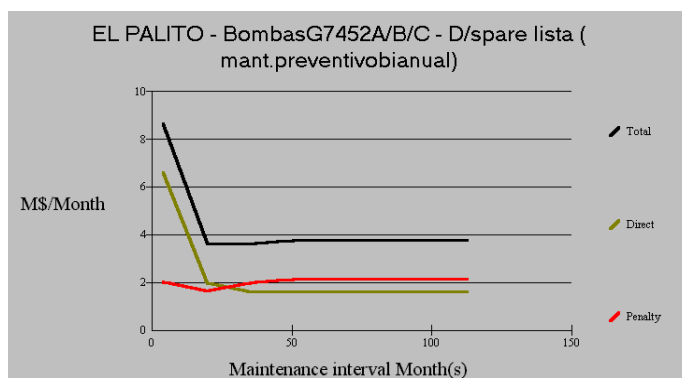


Fig. 26.- Curva Típica APT Maintenance

- ✓ **APT-INSPECTION:** Utilizada para definir intervalos óptimos de monitoreo, pruebas e inspección y comparación costo/beneficio de métodos de monitoreo. En la Figura 27 se muestra una curva típica de resultados obtenidos a partir del APT Inspection:

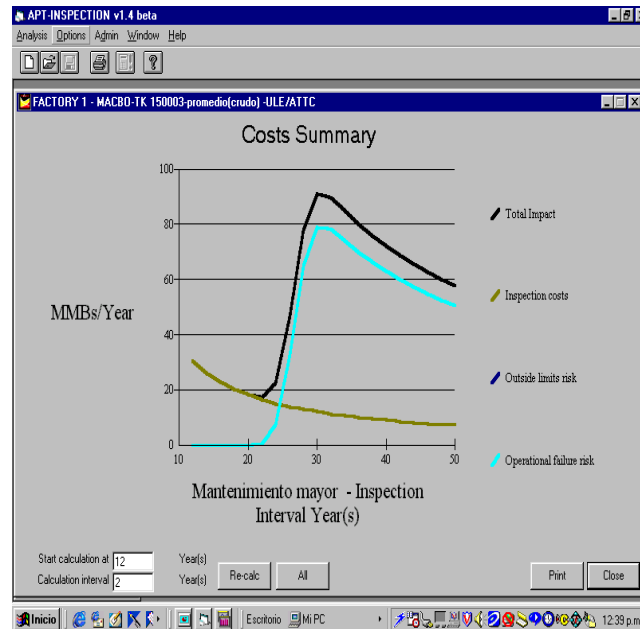


Fig. 27.- Curva Típica APT Inspection

- ✓ **APT-PROJECT:** Esta herramienta, permite jerarquizar y visualizar costos beneficios y riesgos del propósito, modificaciones, proyectos, seguridad, procesos o cambios de proceso. En la Figura 28 se muestran resultados típicos tal como los muestra el APT Project:

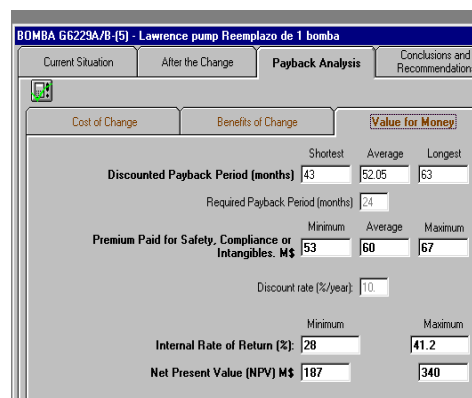


Fig. 28.- Resultados Típicos APT Project

- ✓ **APT-SPARE:** Permite generar estrategias de repuestos y materiales, niveles mínimos y máximos de inventarios, cuantificación de ordenes, comparación de suplidores y opciones de inventario. En la Figura 29 se muestran resultados típicos obtenidos a partir del APT Spare:

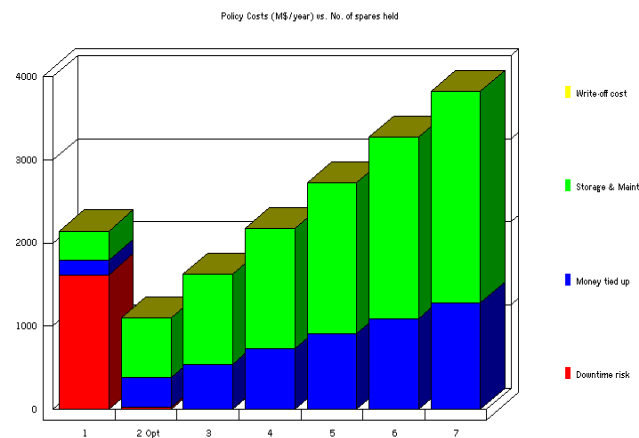


Fig. 29.- Resultados Típicos APT Spare

Como se puede apreciar, un análisis de riesgos es la base sobre la cual se fundamentan los programas de *Assets Performance Tools* modelados por Woodhouse Partnership.

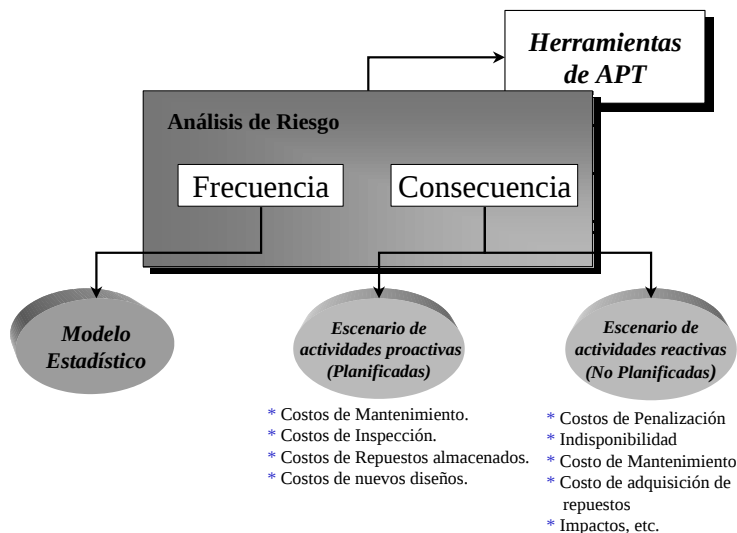


Fig. 30.- Proceso de análisis en ACRB

La frecuencia de fallas es determinada por medio de modelos estadísticos apoyados por datos históricos y en base a herramientas estadísticas como Weibull para mantenimiento, Log-Normal para inspección, Poisson para inventarios, y modelos económicos para proyectos.

Sin embargo, una de las mayores dificultades que presenta la determinación de la frecuencia de fallas, son las relaciones de matemáticas financieras en conjunto con la falta de información confiable. Esto puede traer como consecuencia imprecisión en las estrategias gerenciales y por tanto gastos innecesarios.

Por otra parte, las consecuencias presentan dos escenarios: el escenario de las actividades proactivas o planificadas y el escenario de las actividades reactivas o no planificadas (véase Fig. 30).

Las herramientas de ACRB sirven de apoyo a otras metodologías aportando información importante que agilizará el proceso de gestión.(véase Fig31).

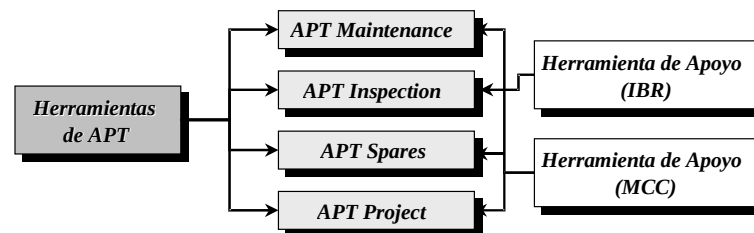


Fig. 31.- Apoyo de los APT para otras metodologías.

La aplicación de las herramientas de ACRB, ayudan a mejorar el proceso de toma de decisiones en actividades relacionadas con frecuencias de mantenimiento e inspección, niveles de inventario y evaluación económica de cambios o proyectos menores (rediseño).

La siguiente lámina muestra una metodología general que facilita la aplicación de las herramientas.

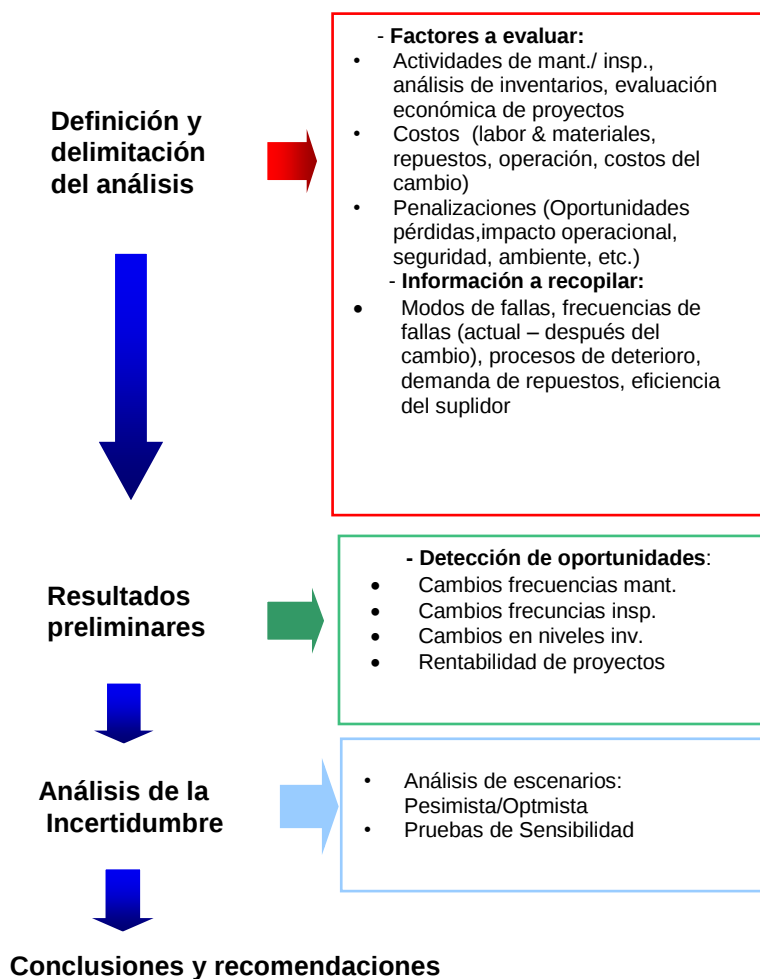


LÁMINA 2: Proceso de aplicación de las herramientas de ACRB

CAPÍTULO IV

El mejor profeta del futuro es el pasado...
Lord Byron

4.- ÍNDICES BÁSICOS DE EVALUACIÓN

El modelo propuesto integra una serie de pasos para realizar una gestión de confiabilidad operacional, dentro de los cuales se presentan fases de evaluación. Cuando se define el activo en la fase inicial, se evalúa el estado actual del mismo, presentándose en esta fase una primera evaluación a lo que se llamará *pre-evaluación*. En la fase final de implantación y control del proceso, se presenta de nuevo una segunda evaluación a la que se denominará *post-evaluación*; ambas referidas al “antes” y al “después” del proceso de gestión de confiabilidad operacional.

De esta manera se plantea la necesidad de establecer criterios de evaluación que sirvan de agentes comparativos en el proceso, para ello existen diversos indicadores simples y compuestos que permiten determinar niveles de Efectividad, Rendimiento, Costo y Seguridad, etc.

Por otra parte los índices básicos de confiabilidad operacional son representados por la Confiabilidad, la Disponibilidad, la Mantenibilidad y el Riesgo. La aplicación de estos índices permite visualizar el comportamiento de un activo; bien sea su frecuencia de fallas, tiempo de restitución, tiempo de disponibilidad, costos de penalización, criticidad, etc. Por lo que se requiere pericia en su determinación e interpretación para llegar a una toma de decisiones.

En el caso del modelo propuesto en se tomaron en cuenta los siguientes indicadores:

- ✓ *Índice de Confiabilidad*: indica la probabilidad de que un activo opere sin fallar durante un intervalo de tiempo determinado bajo un contexto operacional específico.
- ✓ *Índice de Disponibilidad*: indica la probabilidad de que un activo esté en capacidad de cumplir su función en el momento que se requiera.
- ✓ *Tiempo Promedio Operativo*: Indica en tiempo entorno al cual se comporta en activo en estado de operación.
- ✓ *Tiempo Promedio Fuera de Servicio*: Indica el tiempo entorno al cual se mantiene el activo sin operar. Aquí se considera el tiempo promedio para reparar.
- ✓ *Tiempo Promedio Entre Fallas*: Indica el tiempo entorno al cual se presentan dos fallas consecutivas sobre el activo.

4.1.- INSTRUMENTO PARA ESTIMAR ÍNDICES BASICOS DE EVALUACIÓN

Para la determinación de los índices básicos de evaluación, se diseñó el programa **Icd2000** (Índices de Confiabilidad y Disponibilidad) bajo ambiente de Excel. En éste se integran una serie de conceptos referentes tanto al área de confiabilidad, como al área de las matemáticas estadísticas.

El propósito del programa **Icd2000**, es determinar a través de una serie de datos correspondientes a un activo específico: la confiabilidad, la disponibilidad, el tiempo promedio operativo, el tiempo promedio fuera de servicio, el tiempo promedio entre fallas y otros parámetros que sirvan de información en un análisis minucioso del mismo, tales como: parámetro de forma, vida característica, tasa de fallas, número de fallas, etc.

4.1.1.- ESTIMACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DEL ACTIVO

La confiabilidad, intrínsecamente hablando la definimos como probabilidad de que un activo opere sin fallar en un intervalo de tiempo determinado y bajo condiciones específicas. El hecho de relacionar el concepto de probabilidad en este campo, conlleva a la aplicación de métodos estadísticos

En la base de cálculos que se desarrolló para el proceso de evaluación de los índices dentro del proceso de gestión se tomaron en cuenta los modelos estadísticos más idóneos para el tipo de data que se va a manipular.

Principalmente se adoptaron tres modelos estadísticos para la determinación de la confiabilidad individual del activo: distribución de *Weibull*, distribución *Exponencial*, distribución *Log-Normal*. Luego se aplicaron las propiedades de la confiabilidad para la estimación de ésta en sistemas en serie, sistemas en paralelo y sistemas con equipos en standby.

4.1.1.1.- CONFIABILIDAD SEGÚN LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

La distribución de Weibull $R(t) = \exp -(t/\eta)^\beta$, en comparación con otros modelos estadísticos se ajusta mejor al comportamiento real de un **equipo rotativo** (no exclusivamente). Esto se debe a que los parámetros η y β son respectivamente la vida característica y el parámetro de forma que permiten a la distribución tomar diversas formas, logrando de esta manera la adaptabilidad a diversas condiciones. t es el tiempo en el cual se desea estimar la confiabilidad.

El parámetro de forma (β) y la vida característica(η) se modelaron en base a los tiempos operativos del activo a través del método numérico de “chi cuadrado”, llegándose a las expresiones mostradas en la Lámina 3. Donde n es el número de evento específico, N el número total de eventos y t_i es el tiempo operativo en cuestión.

$$\eta = \exp \left(\frac{\sum \left(\frac{N}{\frac{\ln \left(\frac{1}{1 - \frac{n}{N+1}} \right)}{\ln(t_i)}} \times \ln(t_i) \right) - \sum \left(\frac{\ln \left(\frac{1}{1 - \frac{n}{N+1}} \right)}{\ln(t_i)} \right) \times \ln(t_i)}{\sum \left(\frac{\ln \left(\frac{1}{1 - \frac{n}{N+1}} \right)}{\ln(t_i)} \right) - \ln(t_i) - \sum \left(\frac{\ln \left(\frac{1}{1 - \frac{n}{N+1}} \right)}{\ln(t_i)} \right) \times \ln(t_i)} \right) \quad (\text{EC. 1})$$

Expresión de la vida característica a través del método de “chi cuadrado”

$$\beta = \frac{\sum \left(\frac{\ln \left(\frac{1}{1 - \frac{n}{N+1}} \right)}{\ln(t_i)} \right)}{\left(\sum \frac{1}{\ln(t_i)} \right) - \left(\ln(\eta) \times \sum \left(\frac{1}{\ln(t_i)} \right) \right)} \quad (\text{EC. 2})$$

Expresión del parámetro de forma a través del método de “chi cuadrado”

LÁMINA 3: Expresiones resultantes

Una vez determinados estos factores, se modeló la confiabilidad usando la expresión de la distribución de Weibull, debido a que es la que más se ajusta al comportamiento real de equipos rotativos.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

(EC. 3)

Con esta expresión se pudo entonces determinar la confiabilidad en un tiempo específico “puntual” o bien, modelar el comportamiento de la confiabilidad en un intervalo de tiempo determinado, dándole valores a t .

El programa diseñado, muestra la confiabilidad en el tiempo puntual (al que se llamará *tiempo a evaluar*), la vida característica, el parámetro de forma y una curva que representa el comportamiento probable de la confiabilidad en un período de tiempo determinado.

4.1.1.2.- CONFIABILIDAD SEGÚN LA DISTRIBUCIÓN EXPONENCIAL

La distribución exponencial es la forma más general con la cual se modela la confiabilidad. Esta, se ajusta mejor al comportamiento real de un **equipo de instrumentación** debido a que el mismo presenta características muy análogas a las nominales. Es una expresión sencilla en la que se considera que la frecuencia de fallas es el inverso del tiempo promedio operativo, esto es:

$$TPO = \frac{1}{\lambda}$$

Donde **TPO** es el tiempo promedio operativo y λ es la frecuencia de fallas.

(EC. 4)

Cabe señalar que en la distribución exponencial el comportamiento de la tasa o frecuencia de fallas es constante por lo que la precisión de los resultados está en función de la “dureza” de los datos que se manejen, es decir el grado de veracidad de los mismos.

$$R(t) = \exp(-\lambda t)$$

(EC. 5)

El programa diseñado, muestra la confiabilidad en el tiempo puntual al que se ha llamado *tiempo a evaluar*, la frecuencia de fallas, el número de fallas probables desde que arranca el activo hasta el tiempo a evaluar y

una curva que representa el comportamiento probable de la confiabilidad en un período de tiempo determinado.

El número de fallas probables desde el arranque del activo hasta el tiempo a evaluar se determinó a través de la ecuación siguiente:

$$N = \lambda \times t \quad (\text{EC. 6})$$

Siendo **N** el número de fallas, **λ** la frecuencia de fallas y **t** el tiempo a evaluar.

4.1.1.3.- CONFIABILIDAD SEGÚN LA DISTRIBUCIÓN LOG-NORMAL

La distribución de Log-Normal en comparación con otros modelos estadísticos, se ajusta mejor al comportamiento real de un **equipo estático** (no exclusivamente). Esto se debe a que su decrecimiento es lento tal como se suele presentar en el proceso de deterioro de este tipo de equipos.

La expresión general para el cálculo de la confiabilidad a través de la distribución Log-Normal, viene dada por la integral:

$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\delta \cdot t \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \frac{(\ln(t) - \alpha)^2}{\delta^2}} dt \quad (\text{EC. 7})$$

Donde **α** se calcula con la expresión:

$$\alpha = e^{\mu + \frac{1}{2} \cdot \sigma^2} \quad (\text{EC. 8})$$

Y **δ** se determina con la ecuación:

$$\delta^2 = e^{2 \cdot \mu + \sigma^2} \cdot (e^{\sigma^2} - 1) \quad (\text{EC. 9})$$

Es importante destacar que μ y σ son respectivamente la media y la desviación estándar del logaritmo natural de la data.

Si se observa cuidadosamente la función densidad que está dentro de la integral, se advertirá que dicha función no está definida para un t igual a cero; además la integral es impropia. Esto condujo a una serie de condiciones iniciales que se tomaron en cuenta en el momento de aplicar métodos numéricos para su solución.

En primer lugar se planteó que en la realidad, no se puede considerar un tiempo infinito, esto es porque no quedaría definido un rango de evaluación. Por otra parte, en el arranque de un equipo no se puede precisar que es exactamente $t = 0$ al momento de su inicio.

Estos argumentos sustentan las condiciones siguientes:

- ✓ La integral se definirá en un límite inferior t tal que $t \geq 0,0001$ unidades.
- ✓ La integral se definirá en límite superior a donde se cumple que: $a \leq 1000000$ de unidades.

De esta forma queda la expresión:

$$R(t) = \int_t^a \frac{1}{\delta \cdot t \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \frac{(\ln(t) - \alpha)^2}{\delta^2}} dt \quad (\text{EC. 10})$$

La técnica de integración empleada fue la regla de Simpson's, la cual se expresa como:

$$\int_a^b f(x) dx \approx \left(\frac{b-a}{3n} \right) \cdot [y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + 2y_4 + \dots + 2y_{n-2} + 4y_{n-1} + y_n] \quad (\text{EC. 11})$$

Donde y_i representa la función evaluada en cada partición y n el número total de particiones.

El programa **Icd2000**, muestra la confiabilidad en el tiempo a evaluar y una curva que representa el comportamiento probable de la confiabilidad en un período de tiempo determinado.

4.1.2.- ESTIMACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE LOS SISTEMAS

Dentro de un análisis de confiabilidad, se puede considerar el activo a un nivel específico, por lo que es común conseguir un activo constituido por diversos sistemas de variable grado de complejidad.

El programa elaborado ejecuta el análisis de sistemas sencillos a través de diagramas de bloques, que al combinarlos pueden resultar tan complejos como se requiera, estos son:

- ✓ Sistemas con configuración en serie,
- ✓ Sistemas con configuración en paralelo (todos activos)
- ✓ Sistemas con configuración en paralelo (con un componente en standby)

4.1.2.1.- CONFIGURACIÓN EN SERIE

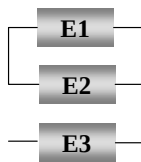


Fig. 27 Configuración en Serie

Representa la configuración más sencilla y su característica es que la pérdida de la función de un componente, implica la pérdida de la función del sistema. Generalmente este tipo de arreglo genera niveles de confiabilidades bajos en comparación con otros.

La expresión matemática usada en el programa, es la que define la confiabilidad para este tipo de configuración, mostrada a continuación:

$$R(t) = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_n \quad (\text{EC. 12})$$

El enunciado de esta ley es: La confiabilidad total de un sistema cuyos componentes están arreglados en serie, viene dado por el producto de las confiabilidades parciales de los mismos.

4.1.2.2.- CONFIGURACIÓN EN PARALELO (Todos los equipos Activos)

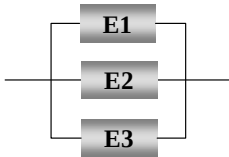


Fig. 28 Configuración en paralelo

Representa una configuración muy común dentro de la industria. Su característica principal es que aún cuando un componente presente una pérdida total de la función, el sistema puede seguir funcionando aunque por debajo de las exigencias del contexto operacional. Generalmente este tipo de arreglo genera niveles de confiabilidad medios en comparación con otros.

La expresión matemática usada en el programa, es la que define la confiabilidad para este tipo de configuración, la cual es mostrada a continuación:

$$R(t) = 1 - ((1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \cdot \dots \cdot (1 - R_n)) \quad (\text{EC. 13})$$

4.1.2.3.- CONFIGURACIÓN EN PARALELO (Con un componente en standby)

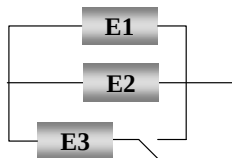


Fig.29 Configuración en paralelo con un componente en standby

Esta configuración se presenta cuando el contexto operacional exige una mayor confiabilidad que la que pudiese ofrecer un arreglo normal. La presencia de un componente en standby, disminuye la probabilidad de pérdida de la función del sistema, debido a que al fallar uno de ellos el componente en standby actuará en su lugar.

Para definir la expresión matemática usada en el programa se consideró que el sistema actuará como *perfect swtching*, es decir, que el tiempo de respuesta del componente en standby en el momento de falla, es despreciable. Dicha expresión viene dada por:

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda \cdot t)^i}{i!} \quad (\text{EC. 14})$$

Donde λ es la frecuencia de fallas promedio de las frecuencias de fallas parciales de los componentes del sistema, esto es:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{n} \quad (\text{EC. 15})$$

n es el número de componentes del sistema.

4.1.3.- ESTIMACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DEL ACTIVO

La disponibilidad, se define como la probabilidad de que un activo se encuentre en capacidad de cumplir una función determinada en el momento requerido, esto conlleva al involucramiento tanto del tiempo de operación como el tiempo fuera de servicio.

Para el desarrollo de la base de cálculos, se empleó la definición operacional de la disponibilidad expresada como:

$$A = \frac{TPO}{TPO + TPFS} \quad (\text{EC. 16})$$

Nótese que la disponibilidad está en función del tiempo promedio operativo (TPO) y del tiempo promedio fuera de servicio, por lo que ésta puede evaluarse exclusivamente para un rango de tiempo determinado.

4.1.4.- ESTIMACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE LOS SISTEMAS

Análogamente al cálculo de confiabilidad, se estableció el análisis de disponibilidad para sistemas que presenten a través de diagramas de bloques configuraciones sencillas, cuyas combinaciones pueden variar el grado de complejidad de éstos. Nuevamente se tomó en cuenta las configuraciones clásicas ya descritas anteriormente.

En el caso de sistemas cuyos componentes estén en serie, se utilizó la siguiente expresión general:

$$A = \prod_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i} \quad (\text{EC. 17})$$

Donde μ es el inverso del tiempo promedio fuera de servicio, esto es:

$$\mu = \frac{1}{TPFS} \quad (\text{EC. 18})$$

En el caso de sistemas cuyos componentes estén en paralelo, se usó la siguiente expresión general:

$$A = 1 - \prod_{i=1}^n 1 - \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} \quad (\text{EC. 19})$$

En el caso de sistemas cuyos componentes estén en paralelo con uno de ellos en standby, se utilizó la expresión siguiente:

$$A = \frac{\mu^n + \mu^{n-1}\lambda + \mu^{n-2}\lambda^2 + \dots + \mu^1\lambda^{n-1}}{\mu^{n-1}\lambda + \mu^{n-2}\lambda^2 + \dots + \mu^1\lambda^{n-1} + 2\lambda^n} \quad (\text{EC. 20})$$

4.1.5.- ESTIMACIÓN DE LOS TIEMPOS PROMEDIOS BÁSICOS DEL ACTIVO

Para la observación del comportamiento de un equipo durante su vida útil e incluso para el análisis de disponibilidad del mismo y en algunos casos en un análisis de confiabilidad*, se requiere determinar los tiempos promedios.

En el programa desarrollado se estiman los tres tiempos promedios fundamentales, estos son:

TPO = Tiempo promedio operativo, (promedio de todos los TPO parciales)

TPFS= Tiempo promedio fuera de servicio, (promedio de todos los TPFS parciales)

TPEF= Tiempo promedio entre fallas (viene dado por la suma de los dos anteriores)

De esta manera queda estructurado el instrumento que servirá para medir los índices básicos dentro de las fases de evaluación en el proceso de gestión de confiabilidad operacional.

En el capítulo siguiente se mostrará un apéndice sobre el uso del programa **Icd2000**.

En la sección de anexos se muestra un caso real donde se utilizó el programa Icd2000 en la evaluación de la confiabilidad y disponibilidad de equipos.

* En algunos casos cuando no se dispone del valor de la vida característica, ésta se aproxima al tiempo promedio operativo (TPO).

CAPÍTULO V

*No encuentres la falta, encuentra el remedio....
Henry Ford*

5.- ANÁLISIS SISTEMÁTICO PARA LA ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE CONFIABILIDAD Y DISPONIBILIDAD. (Manual para el uso del programa ICD2000)

Presentado el basamento matemático sobre el cual se apoya el programa diseñado **ICD2000** como herramienta útil para el cálculo de índices de confiabilidad y disponibilidad de activos.

A continuación se presenta una breve descripción de los pasos a seguir para el uso adecuado y eficaz de dicho programa.

5.1.- ENTRADA AL PROGRAMA ICD2000

El programa ICD2000 es un paquete que consta de tres archivos individuales, cuya utilidad variará según un análisis específico.

Cuando se cargue el programa a la computadora, se hará en forma directa a través de una carpeta general denominada Icd2000 tal como se muestra en la Figura 32. Esta carpeta contendrá tres archivos de aplicación en Excel:

- ✓ CONDISMAN 001.xls
- ✓ CONDISMAN 002.xls
- ✓ CONDISMAN 003.xls

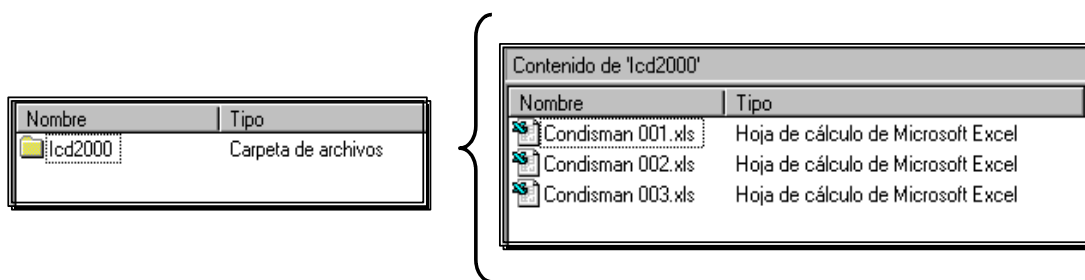


Fig. 32.- Carpeta Icd2000 con el contenido de archivos .xls

5.2.- ARCHIVO “CONDISMAN 001.xls”

Este archivo se inicia con una presentación en Excel (véase Fig.33), que muestra una ventana donde se ingresarán los datos necesarios para el análisis. Una característica de esta sección es que permite el estudio de la confiabilidad a través del modelo estadístico con distribución Weibull o bien, con distribución exponencial.

Cálculo de Confiabilidad y Disponibilidad PDVSA INTEVEP

Datos de Entrada a ser introducidos:
 n: Número de eventos en orden ascendente / Número máximo de eventos: 100.
 TO: Tiempo operativo.
 TFS: tiempo fuera de servicio.
 Tiempo (t) en el que se evaluará la confiabilidad / Horas, Días, Semanas y Meses.
 Nombre del equipo a ser evaluado.
 Período en el cual se recopiló la data utilizada.

Los resultados se presentan en la hoja: Result.1

Datos de Entrada

#	TO	TFS	Falla Asociada a:
1	1581.33	12.75	ALT.PRES.DESCG.
2	357.88	13.75	D/P DE SUCCION
3	246.25	1.25	D/P DE SUCCION
4	588.58	18.58	VARIACION RPM
5	1423.33	6.25	ALT.PRES.GASODU
6	777.5	8.67	PARO.EMERG.LOCA
7	118.84	8.58	DAJ.PRES.SUCCI.
8	172.33	8.17	ALT.MIV.LIQUID.
9	471.58	12.5	DAJ.PRES.ACEITE
10	72.42	2.88	FALLA ELECTRICA
11	542.83	8.17	ALT.TEMP.DESCA.
12	33.34	5.83	ALT.TEMP.DESCA.
13	113.75	2.75	DAJ.MIV.ENFRIAD
14	2.75	2.75	DAJ.MIV.ENFRIAM
15	8.58	16.83	FALLA VARILLA
16	134.75	2.25	ALT.TEMP.EN C/C
17	217	8.75	ALT.TEMP.C/C

Equipo CG/PCJUS6/C2

tiempo a Evaluar (t) = 744

Elige el valor de la opción marcada con una "X"

tipo de Distribución

Weibull	X
Exponencial	

de fallas presente: 45

Entrada1 Result.1 X

Fig.33.- Ventana de inicio a CONDISMAN 001.xls

5.2.1.- INGRESO DE DATOS A “CONDISMAN 001.xls”

Los datos principales para la aplicación del programa (véase Fig. 34-a), serán almacenados en una hoja llamada **Entrada 1** (véase en la parte inferior izquierda de la Fig. 33). Estos datos son los siguientes:

- ✓ **n** es el número correspondiente a un evento o intervención sobre el activo en un período determinado. (el programa acepta un límite de 100 eventos).
- ✓ **TO** es el tiempo durante el cual operó el activo hasta presentarse el evento correspondiente.
- ✓ **TFS** es el tiempo que demoró el activo desde el momento en el cual se presentó el evento, hasta su puesta en marcha.
- ✓ **Falla Asociada** es el modo de falla relacionado con el evento.

Datos de Entrada (Equipo)			
n	TO	TFS	Falla Asociada a:
1	112,33	3	FIPO
2	157,5	8,42	FIPO
3	22,25	1,83	FIPO
4	75,83	1,83	FIPO
5	155,32	0,17	FIPS
6	2,58	0,75	FIPS
7	1,67	2,5	FIPE
8	44,5	3,5	FIPE
9	154,67	8,5	FIPS
10	27,67	4,33	FIPE

Fig. 34-a. Entrada de datos

Es importante verificar que el número de eventos corresponde al número total de los datos restantes.

La precisión de los resultados es directamente proporcional al número de datos que sean ingresados y a la veracidad de los mismos.

Los datos secundarios que se requieren para el análisis, son aquellos de carácter más específico, bien sea para el cálculo de confiabilidad o el cálculo de disponibilidad (véase Fig. 34-b). Estos datos son:

- ✓ **Equipo** se representa a través de la simbología utilizada en inventario.
- ✓ **Tiempo a evaluar** es el tiempo puntual en el cual se desea calcular la confiabilidad del activo, este dato debe ir acompañado de la especificación de la

unidad de tiempo a utilizar. Los resultados que arrojará el programa serán expresados bajo las unidades de los datos de entrada.

- ✓ **Tipo de Distribución** representa el tipo de modelo de distribución estadística bajo el cual se analizarán los datos. (Para este caso Weibull o Exponencial).

Equipo: FCC/BACRP5/B2

Tiempo a Evaluar (t) = 10

Horas =
Días =
Semanas =
Meses = X

Elija sólo una de las opciones marcando con una "X"

Tipo de Distribución

Weibull
Exponencial X

Confiability

Fig. 34-b. Entrada de datos

Con este conjunto de datos, el programa está en capacidad de realizar el análisis de confiabilidad.

Por otra parte, para poder realizar el análisis de disponibilidad del activo, es necesario definir el período de tiempo que se tomó en cuenta para evaluar dicho indicador.

Con el ingreso del total de los eventos, el programa ya dispone automáticamente del número total de fallas y lo indica por medio de la celda “N° de fallas presentes”(véase Fig. 34-c).

Con estos datos, el programa realizará el análisis de disponibilidad requerido.

También en esta ventana se presentará una sección que permite el cálculo “puntual” de la confiabilidad usando particularmente la distribución de **Weibull** sin necesidad de ingresar todos los datos explicados anteriormente. Esto se puede lograr si se posee el valor del parámetro de forma y de la vida característica. Tal como se muestra en la Fig. 35, el programa preguntará si se

N° de fallas presentes = 51

Período evaluado:

desde: 17 / 1 / 1999

hasta: 23 / 1 / 2000

Disponibilidad

Fig. 34-c. Entrada de datos

conocen estos valores. De ser afirmativa la respuesta, éste pedirá que los cargue a la celda correspondiente e ingrese el tiempo a evaluar con la indicación de la unidad a utilizar. Posteriormente arrojará como resultado el valor de la confiabilidad.

Este tipo de cálculo ayuda a agilizar el proceso de estimación del índice, la desventaja es que si no se tiene un valor transparente de los parámetros, pudiese arrojar un valor muy distinto al valor real de la confiabilidad.

Hasta aquí se cumple el proceso de ingreso de datos necesarios para un completo análisis de índices de confiabilidad, disponibilidad y tiempos promedios que servirán de apoyo a la toma decisiones sobre el activo en estudio.

¿Conoce Usted Inicialmente el Parámetro de Forma y la vida característica del equipo?

Si / No ☒ Si

Entonces ingrese los valores

Parámetro de Forma	0.76102	
Vida Característica	108.49	(Aprox.TPO)
Tiempo a Evaluar (t)	10	

Elija sólo una de las 4 opciones marcando con una "X"

Horas =	
Días =	
Semanas =	
Meses =	X

Confiabilidad $R(t)$	= 0.8496358
Confiabilidad $R(t)$ %	= 84.96 %
Correspondiente a T =	10 Mes(es)

Fig. 35- Opción de cálculo breve de confiabilidad en forma puntual.

5.2.2.- RESULTADOS DE “CONDISMAN 001.xls”

Cuando se hayan ingresado todos los datos necesarios, pueden observarse los resultados haciendo click en la siguiente hoja denominada **Result.1.**(véase en la parte inferior izquierda de la Fig. 33).

Esta nueva ventana muestra los resultados del análisis en varias áreas:

5.2.2.1.- ÁREA DE RESULTADOS POR EQUIPO

En esta área se presenta:

- ✓ El valor de la confiabilidad para el tiempo a evaluar específico.
- ✓ El valor de la disponibilidad para el período específico.
- ✓ El valor del tiempo promedio operativo (TPO).

- ✓ El valor del tiempo promedio fuera de servicio (TPFS).
- ✓ El valor del tiempo promedio entre fallas (TPEF).
- ✓ El número de fallas totales.
- ✓ El parámetro de forma.(En Weibull)
- ✓ La vida característica.(En Weibull)
- ✓ Tasa de fallas.(En exponencial)
- ✓ N° total de fallas.(En Weibull)

Adicionalmente se presenta el comportamiento probable en el tiempo de la confiabilidad, según los datos suministrados; esto es a través de una gráfica modelada con la distribución seleccionada previamente.(véase Fig. 37).

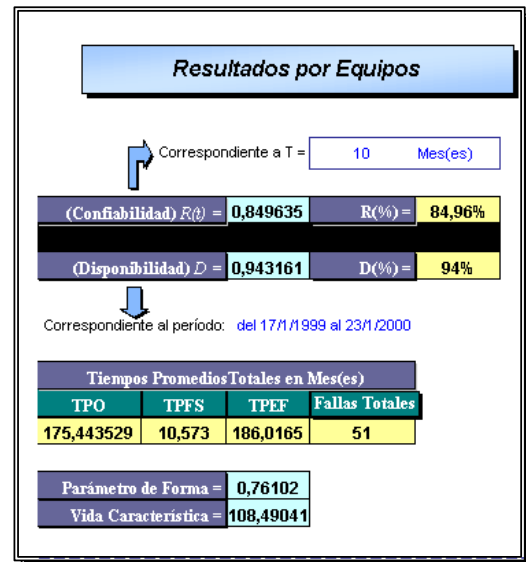


Fig. 36.- Resultados de CONDISMAN 001 por equipo

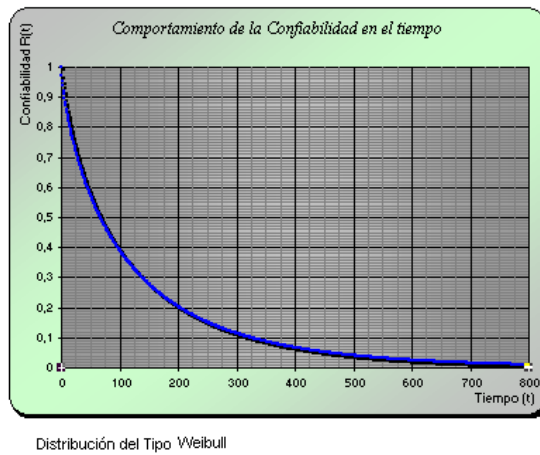


Fig. 37.- Gráfica de Confiabilidad vs Tiempo

Cabe destacar que la escala de estas gráficas pueden ser modificadas por el usuario, haciendo click sobre los rótulos de sus ejes. De esta forma se podrá ajustar el rango de observación a un intervalo de tiempo determinado.

También se muestra una gráfica que presenta el comportamiento del tiempo fuera de servicio a lo largo del período evaluado, con respecto a un promedio del mismo. (véase Fig. 38).

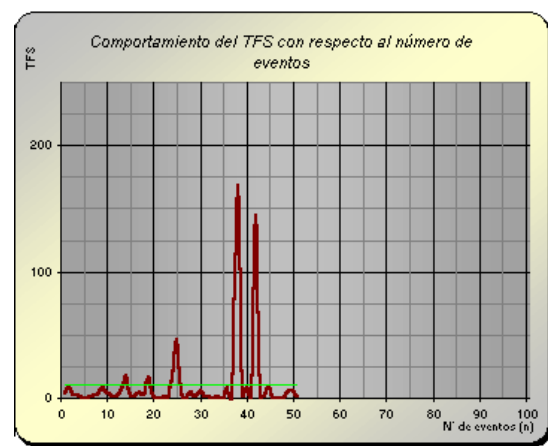


Fig. 38.- Gráfica de TFS vs N° de eventos

5.2.2.2.- ÁREA DE RESULTADOS POR COMPONENTES

Los resultados que presenta el programa en esta sección, están relacionados a los modos de fallas asociados al evento. Se le ha denominado resultados por componentes porque se puede definir el modo de falla en forma genérica, asociándolo a un componente específico del equipo que se está analizando.

Los resultados que muestra esta sección son (véase Fig. 39)

Resultados por Componentes						Correspondiente al período del 17/11/1999 al 23/11/2000					
Falla Asociada a:	TPFS	#Fallas	Falla Asociada a:	TPFS	#Fallas	Falla Asociada a:	TPO	Falla Asociada a:	TPO	Indisponibilidad de cada Componente	
FIPO	4,18	13				FIPO	688,278			FIPO	0,00604
FIPO	4,18	13				FIPO	688,278			FIPO	0,00604
FIPO	4,18	13				FIPO	688,278			FIPO	0,00604
FIPO	4,18	13				FIPO	688,278			FIPO	0,00604
FIPS	13,7925	4				FIPS	2236,91			FIPS	0,00613
FIPS	13,7925	4				FIPS	2236,91			FIPS	0,00613
FIPE	4,12091	11				FIPE	813,42			FIPE	0,00504
FIPE	4,12091	11				FIPE	813,42			FIPE	0,00504
FIPS	13,7925	4				FIPS	2236,91			FIPS	0,00613

Fig. 39.- Resultados por componentes

- ✓ **(TPFS)** Tiempo promedio fuera de servicio asociado al componente o al modo de falla.
- ✓ **(TPO)** Tiempo promedio operativo asociado al componente o al modo de falla.
- ✓ **(#Fallas)** Número de fallas por componente o por modo de falla
- ✓ **Indisponibilidad** causada por cada modo de falla o por fallas de cada componente durante el período de evaluación.

Es importante aclarar que la suma total de las indisponibilidades parciales de cada componente o modo de falla es igual a la diferencia entre la disponibilidad del equipo y la unidad (véase la sección de equipo Fig. 36), es decir, lo que resta para alcanzar una disponibilidad del 100%.

Por otra parte, cuando un modo de falla es recurrente o cuando una falla es causada varias veces por un mismo componente del equipo, entonces los resultados de éstos

aparecerán tantas veces en la zona de resultados como número de fallas causadas por ellos existan. Un ejemplo de esto se muestra en la Fig. 39 cuando el modo de falla “FIPO” aparece tantas veces como fallas producidas por él. (esta figura no muestra toda la lista por su gran longitud).

5.3.- ARCHIVO “CONDISMAN 002.xls”

Este archivo se inicia con una presentación en Excel (véase Fig.40), que muestra una ventana donde se ingresarán los datos necesarios para el análisis. Una característica de esta sección es que permite el estudio de la confiabilidad a través del modelo estadístico con distribución Log-Normal exclusivamente.

Cálculo de Confiabilidad y Disponibilidad 

Datos de Entrada a ser introducidos:
 n: Número de eventos en orden ascendente / Número máxima de eventos: 100.
 TO: Tiempo operativo.
 TFS: tiempo fuera de servicio.
 Tiempo (t) en el que se evaluará la confiabilidad / Horas, Días, Semanas y Meses.
 Nombre del equipo a ser evaluado.
 Período en el cual se recopiló la data utilizada.

Los resultados se presentarán en la hoja:
 Result.1

Datos de Entrada

n	TO	TFS	Falla Asociada a:
1	98	1	LAN
2	78	3	DJR
3	56	2	REC
4	68	6	WIF
5	59	4	KSI
6	60	7	IVN
7	79	2	WPI
8	80	8	KDI
9	55	7	PSA
10	60	3	PPH
11	86	7	WLD
12	95	38	UIJ
13	96	26	UIJ
14	75	38	SLF
15	58	5	WVP
16	68	7	SLF
17	75	1	DL

Equipo CG/PCJUS6/C2

tiempo a Evaluar (t) = 48

Elija sólo una de las opciones marcando con una "X"

Horas:	
Días:	X
Semanas:	
Meses:	

tipo de Distribución

Log-Normal	X
------------	---

de fallas presente: 20

Confiabilidad

Entrada1 Result.1 / Y / X

Fig.40.- Ventana de inicio a CONDISMAN 002.xls

5.3.1.- INGRESO DE DATOS A “CONDISMAN 002.xls”

Los datos principales para la aplicación del programa serán almacenados en una hoja llamada **Entrada 1** (véase en la parte inferior izquierda de la Fig. 40). Estos datos son los siguientes: (véase Fig. 41-a).

- ✓ **n** es el número correspondiente a un evento o intervención sobre el activo en un período determinado. (el programa acepta un límite de 100 eventos).
- ✓ **TO** es el tiempo durante el cual operó el activo hasta presentarse el evento correspondiente.
- ✓ **TFS** es el tiempo que demoró el activo desde el momento en el cual se presentó el evento, hasta su puesta en marcha.
- ✓ **Falla Asociada** es el modo de falla relacionado con el evento.

Datos de Entrada (Equipo)			
n	TO	TFS	Falla Asociada a:
1	112,33	3	FIPO
2	157,5	8,42	FIPO
3	22,25	1,83	FIPO
4	75,83	1,83	FIPO
5	155,92	0,17	FIPS
6	2,58	0,75	FIPS
7	1,67	2,5	FIPE
8	44,5	3,5	FIPE
9	154,67	8,5	FIPS
10	27,67	4,33	FIPE

Fig. 41-a. Entrada de datos

Es importante verificar que el número de eventos corresponde al número total de los datos restantes.

La precisión de los resultados es directamente proporcional al número de datos que sean ingresados y a la veracidad de los mismos.

Los datos secundarios que se requieren para el análisis, son aquellos de carácter más específico, bien sea para el cálculo de confiabilidad o el cálculo de disponibilidad. Estos datos son: (véase Fig. 41-b).

- ✓ **Equipo** se representa a través de la simbología utilizada en inventario.
- ✓ **Tiempo a evaluar** es el tiempo puntual en el cual se desea calcular la confiabilidad del activo, este dato debe ir acompañado de la especificación de la

unidad de tiempo a utilizar. Los resultados que arrojará el programa serán expresados bajo las unidades de los datos de entrada.

Confiabilidad

Elija sólo una de las opciones marcando con una "X"

Tiempo a Evaluar (t) =	40
Días =	
Semanas =	
Meses =	X
Años =	

Tipo de Distribución	
Log-Normal	X

Fig. 41-b. Entrada de datos

Con este conjunto de datos, el programa está en capacidad de realizar el análisis de confiabilidad.

Por otra parte, para poder realizar el análisis de disponibilidad del activo, es necesario definir el período de tiempo que se tomó en cuenta para evaluar dicho indicador.

Con el ingreso del total de los eventos, el programa ya dispone automáticamente del número total de fallas y lo indica por medio de la celda “N° de fallas presentes”.(véase Fig. 41-c)

Con estos datos, el programa realizará entonces el análisis de disponibilidad requerido.

Disponibilidad

N° de fallas presentes = 51

Período evaluado:

desde: 17 / 1 / 1999

hasta: 23 / 1 / 2000

Fig. 41-c. Entrada de datos

5.3.2.- RESULTADOS DE “CONDISMAN 002.xls”

Cuando se hayan ingresado todos los datos necesarios, pueden observarse los resultados haciendo click en la siguiente hoja denominada **Result.1**.(véase en la parte inferior izquierda de la Fig. 40)

Esta nueva ventana muestra los resultados del análisis en varias áreas:

5.3.2.1.- ÁREA DE RESULTADOS POR EQUIPO

En esta área se presenta:

- ✓ El valor de la confiabilidad para el tiempo a evaluar específico.
- ✓ El valor de la disponibilidad para el período específico.
- ✓ El valor del tiempo promedio operativo (TPO).
- ✓ El valor del tiempo promedio fuera de servicio (TPFS).
- ✓ El valor del tiempo promedio entre fallas (TPEF).

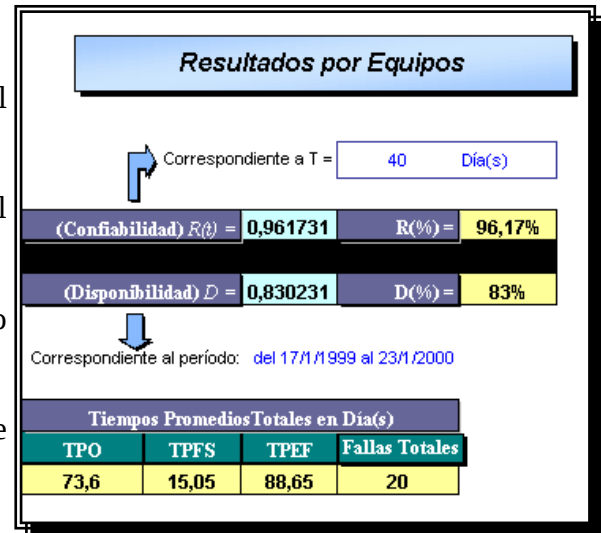


Fig. 42.- Resultados de CONDISMAN 002 por equipo

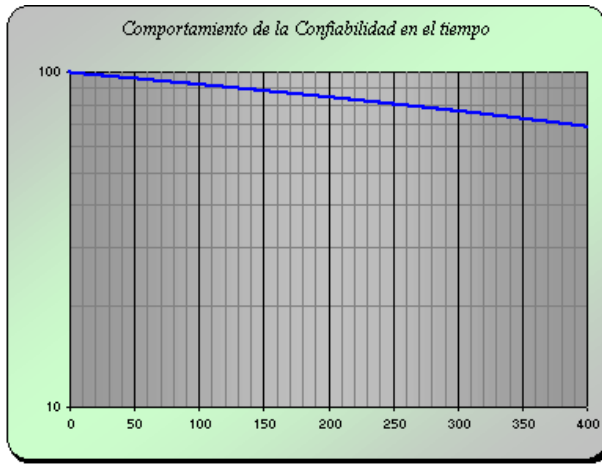


Fig. 43.- Gráfica de Confiabilidad vs Tiempo

Adicionalmente se presenta el comportamiento probable de confiabilidad en el tiempo, según los datos suministrados; esto es a través de una gráfica modelada con la distribución Log-Normal .(véase Fig. 43).

También se muestra una gráfica que presenta el comportamiento del tiempo fuera de servicio a lo largo del período evaluado, con respecto a un promedio del mismo. (véase Fig. 44).

Cabe destacar que la escala de estas gráficas pueden ser modificadas por el usuario, haciendo click sobre los rótulos de sus ejes. De esta forma se podrá ajustar el rango de observación a un intervalo de tiempo determinado.

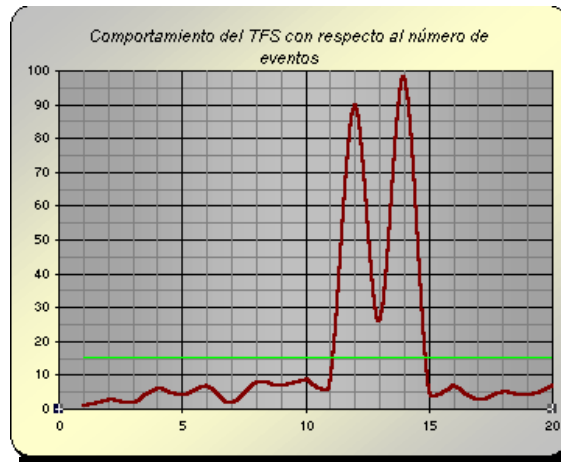


Fig. 44.- Gráfica de TFS vs N° de eventos

5.3.2.2.- ÁREA DE RESULTADOS POR COMPONENTES.

Los resultados que presenta el programa en esta sección, están relacionados a los modos de fallas asociados al evento. Se le ha denominado resultados por componentes porque se puede definir el modo de falla en forma genérica, asociándolo a un componente específico del equipo que se está analizando.

Los resultados que muestra esta sección son (véase Fig. 45) (esta figura no muestra toda la lista por su gran longitud).

Resultados por Componentes						Correspondiente al período del 17/11/1999 al 23/11/2000					
Falla Asociada a:	TPFS	#Fallas	Falla Asociada a:	TPFS	#Fallas	Falla Asociada a:	TPO	Falla Asociada a:	TPO	Indisponibilidad de cada Componente	
LAN	1	1				LAN	1472			LAN	0,00068
DJR	3	1				DJR	1472			DJR	0,00203
ÑEO	2	1				ÑEO	1472			ÑEO	0,00136
WIF	6	1				WIF	1472			WIF	0,00406
KSI	4	1				KSI	1472			KSI	0,00271
IVH	7	1				IVH	1472			IVH	0,00473

Fig. 45.- Resultados por componentes

- ✓ **(TPFS)** Tiempo promedio fuera de servicio asociado al componente o al modo de falla.
- ✓ **(TPO)** Tiempo promedio operativo asociado al componente o al modo de falla.
- ✓ **(#Fallas)** Número de fallas por componente o por modo de falla
- ✓ **Indisponibilidad** causada por cada modo de falla o por fallas de cada componente durante el período de evaluación

Es importante aclarar que la suma total de las indisponibilidades parciales de cada componente o modo de falla es igual a la diferencia entre la disponibilidad del equipo y la unidad (véase la sección de equipo Fig. 36), es decir, lo que resta para alcanzar una disponibilidad del 100%.

Por otra parte, cuando un modo de falla es recurrente o cuando una falla es causada varias veces por un mismo componente del equipo, entonces los resultados de éstos aparecerán tantas veces en la zona de resultados como número de fallas causadas por ellos existan.

5.4.- ARCHIVO “CONDISMAN 003.xls”

Este archivo se inicia con una presentación en Excel (véase Fig.46). En ella se muestra una única ventana donde se ingresan los datos para un análisis de sistemas, bien sean en serie o en paralelo y automáticamente se obtienen los valores de confiabilidad y disponibilidad de los mismos.

La hoja que se presenta, tiene una capacidad de resolver sistemas con un número máximo de cinco equipos.

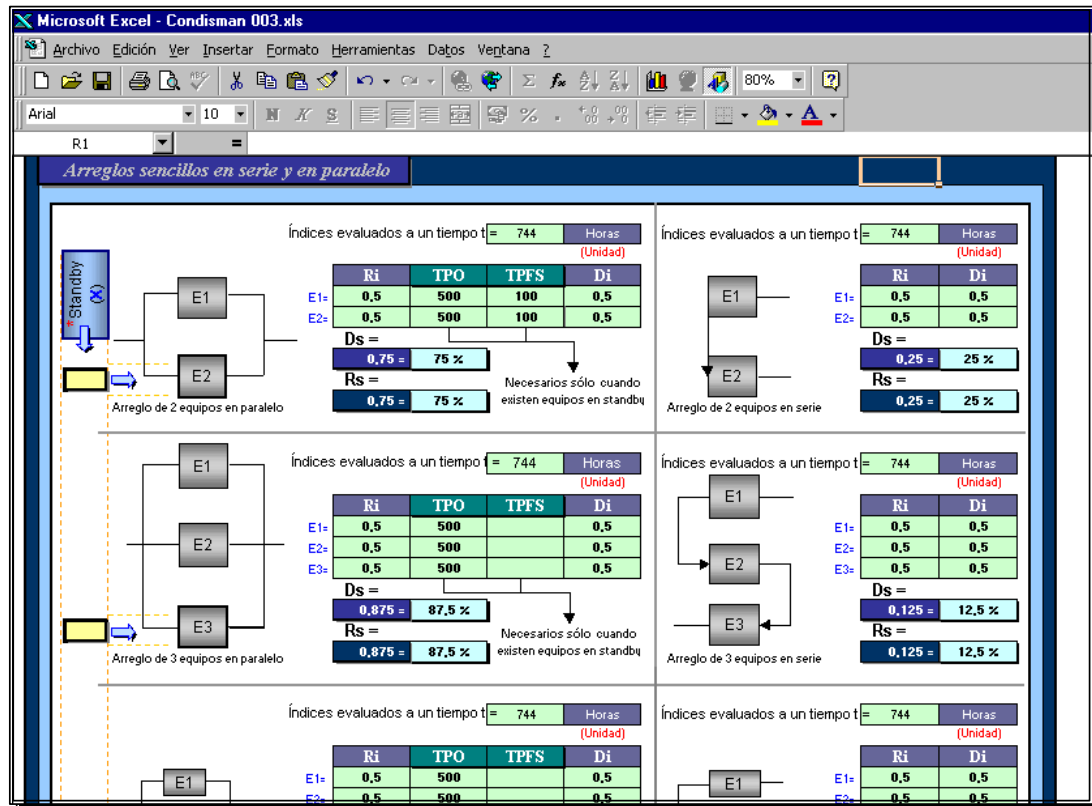


Fig.46.- Ventana de inicio a CONDISMAN 003.xls

5.4.1.- INGRESO DE DATOS Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS EN “CONDISMAN 003.xls”

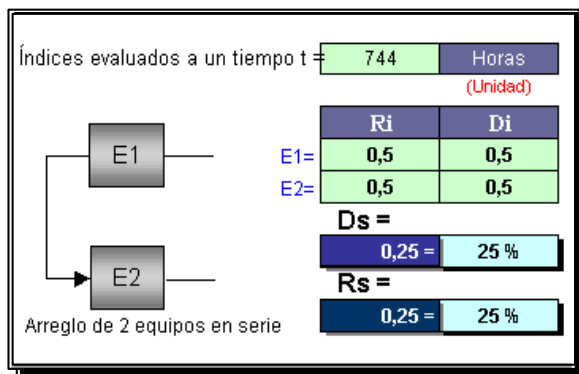


Fig. 47.- Cálculo de sistema en serie

Para el caso de sistemas que presentan un arreglo de componentes en serie, simplemente se ingresan los valores de confiabilidad de cada uno de ellos y automáticamente se obtendrá el valor de la confiabilidad de dicho sistema. (véase Fig. 47).

Para el caso de sistemas en paralelo, debe señalarse con una “x” (en el

extremo izquierdo de la zona), la condición del sistema; esto es, si el sistema contiene todos sus equipos activos o si posee un equipo en standby. (véase Fig. 48 y Fig. 49)

Colocar la “x” en la celda correspondiente, significa que existe un equipo en standby, pero si todos los equipos están activos entonces dicha celda debe estar libre de caracteres

Luego de especificar este punto, se deben ingresar los valores de confiabilidad, disponibilidad, tiempo promedio operativo y tiempo promedio fuera de servicio de cada uno de los componentes, y se obtendrá en forma instantánea los valores de confiabilidad y disponibilidad del sistema en estudio.

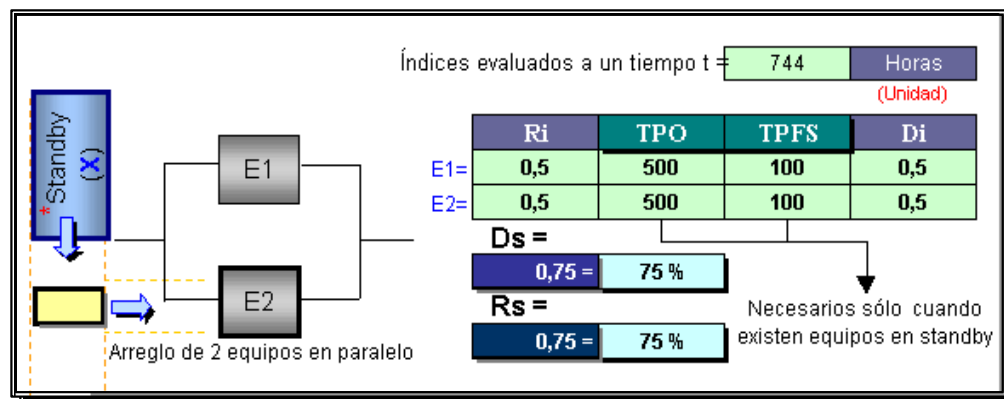


Fig. 48.- Cálculo de sistema en paralelo (todos los componentes activos)

El TPO y el TPFS serán necesarios sólo cuando existan equipos en standby en el sistema

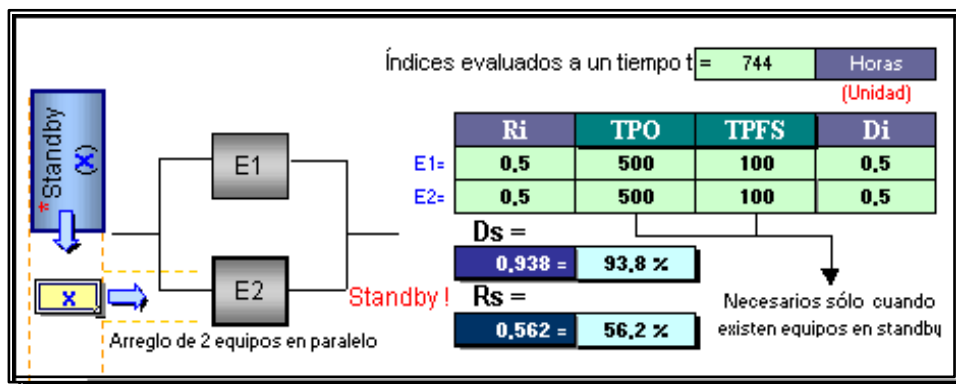


Fig. 49.- Cálculo de sistema en paralelo (Con un componente en standby)

CONCLUSIONES

- ✓ Todo proceso de gestión de confiabilidad debe ser evaluado a través de un instrumento idóneo para validar su eficiencia.
- ✓ La veracidad de un conjunto de resultados está en función de la precisión de los datos que se recopilen.
- ✓ Un índice de confiabilidad por si solo, no aporta información suficiente en la toma de decisiones, éste debe estar acompañado de información complementaria para tal fin.
- ✓ No se puede evaluar niveles de confiabilidad operacional con índices de disponibilidad, debido a que puede traer como consecuencia la toma de decisiones erróneas.

RECOMENDACIONES

1.- La aplicación del modelo propuesto, plantea un nuevo enfoque en el uso óptimo de herramientas de confiabilidad operacional y nuevas propuestas de programas de mantenimiento. Esto puede inducir a la poca aceptación de los resultados y las correcciones emitidas en aquellas instalaciones donde se implante. Por tanto se recomienda:

- ✓ Desarrollar un proceso de difusión a todos los niveles, donde se expliquen de forma sucinta el uso de las herramientas de confiabilidad operacional y los logros que se pueden alcanzar a través de las mismas.
- ✓ Establecer planes estratégicos de carácter corporativo para la implantación del modelo.
- ✓ Establecer programas de formación corporativa de especialistas en las distintas metodologías de confiabilidad operacional.
- ✓ Dar apertura a materias en el ámbito universitario que fomente el desarrollo de conocimientos de confiabilidad previos al campo profesional.

2.- Los resultados que aporta el programa **ICD2000** dependen de la calidad, cantidad y dispersión de los datos que le sean suministrados. El manejo ineficiente de éstos, pueden generar resultados poco confiables y trabajo extra. Por tanto se recomienda:

- ✓ Implantar talleres de adiestramiento sobre el uso eficiente del programa

- ✓ Establecer procedimientos que permitan recopilar de manera confiable la información necesaria para la aplicación del programa.
- ✓ Desarrollar un proceso efectivo de seguimiento de resultados.

BIBLIOGRAFÍA

TEXTOS

- 1.- BALESTRINI, Mirian. 1998. *Cómo Elaborar un Proyecto de Investigación*. Servicio Editorial, Venezuela.
- 2.- BARRINGER, Paul. 1993. Barringer & Associates, Inc. U.S.A.
- 3.- CHARLES EBELING. 1997. *Reliability and Maintainability Engineering*. McGraw-Hill, New York, USA.
- 4.- FIDIAS, Arias. 1999. *El Proyecto de Investigación*. Editorial Episteme, Caracas, Venezuela.
- 5.- HENLEY, Ernest. 1981. *Reliability Engineering and Risk Assessment*. Prentice-Hall, U.S.A.
- 6.- HURTADO, León. 1998. *Paradigmas y Métodos de Investigación en tiempos de cambio*. Episteme Consultores y Asociados C.A. Valencia, Venezuela.
- 7.- JACK R. BENJAMIN & C. ALLIN CORNELL. 1970 *Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers*. McGraw-Hill Publishing Company, New York, USA.
- 8.- MATALOBOS, Angel D. 1992. *Confiabilidad en Mantenimiento*. Ediciones IESA, Caracas, Venezuela.
- 9.- PATRICK D.T. & O'CONNOR. 1986 *Practical Reliability Engineering*. Editorial Jhon Wiley and Sons, New York, USA.

- 10.- SALAZAR VICTOR.1984 *Técnicas de Mantenimiento Organizado*. U.C.V. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Caracas, Venezuela.
- 11.- SMITH, Anthony. 1992. *Reliability Centered Maintenance*. Mc Graw Hill, New York, USA.
- 12.- SMITH, David 1999. *Reliability Maintainability and Risk*. Butterworth Heinemann, Boston.
- 13.- STUART, Alan & ORD Keith. 1987.*Advanced Theory of Statistics*. Oxford University Press. New York, USA.

PUBLICACIONES

- 1.- *Aplicación de la metodología OCR, uso efectivo de los software APT*.2000. PDVSA Exploración y Producción, Refinación, Intevep. Venezuela.
- 2.- *Beta mathematics handbook*. 1990. Second Edition, Studentlitteratur, London, England.
- 3.- *Curse of Root Cause Analysis*. 1998. Apollo Associated Services, Texas, USA.
- 4.- *Inspección Basada en Riesgos*.1998.Copyright, PDVSA-CIED .Baruta, Edo. Miranda, Venezuela.
- 5.- *Introducción a la Confiabilidad Operacional*. 1999. Grupo Corporativo Confiabilidad Operacional de PDVSA. PDVSA-CIED, Primera Edición, Venezuela.
- 6.- *Process Plant Reliability*. 1999. Conference and Exhibition, Asme International, U.S.A..