

Proceso de Análisis Integral de Disponibilidad y Confiabilidad como Soporte para el Mejoramiento Continuo de las Empresas

Ing. Rosendo Huerta
Director de Confiabilidad – John Crane Latin America
E-mail: rhuerta@johncrane.com, huertar@cantv.net

Resumen

Muchas personas asocian la confiabilidad y la disponibilidad de los activos físicos de forma directa y exclusiva con la gestión de mantenimiento, sin embargo, las verdaderas causas raíces de los problemas de disponibilidad y confiabilidad, normalmente comienzan mucho antes de que el mantenimiento sea requerido.

La confiabilidad es concebida durante la etapa de diseño por el equipo o personal de ingeniería, donde aspectos claves como la confiabilidad intrínseca de cada componente y la mantenibilidad deben ser consideradas. Luego la confiabilidad de los activos será condicionada por las mejores prácticas que se hayan incorporado durante la etapa de construcción, montaje e instalación. Posteriormente es operaciones quien con sus políticas y prácticas de trabajo, ajustarán el buen funcionamiento sin fallas de los equipos y sistemas. Por último es la gerencia de mantenimiento la encargada de sostener la confiabilidad requerida por el proceso, mediante sus lineamientos para la restauración de los activos para que cumplan con las funciones para las cuales han sido concebidos.

Lo anteriormente señalado, indica que la confiabilidad y disponibilidad tiene un ciclo de vida, el cual está relacionado a través de la interacción entre los procesos de: Diseño – Construcción - Montaje – Operación y Mantenimiento de los activos que engranan un proceso productivo.

El modelo propuesto muestra como ambos conceptos deben ser manejados de forma integral, mostrando un caso real para la construcción de una planta de compresión de gas y otra de manejo de efluentes donde las recomendaciones emitidas facilitaron mejoras en el diseño y el cumplimiento de las metas trazadas. Se hace énfasis en como para cualquier tipo de industria este tipo de análisis puede ser incorporado para el aseguramiento de la confiabilidad y disponibilidad de los activos físicos.

I. INTRODUCCIÓN.

Las industrias en los últimos años, han orientado sus esfuerzos en maximizar sus ganancias, utilizando para ello diferentes enfoques que le faciliten la toma de decisiones para realizar inversiones asertivas y de máxima rentabilidad. Fusiones entre grandes corporaciones, estilos de conducción de negocios como la Gerencia Integral de Activos, cuantificación del riesgo para evaluar escenarios, son sin duda un ejemplo directo de tal situación, donde cada una de ellas tiene como finalidad implícita o explícitamente la inversión de millones de dólares para reducir los costos y aumentar los márgenes de ganancias.

Ante la común complejidad de las operaciones en las industrial de hoy día, resulta necesario crear métodos claros que guíen hacia una efectiva solución de los problemas que tienen mayor impacto sobre las pérdidas de producción, costos de mantenimiento, Seguridad, Higiene, Ambiente y en general sobre la Confiabilidad Operacional de los sistemas, instalaciones, equipos y dispositivos.

Los principios de Confiabilidad se basan en analizar los desperdicios ocasionados por las “fallas”, estableciendo el control y prevención de las mismas, para mejorar la efectividad y rentabilidad del negocio. A menudo, estamos muy cerca del problema y no podemos observar el escenario del costo vs. el beneficio en su globalidad. Para

mejorar, necesitamos desglosar las posibles áreas de costos y de los beneficios correspondientes para poder examinar de manera crítica “cuanto logramos” en relación con “cuanto gastamos”. Es a través de metodologías y herramientas de Confiabilidad que podemos soportar adecuadamente la toma de decisiones.

El modelo propuesto tiene como objetivo fundamental, maximizar la rentabilidad del ciclo de vida de los activos mediante la aplicación de ingeniería de confiabilidad, tanto en la fase de diseño, como durante su fase operación, apuntando hacia el cumplimiento de las metas de producción, la reducción de costos totales de operación e impacto ambiental y al aumento de la disponibilidad de los elementos que componen el activo.

II. ANTECEDENTES

Con la finalidad de mejorar la rentabilidad y efectividad de los procesos productivos, las empresas modernas vienen incorporando dentro de sus estrategias de trabajo principios y herramientas de Confiabilidad e Ingeniería de Mantenimiento para alcanzar sus metas a un costo óptimo, a la vez de fortalecer la pericia técnica, humana y operativa de su personal.

Confiabilidad, es la probabilidad de que una unidad realice su función hasta un tiempo especificado bajo las condiciones de uso definidas, debido a éste concepto, es claro que la confiabilidad se puede evaluar solo conociendo el comportamiento espera del activo en servicio por cierto tiempo, por lo tanto, es relevante conocer el ciclo de vida de los activos con los que trabajamos.

La estadística proporciona herramientas importantes para la evaluación, la mejora, el diseño, el pronóstico y el mantenimiento de la confiabilidad. Entre las respuestas que

se obtienen al fallar un equipo, los datos que se destacan para realizar el estudio de confiabilidad son los tiempos de falla, los cuales son estudiados estadísticamente por medio de las distribuciones Normal, Exponencial, Log-normal, Weibull o alguna otra que se adapte al estudio de los datos recolectados. Un punto importante estudiado para el aumento de la confiabilidad en los sistemas, es la distribución de activos redundantes conectados en serie o paralelo con aquellos que cumplen la función principal.

La idea del presente proyecto es estimar el nivel de disponibilidad y confiabilidad de una planta de manejo de gas nueva, basándose en datos genéricos del comportamiento de fallas y tiempos de reparación de procesos, sistemas y equipos similares, según reconocidos estándares internacionales, que permitan simular condiciones reales, para poder pronosticar el desempeño operacional, consideraciones adicionales de diseño y posibles estrategias de mantenimiento.

III. MARCO CONCEPTUAL.

1. CONCEPTOS BÁSICOS

1.1. Confiabilidad.

La confiabilidad se define como la probabilidad de que un sistema, equipo o componente lleve a cabo su función adecuadamente durante un periodo dado bajo condiciones de operaciones previamente definidas y constantes.

Para llevar a cabo el estudio de esta probabilidad se toman datos y parámetros que afectan directamente la confiabilidad, entre ciertos parámetros están el ambiente, la temperatura y presiones, entre otros que influyen en el sistema. Sin embargo, la teoría que aplica la confiabilidad como una herramienta para el buen desempeño de los activos, se ocupa principalmente de las fallas de los sistemas, no obstante, no

indaga tanto en los fenómenos que las causan como en la frecuencia con que ocurren. No es una teoría física de las fallas, sino una teoría estadística. Por lo que los datos que se toman para el análisis, son principalmente los “tiempos” relacionados con el activo, los cuales juegan un papel fundamental. Como conceptos principales tenemos entonces:

- **Tiempo entre fallas** (TBF- time between failure): Es el tiempo transcurrido entre una falla y la siguiente. En el cálculo de la confiabilidad, éste factor es uno de los más utilizados, la data se toma para **el tiempo promedio entre fallas** – TPEF o MTBF- el cual indica el intervalo de tiempo más probable entre un arranque y la aparición de una falla. Su relación se encuentra en que mientras mayor sea su valor, mayor es la confiabilidad del componente o equipo.
- **Tiempo hasta la falla** (TTF, en sus siglas en ingles – time to failure): Usado en equipos no reparables, es el tiempo desde que el equipo comienza a operar en condiciones normales hasta el momento en que ocurre la falla.
- **Tiempo para reparar** (TTR- time to repair): Es el tiempo tomado para reparar el activo que ha fallado.

1.2. Falla

Es un hecho no previsible inherente a un sistema que desvía su comportamiento al descrito en su especificación y que en la mayoría de los casos impide que éste cumpla su misión. Existen diferentes tipos de fallas:

- **Totales:** Son aquellas que causan incapacidad total del equipo.
- **Parciales:** Son definidas como tales, aquellas que causan la degradación del servicio pero no incapacitan el funcionamiento total del equipo.

- Súbitas: son aquellas que ocurren instantáneamente.
- Progresivas: Es cuando el equipo presenta síntomas y por lo que la falla se presenta gradualmente.

1.3. Disponibilidad Inherente (%DI)

La Disponibilidad Inherente representa el porcentaje del tiempo que un equipo está en condiciones de operar durante un período de análisis, teniendo en cuenta sólo los paros no programados. El objetivo de este indicador es medir la Disponibilidad Inherente de los equipos, con la finalidad de incrementarla, ya que en la medida que esto ocurra, significará que se disminuye el tiempo de los paros por falla o paros no programados del equipo.

1.4. Disponibilidad Operacional (%DO)

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

1.5. Utilización del Equipo (UT)

La Utilización del equipo permite conocer el porcentaje del tiempo que un equipo estuvo operando en un período de análisis. El objetivo de este indicador es comparar la capacidad usada contra la instalada, con la finalidad de optimizarla.

1.6. Mantenibilidad y Disponibilidad vs. Confiabilidad

La **mantenibilidad** que se define como la probabilidad de que un activo sea devuelto a un estado en el que pueda cumplir su misión en un tiempo dado, luego de la aparición de una falla y cuando el mantenimiento es realizado bajo las condiciones, con los medios y bajo los procedimientos preestablecidos; y la **disponibilidad** definida como la probabilidad de que el equipo se encuentre en condiciones de cumplir su misión en un instante cualquiera; se encuentran relacionados a la confiabilidad por medio de los tiempos anteriormente definidos y lo podemos observar en el comportamiento en la figura 1.

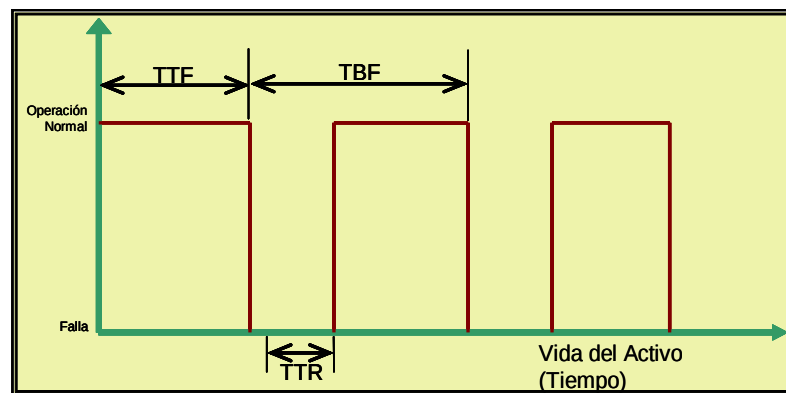


Figura 1. Tiempos usados en el RAMS

1.7. Rata de Falla

Indica la frecuencia de ocurrencia de las fallas, se define como la probabilidad casi inmediata de falla de un equipo al llegar el tiempo t de operación.

3. Índices de Disponibilidad y Confiabilidad.

Un concepto aritmético simple es muy útil para empezar a ver la disponibilidad y confiabilidad, utilizando los tiempos medios para la falla (MTTF) o tiempos medios

entre falla (MTBF). Estos tiempos promedios son a menudo calculados aritméticamente de la suma de los tiempos para fallar dividido entre el número de fallas.

La confiabilidad es observada cuando el tiempo medio para fallas (MTTF) para equipos no reparables o tiempo medio entre fallas (MTBF) para equipos reparables es muy largo comparado con el tiempo en el que se requiere que esté funcionando el equipo. Igualmente, pequeños valores para índices de tiempo medio, comparado al tiempo requerido de trabajo, refleja no-confiabilidad.

Es importante entender que el MTBF puede ser muy diferente en un mismo equipo, dependiendo de la calidad de su instalación, los estándares operacionales y por supuesto de la calidad del mantenimiento.

La precisión de estos simples índices es mejorada cuando grandes cantidades de data son procesadas usando herramientas estadísticas bien conocidas. Cuando sólo un pequeño volumen de data es disponible, es mejor analizar la data usando técnicas de análisis Weibull para llegar a los valores de MTBF o MTTF.

Para el caso de este estudio, se utilizaron referencias internacionales de tiempos de fallas, tiempos operativos y tiempos de reparación, los cuales fueron analizados bajo escenarios múltiples con herramientas probabilísticas de cálculos.

IV. PROCEDIMIENTO DE TRABAJO. *EL MODELO PROPUESTO*

La Metodología esta concentrada en utilizar los principios de Ingeniería de Confiabilidad e Ingeniería de Mantenimiento para estimar el valor esperado de

disponibilidad y confiabilidad de sistemas industriales, donde el arreglo matemático para las simulaciones y cálculo de los parámetros se concentra inicialmente en los componentes principales del sistema, fundamentalmente en los equipos rotativos y estacionarios, manejando a discreción los componentes de electricidad, instrumentación y control.

El procedimiento de trabajo se desarrolla en seis Fases, las cuales permiten un análisis integral para establecer conclusiones contundentes y recomendaciones adaptadas a la realidad de las empresas. A continuación se indican y explican cada una de las fases:

➤ **FASE I Evaluación General del Sistema:** esta fase esta enmarcada en analizar el funcionamiento integral del sistema, contabilización del número de activos presentes, configuraciones entre equipos, modalidad de operación, y en línea general todo el dimensionamiento del proyecto. Esta etapa se realiza ajustando totalmente la información de planos y esquemáticos suministrada por la empresa dueña del proceso, y la cual debe ser cuidadosamente validada en campo.

➤ **FASE II Diseño del Arreglo Físico del Sistema:** en esta fase se estructura el diagrama funcional, para considerar los arreglos en serie y paralelo de la instalación, que permita una vez estimados los valores individuales de disponibilidad y confiabilidad de cada componente, simular y calcular la disponibilidad y confiabilidad total del sistema así como la de cada uno de los subprocessos. Este diagrama funcional, se debe basar en los planos reales de la

instalación, y donde se deben considerar todos los equipos principales (estáticos y dinámicos) así como los auxiliares.

⇒ **FASE III Revisión de Referencias Internacionales y/o históricos reales del sistema:** esta fase consiste en la exhaustiva evaluación de datos, tales como valores de reconocidas fuentes de información internacional para los tiempos operativos, tiempos para reparar, tiempos entre falla, entre otros aspectos, en función del contexto operativo del sistema objeto de estudio, así como de las marcas y especificaciones técnicas de los equipos; indudablemente para el caso de instalaciones con historia, el proceso se traduce en el manejo de datos reales, pero indudablemente la comparación con dichos estándares internacionales genera gran valor para la simulación de distintos escenarios. Dentro de posibles referencias a ser consultadas destacan: Offshore Reliability Data, Reliability Handbook, Reliability Technology, Failure Rates of Mechanical Components, MIL STD 721. De las fuentes de información, se deben generar tablas con valores tratados estadísticamente, que sirvan de alimentación para los cálculos de disponibilidad y confiabilidad de cada componente y posteriormente la del sistema.

⇒ **FASE IV Estimado de la Disponibilidad y Confiabilidad Global del Sistema:** esta es la fase clave para la emisión de recomendaciones, donde se deben ejecutar simulaciones múltiples, considerando escenarios optimista, pesimista y más probable, donde se estiman inicialmente los valores de disponibilidad y confiabilidad para cada uno de los componentes

que integran el arreglo físico del sistema, y luego previo propagación y cuantificación de la incertidumbre, se pudo calcular la confiabilidad y disponibilidad total del sistema así como de los tres subprocesos: gas, condensado y agua de efluentes. Adicionalmente se indica el nivel de certeza de cumplimiento de los valores estimados. Todos los cálculos realizados se deben manejar probabilísticamente, soportados con modelos matemáticos probados en software, tales como: Math Cad, Crystal Ball, entre otros.

➤ **FASE V Estimado de la Capacidad Efectiva del Sistema:** en esta fase se simula el comportamiento de rendimiento del sistema a través del efecto de las paradas programadas y no programadas, sobre la capacidad efectiva de producción del sistema (capacidad real). Se utiliza un proceso de simulación basado en el método de Monte Carlo, logrando así la generación probabilística de los eventos de paradas no programadas (fallas), con base en los historiales de comportamiento de sistemas de referencia registrados en bases de datos internacionales. Igualmente se consideran las paradas programadas (plan de mantenimiento).

➤ **FASE VI Conclusiones y Recomendaciones:** en función de los resultados alcanzados, se establecen las respectivas conclusiones indicando puntos claves de atención. De igual forma se emiten recomendaciones orientadas a mejorar el comportamiento global del sistema.

V. CÁLCULO DE DISPONIBILIDAD Y CONFIABILIDAD. Caso de Aplicación.

Tomando datos genéricos del comportamiento típico de equipos en base a información tomada del OREDA, Reliability Handbook, entre otros, se generaron datos aleatorios tanto para los tiempos operativos (TO), como de los tiempos fuera de servicio (TFS), con los cuales se estimó la disponibilidad y confiabilidad de cada uno de los equipos principales que componen el sistema.

La tabla 1, muestra un set de datos para uno de los equipos rotativos del sistema, luego de ser tratados probabilísticamente, y con los cuales utilizando las expresiones matemáticas que se explicaron en el Marco Conceptual, permitieron estimar la disponibilidad y confiabilidad esperada de cada equipo.

TO	TFS
46	2
51	4
59	3
67	1
78	5
81	4
88	5
97	6
102	2
107	1
112	5
119	4
121	3
124	5
129	4
131	4
134	5
136	3
136	5
139	4

Tabla 1

Para la estimación de los parámetros requeridos para el cálculo, se utilizaron distribuciones de probabilidad que se adecuaron al comportamiento de equipos reparables, obteniéndose resultados como los mostrados en la figura 2.



Figura 2. Comportamiento de los tiempos fuera de servicio.

Para el cálculo de la Disponibilidad y Confiabilidad de cada uno de los equipos, de los procesos de manejo de gas, condensado y agua efluente y los totales de la instalación, se manejaron simulaciones con escenarios, optimista, esperado (más probable) y pesimista (ver tabla 2), los cuales fueron caracterizados probabilísticamente (ver figura 3) y calculados finalmente considerando su arreglo en el sistema (serie o paralelo).

DISPONIBILIDAD	CONFIABILIDAD
95,35	93,86
95,97	94,21
96,48	94,71
94	96

Tabla 2

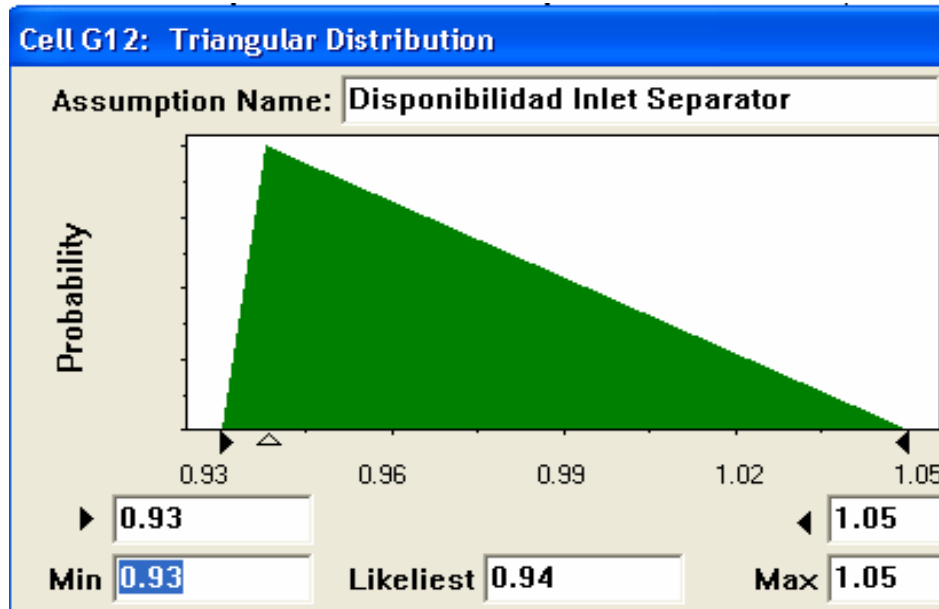


Figura 3. Caracterización probabilística de los escenario de simulación

En la figura 4, se muestra el manejo probabilística de la confiabilidad total del sistema para el escenario del año 1 (confiabilidad para un tiempo de 365 días), donde se aprecia que los valores más probables de confiabilidad están alrededor del 94%.

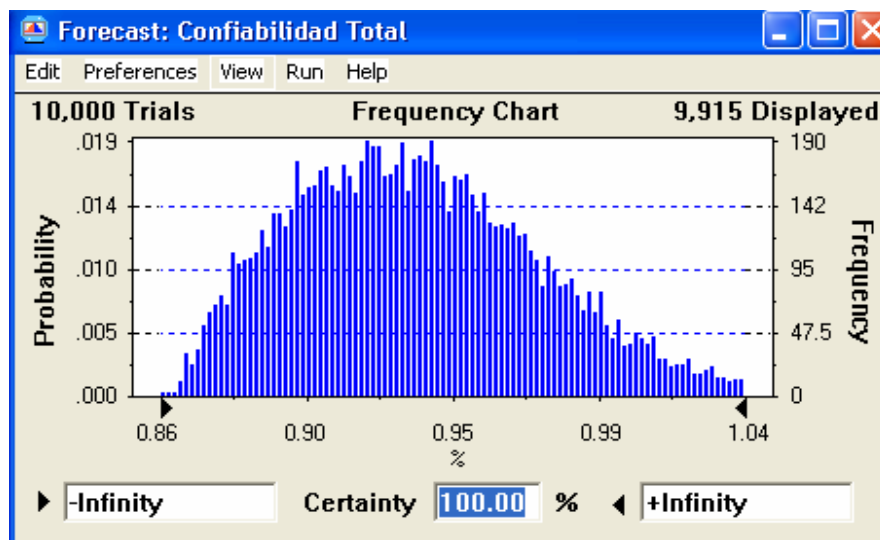
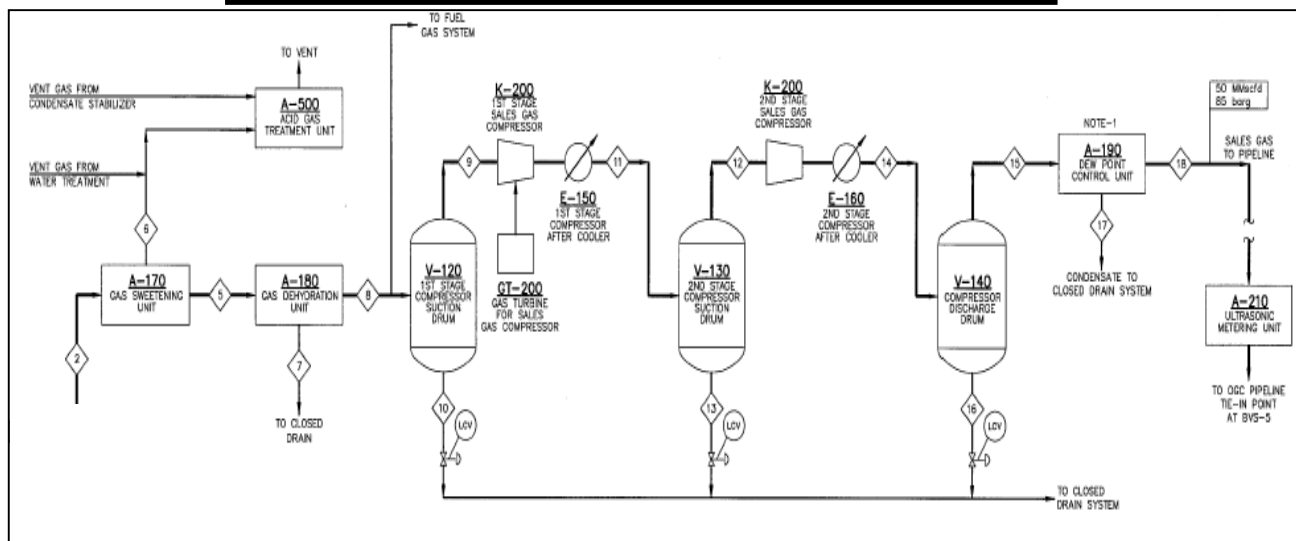


Figura 4. Estimado probabilístico de la confiabilidad del sistema.

A continuación, se muestran los resultados de disponibilidad y confiabilidad para cada uno de los nodos de gas, condensado y agua efluentes, y finalmente el estimado total del sistema, considerando una certeza del 75 % para los valores indicados.

Sub-proceso Gas (Nodo Gas)

	Año 1	Año 2	Año 3
Disponibilidad (%)	0,67 ~ 0,83	0,67 ~ 0,83	0,67 ~ 0,83
Confiabilidad (%)	0,52 ~ 0,64	0,52 ~ 0,64	0,52 ~ 0,64



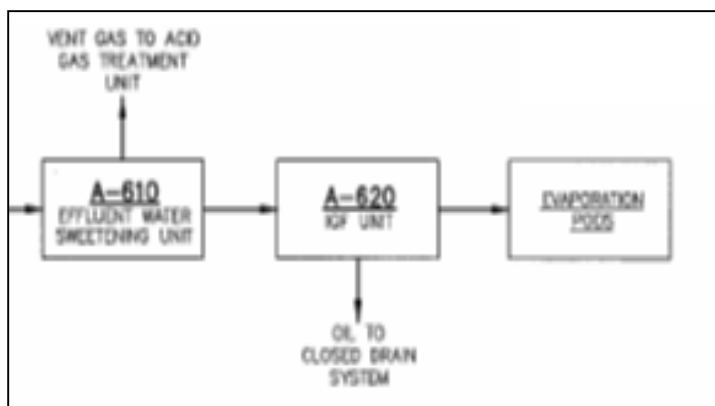
Este sub-proceso es el que tiene mayor incidencia en la confiabilidad y disponibilidad del proceso principal, debido básicamente a que dispone de mayor número de equipos y utiliza un arreglo fundamentalmente en serie, donde cualquier falla individual afecta directamente la funcionalidad del sistema, adicionalmente existen equipos donde su rata de fallas es mayor como lo son los equipos dinámicos. En consecuencia es necesario establecer un plan de mantenimiento optimizado basado en Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, que permita minimizar el riesgo de

ocurrencia de fallas y tomando especial atención en los modos de fallas que tengan altas consecuencias para el proceso.

Sub-proceso de Agua de Efluentes (Nodo Agua de Efluentes)

Este sub-proceso afecta en menor grado la confiabilidad y disponibilidad del proceso principal, aunque utiliza un arreglo en serie la cantidad de equipos es muy baja respecto al resto del sistema.

	Año 1	Año 2	Año 3
Disponibilidad (%)	0,90 ~ 0,99	0,90 ~ 0,99	0,90 ~ 0,99
Confiabilidad (%)	0,89 ~ 0,98	0,89 ~ 0,98	0,89 ~ 0,98



Para el cálculo de disponibilidad y confiabilidad se utilizaron los valores de cada uno de los subproceso que constituyen el sistema.

En los gráficos anteriores se puede apreciar un considerable impacto de los años 2 y 4, debido básicamente a las paradas por mantenimiento preventivos niveles 4 y nivel 5, en los años 2 y 4 respectivamente, demostrando que el efecto de las paradas programadas y no programadas en el sistema, dan origen a una compresión de gas sostenida de 51,4 MMFSCD, durante los dos primeros años de operación de la instalación, disminuyendo a 50,0 MMFSCD para los años 3 y 4.

Básicamente este efecto sobre la capacidad efectiva del sistema de compresión está originado por la Disponibilidad Operacional del sistema y sus complementos

de indisponibilidad por fallas e indisponibilidad por paros programados (plan de mantenimiento), tal como se aprecia en la figura 5.

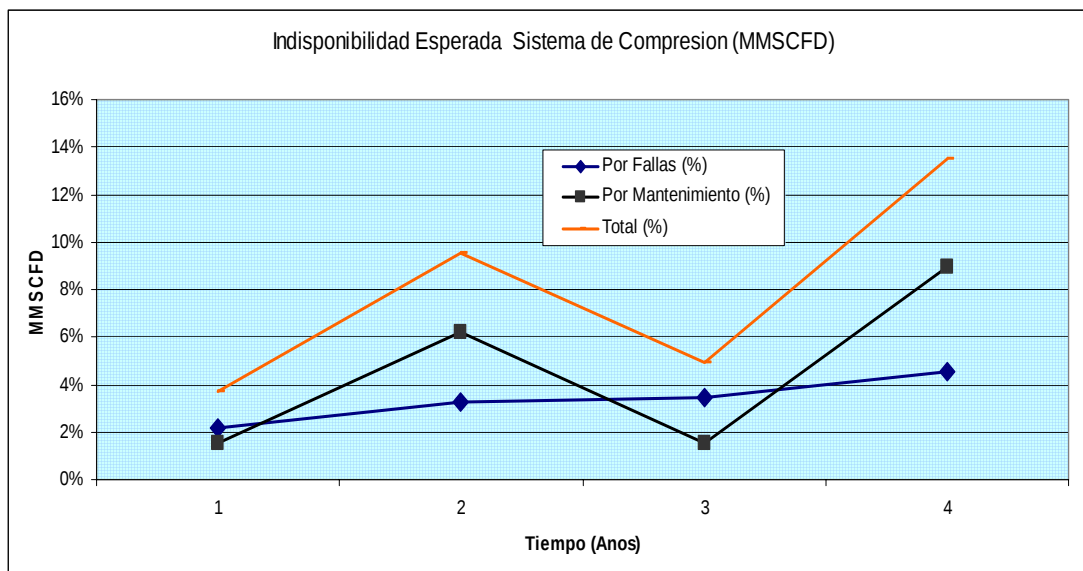


Figura 5. Indisponibilidad Operacional del Sistema.

Con base en el análisis de sensibilidad, se establecieron los escenarios optimista y pesimista para el cálculo de capacidad efectiva del sistema de compresión, tal como se muestra en las figuras 6 y 7 como ejemplo del caso analizado 6 y 7.

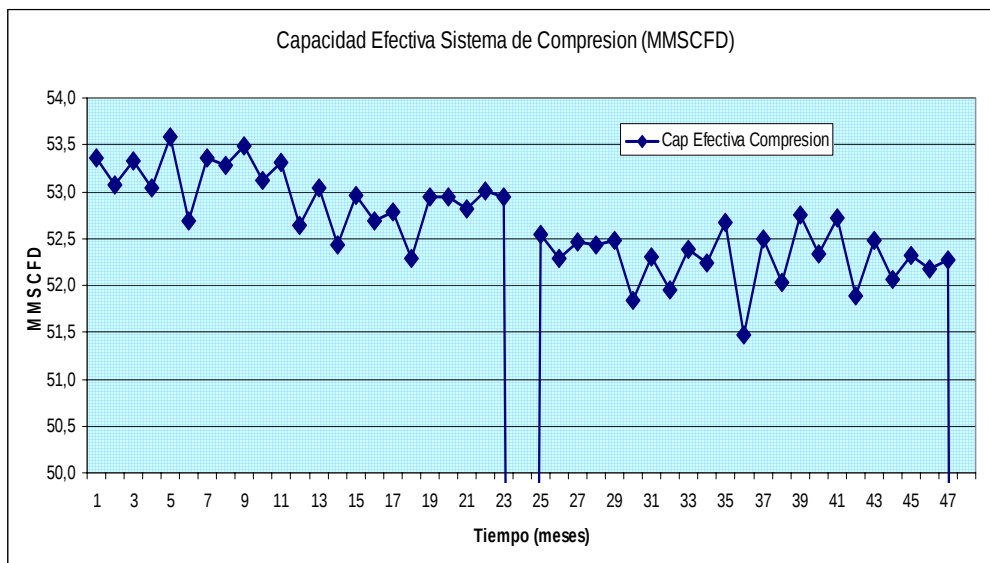


Gráfico 6. Pronóstico de Capacidad Efectiva Esperado. Caso Optimista

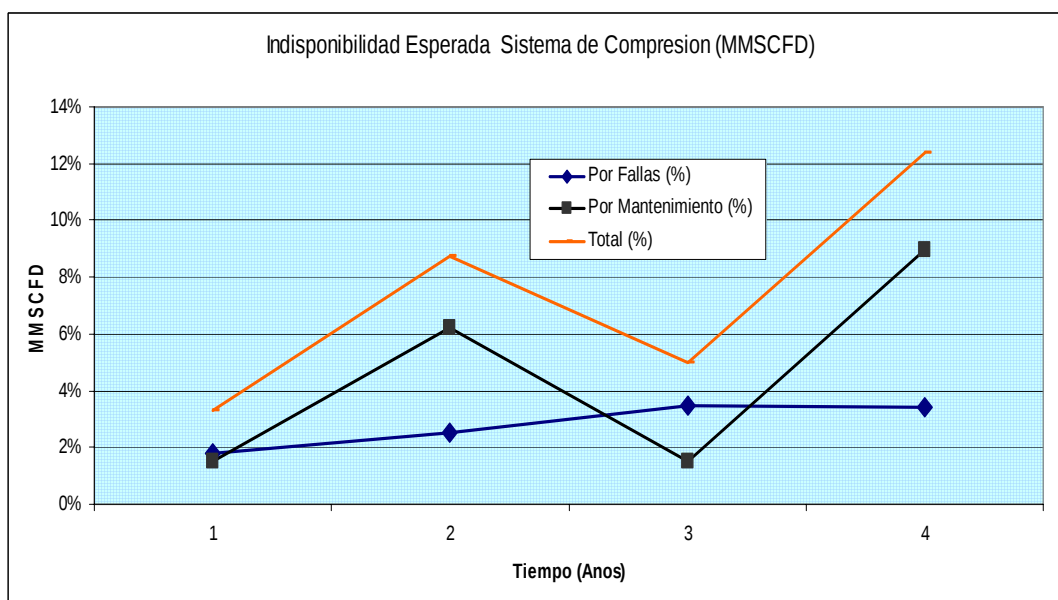


Gráfico 7. Indisponibilidad Operacional del Sistema. Caso Optimista

VI. CONCLUSIONES.

- El nodo que afecta más los resultados totales del sistema, tiende a ser aquel cuyo diseño posee mas arreglos en serie además de contener los equipos rotativos cuyos valores de disponibilidad y confiabilidad tanto históricos como de diseño son inferiores a los equipos estáticos.
- Un estimado de la disponibilidad y confiabilidad del sistema considerando la influencia de los sistemas de instrumentación, protección, control, electricidad refleja que los valores finales del sistema pueden disminuir mínimo en un 10%, lo cual es un punto de atención importante a ser considerado dentro de este tipo de análisis.
- En el pronóstico de comportamiento de capacidad efectiva de un proceso productivo, la indisponibilidad operacional por mantenimiento planeado como la indisponibilidad operacional por fallas, deben ser analizadas independientemente y en conjunto, con la finalidad de poder diagnosticar y predecir estrategias que aseguren el cumplimiento de las metas de producción.
- El efecto del plan de mantenimiento preventivo y correctivo sobre la capacidad efectiva del sistema evidencia la necesidad de análisis de mantenibilidad en los sistemas y subsistemas, en la búsqueda por disminuir los tiempos de parada por mantenimiento.

VII. RECOMENDACIONES.

- Es necesario evaluar siempre el nivel de redundancia de los sistemas, verificando la incidencia de un posible respaldo que minimice el impacto de las paradas programadas.
- Realizar siempre una evaluación costo riesgo beneficio, para la justificación económica de adquisición de un equipo spare (Driver), con base en la disminución de los tiempos de paro programado y fallas.
- Es oportuno el diseño del plan detallado de mantenimiento para el sistema que se analiza, empleando metodologías tales como Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), Inspección Basada en Riesgo (IBR) y Optimización Costo Riesgo Beneficio, el cual es fundamental para establecer una estrategia que permita los niveles requeridos de disponibilidad y confiabilidad del proceso productivo, y que representa la base inicial para las estimaciones de recursos, materiales, personal, máquinas y herramientas, dimensionamiento de la función de mantenimiento, entre otros aspectos,

VIII. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS TÉCNICAS.

- o OREDA-2000: Offshore Reliability Data Handbook, Penn Well Publishing Company and distributed by DNV Technial.
- o MIL-STD-721. 1991. Military Standard Definitions of Terms For Reliability and Maintainability, Springfield, VA: National Technical Information Service of the U.S. Department of Commerce.



- o Kececioglu, Dimitri. 1991, Reliability Engineering Handbook, Volume 1, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.