

Modelación De Sistemas Productivos Complejos A Través Del Análisis RAM

INTRODUCCIÓN

La dinámica empresarial actual, exige que los procesos en la industria sean optimizados desde el punto de vista técnico y económico. Es por esta razón, que surge la necesidad de la adopción de un sistema de gestión de activos tal como lo establece la norma ISO 55000, de manera que las organizaciones logren sus objetivos de manera efectiva, eficiente y sostenible en el tiempo.

En este sentido, uno de los aliados a la gestión de activos es la Ingeniería de Confiabilidad, que se ha convertido en una disciplina para lograr el máximo rendimiento de los activos. La misma, propone diversas metodologías (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, Análisis Causa Raíz, Inspección Basada en Riesgo, entre otras) para obtener mejor eficiencia general del activo.

Por otra parte, la modelación de los sistemas productivos, es de gran ayuda para la toma de decisiones, puesto que en la misma reproduce la realidad operacional de los activos, a partir de ecuaciones matemáticas que describen dicha realidad.

Uno de los mayores retos para los ingenieros de confiabilidad de cualquier industria, es la integración de la ingeniería de confiabilidad y la simulación de procesos productivos complejos. Por esta razón, este trabajo se muestra un enfoque combinado en la aplicación de estas dos técnicas, que sirva para pronosticar el

comportamiento de un sistema productivo por cada falla o cambio en la tasa de producción, con el objetivo de establecer acciones y estrategias de operaciones y mantenimiento, que permitan la gestión de activos, disminuyendo sistemáticamente la probabilidad de falla y eventos no deseados en el proceso analizado.

BASES TEÓRICAS

Esta aplicación, se sustenta en la teoría de Análisis RAM, la Estadística aplicada a la Ingeniería de Confiabilidad y las funciones lógicas que se emplean para modelar el proceso productivo. A continuación, se presentan una serie de términos básicos utilizados en el presente trabajo:

Activo: Un activo es algo que tiene un valor actual o potencial para una organización. (ISO 55000, 2014).

Sistema Productivo: Un sistema productivo son dispositivos, equipos, instalaciones y/o edificaciones sujetas a acciones de mantenimiento. (COVENIN 3049:93).

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 (Huerta, 2006).
La confiabilidad, en su forma más simple, se describe con la siguiente ecuación:

$$C t = e^{-\lambda t} \frac{1}{e T P P F}$$

Donde,
t = tiempo de la misión (hrs; días; semanas, meses, años etc.)
λ = tasa de falla
TPPF = 1/ λ = tiempo promedio para fallar o tiempo promedio entre fallas.

Nota: Esta ecuación es válida para tiempos para la falla que sigan la distribución exponencial.

Mantenibilidad: Es la facilidad y la velocidad con la que una actividad de mantenimiento se puede llevar a cabo en un activo. La misma es en función del diseño del equipo y se mide generalmente por el tiempo medio de reparación (O' Hanlon, 2014).

La mantenibilidad se puede obtener mediante la siguiente fórmula:

$$M(t) = e^{-\mu t} \frac{1}{e T P P R}$$

Donde,
M: Mantenibilidad
TPPR: Tiempo promedio para reparar
t : tiempo misión

Disponibilidad: Es la probabilidad de que un activo sea capaz de realizar su función de manera satisfactoria, cuando sea necesario, en un entorno determinado. La disponibilidad es una función de la confiabilidad y la mantenibilidad. (O' Hanlon, 2014).

La disponibilidad se puede obtener mediante la siguiente fórmula:

$$D = \frac{T P E F}{(T P E F + T P P R)}$$

Donde,
D= Disponibilidad
TPEF= Tiempo medio entre fallas
TPPR= Tiempo promedio para reparar

Bloque: Es el elemento que se utiliza para representar cualquier parte de un sistema

productivo, y posee una tasa de falla, reparación y producción.

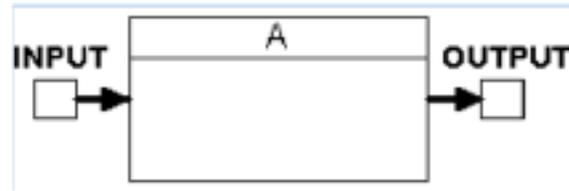


Figura 1. Bloque de Confiabilidad sencillo.

Diagramas de Dependencia de Proceso (DDP): Es un método de diagramación que permite modelar relaciones lógicas complejas entre los bloques de un sistema. Este método analiza los efectos que causan los tiempos de inactividad que ocurren o podría ocurrir en un sistema, bien sea programados no, y establece las relaciones entre la disponibilidad del sistema productivo, la configuración del mismo, la política de mantenimiento y la tasa de producción.

Análisis RAM (Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad):

El análisis RAM es una metodología que diagnostica el estado actual de un sistema productivo, y pronostica su comportamiento en un periodo determinado de tiempo.

Además permite definir cuantitativamente:

- La Disponibilidad y confiabilidad del sistema.
- Las pérdidas de producción por indisponibilidad del proceso productivo.
- El impacto en la disponibilidad del sistema debido a:
 - La política de aprovisionamiento de partes y repuestos.
 - La política de mantenimiento.
 - La logística e Impacto por redundancia.

La aplicación de un análisis RAM permite determinar los activos que tienen mayor influencia en los indicadores de disponibilidad y confiabilidad en un sistema productivo.

Las etapas de implementación del Análisis RAM son las siguientes:

- Análisis de los datos de falla y reparación.
- Modelación del sistema productivo.

- Simulación del modelo
- Jerarquización de criticidad de los activos

ANÁLISIS DE LOS DATOS DE FALLA Y REPARACIÓN

El análisis RAM, se inicia con el análisis de los datos de tiempo de falla y reparación de cada uno de los activos que forman parte del sistema o proceso estudiado para la estimación probabilística de la tasa de falla y reparación. Los mismos pueden provenir de diferentes fuentes, bien sea específica o genérica. La que da mejor detalle del comportamiento del sistema productivo es el registro de fallas, al mismo se le debe realizar un tratamiento estadístico, con el objetivo de obtener los parámetros de distribución de probabilidad. Dentro de las fuentes genéricas se tienen el OREDA, IEE, PARLOC, EXIDA, WELL MASTER, entre otras.

Otra opción cuando no se tenga historial de falla disponible es definir una función de distribución de probabilidad triangular, rectangular o BETA-PERT para representar los modos de fallas, bajo diferentes escenarios (pesimista, más probable y optimista) para los tiempos de falla y reparación. Esto se debe realizar en conjunto con los especialistas y expertos del activo. (Ver figura 2).



Figura. 2. Fuentes de Información para la estimación de tasa de falla y reparación.

Para el caso de activos nuevos, la fuente de información para la tasa de fallas y reparación son las base de datos genéricas y la opinión de expertos, que servirán como una primera aproximación al comportamiento real del activo una vez sea instalada. Dichos tiempos deben ser

actualizados tan pronto se tenga suficiente información del registro de fallas, puesto que si se mantiene dichos datos estaremos simulando el sistema con datos de falla y reparación que no corresponden a la realidad operacional del activo.

Asimismo, en la etapa de transición de uso del historial de falla, y que por lo general se posee pocos datos, se puede emplear el Teorema de Bayes, para combinar los datos genéricos y la evidencia, obteniendo de esta manera una tasa de fallas que represente el comportamiento del activo.

Dicho teorema también puede ser empleado cuando por alguna u otra razón no se tenga suficientes datos para realizar una estimación de las variables tiempos entre falla (TEF) y tiempo para reparar (TPR) o simplemente combinar la experiencia de otros con la experiencia propia.

MODELACIÓN DEL SISTEMA PRODUCTIVO.

La modelación del proceso productivo inicia con la construcción de los Diagramas de Dependencia de Proceso (DDP) del proceso analizado (ver figura 3). Para ello es necesario definir los límites de cada uno de los sistemas, subsistemas, equipos y componentes que intervienen en el sistema productivo y que tienen impacto en la disponibilidad del mismo causando pérdidas en producción.

Para el caso de la industria petrolera y gasífera, la norma ISO 14224, define los límites de batería y estructura sistemáticamente cada uno de los equipos principales utilizados en esa rama de la industria. Para el caso de otras industrias, se puede tomar como base los criterios del estándar citado anteriormente y adaptarlo a la realidad operacional del sistema productivo analizado.

El sistema de producción debe ser representado en un modelo de diagrama de bloques de dependencia de proceso; esto implica que se debe realizar una revisión exhaustiva de la

información técnica inherente al proceso (Diagrama de tubería e instrumentación, diagrama de flujo de proceso, entre otros).

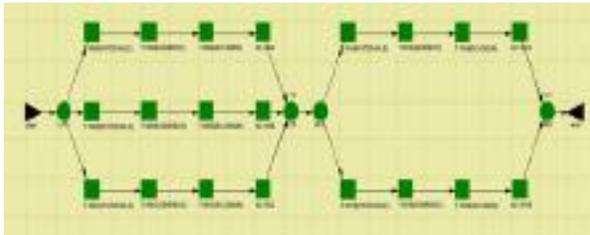


Figura 3. Ejemplo de Diagrama de Dependencia de Procesos (DDP) de una Instalación Industrial.

Es importante destacar que el modelo propuesto se debe representar desde el punto de vista de confiabilidad y que considere los aspectos del proceso, pero el mismo bajo ningún concepto es un diagrama de proceso. Asimismo, el modelo desarrollado debe ser validado por expertos en el área y por personal que interviene diariamente en la operación y mantenimiento del sistema productivo, y debe reproducir el comportamiento real del sistema dentro de su contexto operacional.

Elementos de modelación de los Diagramas de Dependencia de Proceso (DDP)

Parámetro de producción "Q"

Cada bloque del modelo RAM debe tener definido un "valor Q", el cual representa un parámetro de producción del modelo (por ejemplo: capacidad de generación, barriles de crudo, cantidad de producto, entre otros).

Para efectos de la simulación, se debe definir el siguiente criterio: cuando el sistema está operativo entonces el rendimiento de producción es Q; para el caso de que el sistema no esté operativo el rendimiento de producción es 0. En este sentido, existen 4 distintos estados, para que el equipo se encuentre inoperativo o fuera de servicio, los mismos se presentan a continuación:

- Equipo en reparación después de una falla.
- Equipo en mantenimiento preventivo.
- Equipo en falla, pero aún no ha sido detectada (falla latente)

- Equipo disponible pero no requerido para su uso.

Grupos de proceso

Es un conjunto de bloques que poseen alguna característica en común relevante al funcionamiento del sistema.

Grupo de Proceso: Serie.

En este grupo, todos los bloques son configurados en línea (ver figura 4) y una falla de cualquiera de estos, el Q del grupo es cero. El rendimiento de esta configuración está limitada a la mínima entre las capacidades de cada uno de los componentes, es decir:

$$Q_{serie} = \text{MIN} [q_1, q_2, q_3, \dots, q_n]$$

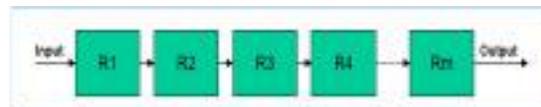


Figura 4. Diagrama de Dependencia de Procesos mínimo.

Grupo de Proceso: Redundancia Activa.

La redundancia activa, permite el modelado de un sistema donde dos o más bloques están en paralelo (ver figura 5) y todos los bloques que lo conforman podrían estar operando, pero si uno de ellos falla, no implica que la producción se detenga. (RAMP 5.0 User Manual, 2008)

Un ejemplo del uso de este grupo serían los siguientes:

- Un sistema de generación eléctrica que está conformado por 3 turbo-generadores, donde cada equipo pueda producir el 50% de la meta de generación.
- Un sistema de bombeo conformado por 3 bombas centrífugas, en el que cada una de estas maneja un tercio del fluido total (la falla sería parcial).

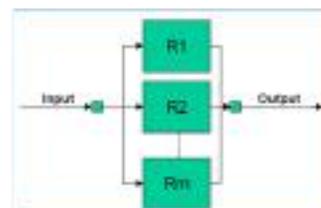


Figura 5. Diagrama de Dependencia de Redundancia.

Para este tipo de configuración el "Q" del grupo es el mínimo valor de la sumatoria de las capacidades de todos los equipos presentes en el grupo a una tasa R, es decir:

$$Q_{activa} = \text{MIN} [R, Q_1 + \dots + Q_n].$$

Además, se debe definir un nivel de corte "C" de manera que cuando:

$$Q_{activa} < C \text{ entonces } Q_{activa} = 0.$$

De lo anterior se tiene que la capacidad máxima de esta configuración, es la tasa asignada y que existe una pérdida de la función del sistema cuando la sumatoria de las capacidades de los equipos es menor que el nivel de corte, entonces se asume que la capacidad del grupo es cero.

Grupo de Proceso: Redundancia en Standby.

La redundancia en standby permite el modelado de sistemas en el cual no todos los bloques son requeridos al mismo tiempo para alcanzar el valor de producción "Q" deseado.

Como premisa para esta configuración se tiene que, si un bloque no es requerido en un momento determinado, el equipo permanecerá en standby o en reposo, y solo es utilizado en caso de que el alguno de los que estaban operativas falle.

Para este tipo de configuración el parámetro de producción Q del grupo, se calcula de forma análoga a la del grupo de redundancia activa, es decir, el parámetro Q es el mínimo valor entre la sumatoria de las capacidades de los equipos presentes en el grupo a una tasa R que es especificada desde el diseño, es decir:

$$Q_{standby} = \text{MIN} [R, Q_1 + \dots + Q_n].$$

De igual forma que en la anterior, se tiene también un nivel de corte C de manera que cuando $Q_{standby} < C$ entonces $Q_{standby} = 0$.

Grupo de Proceso: Almacenamiento.

El grupo almacenamiento puede ser utilizado para modelar tanques (ver figura 6) o elementos de proceso similar, además también puede utilizarse para simular efectos retardados de fallas o para modelar la disponibilidad de la

aceptación de residuos. A continuación se presentan las ecuaciones que rigen este grupo:

$$Q_{Almacenamiento} = q_2 \text{ si el almacenamiento no está vacío}$$

$$Q_{Almacenamiento} = \text{MIN} [q_1, q_2] \text{ si está vacío}$$

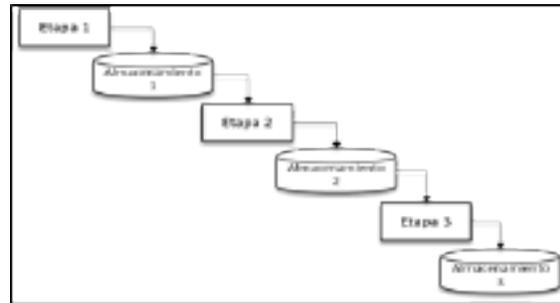


Figura 6. Ejemplo de Almacenamiento de Tanques.

Grupo de Proceso: Tiempo de Retardo.

Este grupo modela un medio de aumento o disminución de la capacidad de un sistema productivo en función del tiempo. El mismo se emplea cuando el sistema debe esperar un tiempo antes de reanudarse por completo y pasar a estar operativo 100% (por ejemplo si un activo ha sido apagado o si sufrió una reparación).

El cálculo del mismo se realiza de la siguiente manera:

$$\text{Si } q_1 = 0 \text{ entonces } Q_t = 0$$

Después de un tiempo de retraso T

$$q_1 > 0. \text{ Entonces } Q_t = q_1$$

De manera análoga, si después de cierto tiempo T

$$q_1 \text{ sigue siendo } > 0. \text{ Entonces } Q_t = q_1 + q_2$$

Así sucesivamente hasta q_n

Donde:

Q_t = Parámetro de Producción modelado bajo la configuración "Tiempo Retardado"

q_1, q_2, q_n = Elementos con capacidad q.

Funciones Lógicas

Función Producto:

La función lógica producto, tal como su nombre lo indica devuelve el producto de la capacidad de los n elementos que conforman dicho grupo.

$Q_{\text{producto}} = q_1 * q_2 * q_3 * \dots * q_n$.

Donde:

$q_1, q_2, q_3 =$ elementos con capacidad q .

Esta función se emplea para modelar el efecto acumulativo de los elementos que restringen el rendimiento a una proporción de la máxima teórica. Asimismo, también se podría emplear para multiplicar la salida del grupo por una constante.

Función Cociente:

Esta función permite dividir por una constante, de manera que el valor de Q de salida del grupo sea el resultado de dicha división.

$$Q_{\text{cociente}} = q_1 / q_2$$

Donde:

$q_1, q_2 =$ elementos con capacidad q .

Un ejemplo de uso de esta función, es la simulación de la disponibilidad de un sistema productivo (por ejemplo la capacidad dividida entre la demanda), con el objetivo de verificar si se cumple con las necesidades para las cuales se utiliza el sistema.

Función Diferencia:

Esta función devuelve la diferencia entre las capacidades de dos bloques, y es comúnmente empleado para monitorear pérdidas en la producción como por ejemplo la demanda menos la capacidad, de manera que:

$$Q_{\text{diferencia}} = \text{MAX} [q_1 - q_2, 0]$$

Un ejemplo práctico del uso de esta función, es cuando se requiere comparar la capacidad de producción con la demanda, para evaluar los tiempos en los que la capacidad del sistema se encuentra por debajo de la demanda.

Función Mayor / Menor Que:

La función "Mayor que y Menor que" son similares, y tal como su nombre lo indica, permite establecer un nivel, bien sea mayor o menor, tal que si no se satisface la condición, el Q de salida del grupo sea 0.

La aplicación de esta función lógica es para equilibrar cargas o compensar fallas de un subsistema incrementando la salida de otro

subsistema.

Sí $q_1 > q_2$ entonces $Q_{\text{mayor}} = q_1$

De lo contrario $Q_{\text{mayor}} = 0$

Sí $q_1 < q_2$ entonces $Q_{\text{menor}} = q_1$

De lo contrario $Q_{\text{menor}} = 0$

Función Igualdad:

Esta función lógica permite al usuario detectar si una capacidad de grupo o elemento es igual a una condición conjunto.

El mismo debe contener exactamente dos elementos y el Q de salida se calcula de la siguiente manera:

$Q_{\text{igualdad}} = q_1$ si q_1 está fuera del rango.

$Q_{\text{igualdad}} = q_2$ si q_1 está dentro del rango.

Rango: {Límite Inferior; Límite Superior} "previamente definido".

Donde:

$q_1, q_2 =$ elementos con capacidad q .

Es decir, la capacidad del grupo es igual a q_1 si este se encuentra fuera del rango previamente establecido, para el caso de que q_1 se encuentre dentro del rango, entonces la capacidad del grupo es igual a q_2 .

SIMULACIÓN DEL MODELO

Una vez modelado el sistema productivo, se procede a realizar la simulación. Para esto es necesario definir el periodo de tiempo en el cual se desea simular el comportamiento del sistema, puesto que las condiciones de operación y mantenimiento dependen de las distribuciones de probabilidad de cada bloque y esta a su vez del variable tiempo.

En este sentido, y para disminuir la incertidumbre en este tipo de estudios, es necesario hacer uso de la Simulación de Montecarlo, para obtener los distintos resultados posibles del modelo RAM. Es por esta razón, que para el modelaje de sistemas complejos se recurre al uso de programas computacionales (tales como: Blocksim, RAPTOR, RAMP, MAROS, entre otros), debido a que es necesario repetir varias veces una

simulación del sistema con el mismo valor de tiempo analizado, para obtener los distintos escenarios de comportamiento posible y dar confianza estadística a los valores calculados (ver figura 7).



Figura 7. Gráfico de Frecuencia de Disponibilidad para determinado periodo de tiempo.

Posteriormente, se debe simular el modelo para distintos periodos de tiempos, con el objetivo de pronosticar el comportamiento del sistema productivo desde el punto de vista de confiabilidad y de producción.

En la figura 8, se muestra un perfil estocástico de los valores de disponibilidad de un sistema productivo para años futuros.

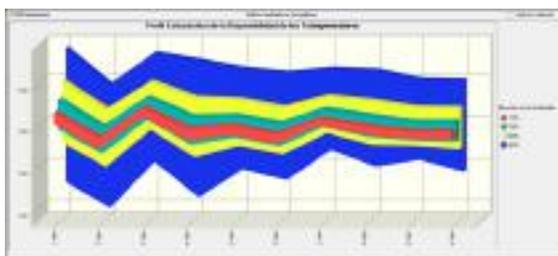


Figura 8. Perfil Estocástico de la Disponibilidad. JERARQUIZACIÓN DE CRITICIDAD DE LOS ACTIVOS

Una de las ventajas de realizar un Análisis RAM a sistemas complejos, es que del mismo se puede obtener una lista jerarquizada de los activos que tienen mayor aporte a la indisponibilidad del sistema y su afectación al sistema de producción (ver tabla 2). Esta lista jerarquizada, permite conocer a la organización los activos

críticos del sistema y dirigir en ellos las acciones, estrategias y recursos con el objetivo de obtener un mayor rendimiento del sistema productivo.

Nro.	Criticidad	Equipo	TPEF	Fallas esperadas
1	1,757	Equipo 1	504,08	12
2	1,494	Equipo 2	267,72	24
3	1,39	Equipo 3	823,04	11
4	0,933	Equipo 4	1028,23	83
5	0,867	Equipo 5	780,15	52
6	0,861	Equipo 6	984,67	41
7	0,825	Equipo 7	1053,28	80
8	0,7	Equipo 8	783,56	111
9	0,691	Equipo 9	1160,62	33
10	0,593	Equipo 10	457,7	96
11	0,586	Equipo 11	985,95	5
12	0,531	Equipo 12	496,12	177

Tabla 2. Tabla ejemplo de Lista jerarquizada de activos de un sistema productivo.

Asimismo, el modelo RAM permitirá analizar y verificar el comportamiento de un potencial re-diseño o cambio en la filosofía operacional del sistema productivo en los índices de confiabilidad y de producción antes de su implementación. Esto es de gran valía y ayuda para la toma de decisiones, puesto que permitirá realizar un análisis técnico (desde el punto de vista de confiabilidad y mantenimiento) y económico del sistema productivo y seleccionar la opción más óptima de rediseño o cambio en la filosofía operacional.

BENEFICIOS DEL ANÁLISIS RAM EN SISTEMAS PRODUCTIVOS COMPLEJOS

Los resultados de la simulación del modelo RAM permiten a la Organización lo siguiente:

- Identificar los "cuellos de botella" en el sistema productivo.
- Evaluar los perfiles de demanda del producto.
- Evaluar posibles cambios en los procedimientos de operación y mantenimiento de los activos del sistema productivo.
- Evaluar la distribución de recursos (mano de obra, repuestos, etc.) del mantenimiento.
- Estimar tiempos de falla para el sistema de producción como un todo.
- Verificar si la organización está cumpliendo o

podrá cumplir el volumen de producción.

Asimismo, los valores obtenidos permitirán identificar de manera precisa la causa de baja disponibilidad o productividad del sistema productivo. Puesto que los resultados calculados sirven para reconocer los problemas particulares del sistema productivo. Por ejemplo:

- Un equipo/sistema/subsistema posee bajo rendimiento.
- Un activo permanece largos periodos de tiempo en reparación.
- Falta de repuestos para ejecutar una reparación, entre otros.

CONCLUSIONES

- A través de la aplicación de la metodología Análisis RAM a Sistemas Productivos complejos, se logra mitigar de manera significativa el riesgo e incertidumbre asociadas a las variables de producción de los activos de la organización, dando lugar a un proceso de toma de decisiones bajo un esquema de evaluación y comparación de los diferentes escenarios en función del comportamiento de los activos desde el punto de vista de operación y mantenimiento.
- El análisis de los datos de falla y reparación de los activos es una de las fases más importantes del desarrollo del modelo RAM, debido a que del mismo se estimarán las variables estadísticas que serán simuladas, y pronosticarán el comportamiento del activo.
- El modelo RAM del Sistema Productivo, debe representarse desde el punto de vista de confiabilidad y que considere aspectos del proceso.
- El Diagrama de Dependencia de Proceso (DDP) permite modelar relaciones lógicas complejas entre los elementos del modelo con el objetivo de obtener una representación más exacta del proceso productivo analizado.
- Los grupos de proceso, permiten modelar bloques que poseen alguna característica en común y relevante para el funcionamiento del sistema. Por otra parte, las funciones lógicas, son necesarias para realizar un modelaje más

real del contexto operativo del sistema.

- La jerarquización de activos, permite la identificación de los equipos y sistemas críticos de un sistema productivo. Con esto, la asignación de recursos y esfuerzos corporativos será asertiva, y disminuirá la ocurrencia de eventos no deseados que inciden en la productividad de la organización.
- Con la finalidad de definir estrategias que aseguren el cumplimiento de la producción, se debe realizar un análisis a la indisponibilidad operacional del sistema productivo a través de otras metodologías de Ingeniería de Confiabilidad. Este análisis debe incluir un estudio de la política de mantenimiento actual, la política de gestión de partes y repuestos y la gestión del capital humano.

AUTOR:

Díaz B., Osberto J.

Ingeniero de Mantenimiento
Mecánico UNERMB 2008. Magister
Scientiarum en Gerencia de
Mantenimiento LUZ 2014.
Consultor de Ingeniería de
Confiabilidad E&M Solutions, C.A.