



PROGNOSTICS Y DETERMINACION DE LA VIDA UTIL REMANENTE (VUR).

Por: Ing. Guillermo Sigüenza González

Junio 2017

INTRODUCCION.

Desde tiempos inmemoriales el hombre ha tratado de penetrar en los secretos del futuro. El conocer por anticipado los eventos por suceder ha sido una preocupación de reyes, emperadores y gobernantes así también como del hombre común. A raíz de esta sed de conocimiento del futuro se crearon las artes de la predicción y la adivinación; oráculos, adivinos, brujos, charlatanes y muchos otros medios mágicos o esotéricos.

En tiempos más recientes con el desarrollo de las disciplinas matemáticas de la estadística y la probabilidad analítica se han encontrado formas de pronosticar eventos futuros físicos por medios científicos a diferencia de predecirlos por medios mágicos o esotéricos.

Es importante diferenciar entre el predecir y el pronosticar. El predecir significa anunciar eventos futuros por medio de la; intuición, suposición, adivinación, o artes mágicas mientras que el pronosticar significa anunciar eventos futuros basándose en criterios lógicos o científicos o a partir del análisis de datos disponibles de eventos físicos y de modelos matemáticos.

Aterrizando esta discusión de pronosticar el futuro a nuestro nivel de operación de plantas industriales en el cual el objetivo es el mantener operando plantas industriales con; eficiencia, confiabilidad y seguridad, el anticipar eventos negativos futuros toma una gran importancia.

La nueva disciplina de “prognostics” es la rama de la ingeniería que se enfoca a pronosticar el tiempo límite cuando un sistema o componente dejará de cumplir con su función debido a algún tipo de falla o desperfecto. La esencia de esta disciplina es estimar el periodo de tiempo en que el sistema o componente puede continuar funcionando satisfactoriamente hasta llegar a un estado límite (threshold) de falla funcional. Es importante notar que este valor no es determinístico, sino que es probabilístico por lo que se debe de considerar el grado de incertidumbre en el pronóstico.

El periodo de tiempo medido desde cuándo se efectúa el pronóstico hasta el tiempo pronosticado de ocurrencia de falla funcional se denomina a nivel mundial como Vida Útil Remanente (VUR) y es el dato clave para decidir qué acciones se deben tomar para prevenir la ocurrencia de una falla que pueda tener consecuencias graves para el negocio o para mitigar las consecuencias en caso de ocurrir. La evaluación de la VUR es la parte central de una evaluación de la condición de los SEEC de una instalación industrial de cualquier edad y la parte más importante de una evaluación de extensión de vida operacional de una instalación con servicio de 20 años o mayor.

Es importante notar el hecho de que el futuro no se puede predecir con certeza y por lo tanto los pronósticos no pueden ser determinísticos sino tienen que ser probabilísticos.

En base a la premisa anterior, en pronósticos de eventos futuros físicos siempre existe la incertidumbre de cómo y cuánto puede variar la realidad futura cuando esta se presenta con



respecto a los escenarios pronosticados. A esta incertidumbre se le denomina intervalo de error del pronóstico.

Para comprender mejor este concepto se requiere tener una definición clara de la palabra incertidumbre. La definición más apropiada de la incertidumbre, en el ámbito industrial, es la siguiente; Incertidumbre es una expresión que manifiesta el grado de desconocimiento acerca de una condición futura, pudiendo implicar una previsibilidad imperfecta de los hechos, es decir, un evento en el que se desconoce la probabilidad con que puede ocurrir bajo diferentes escenarios.

Se puede concluir que para pronosticar eventos futuros se tiene que considerar en términos probabilísticos y no determinísticos.

Un ejemplo clásico es el pronóstico del clima; No se dice mañana lloverá, se dice hay 80% de probabilidad de que llueva mañana. Esta forma de expresar los pronósticos de eventos futuros se hace necesaria porque el resultado de un evento futuro depende de muchas variables (actores, situaciones y factores externos) las cuales al combinarse generan un número de escenarios con diferentes probabilidades de ocurrencia. Estos escenarios son representados matemáticamente por medio de distribuciones probabilísticas.

Cerramos esta introducción con la cita de un famoso científico astrofísico, Richard Feynman, que asevera; que el futuro es predecible pues todo son meras probabilidades.

OBJETIVO.

El objetivo de este documento es presentar los diferentes métodos para evaluar y estimar la Vida Útil Remanente (VUR) de sistemas, equipos, estructuras y componentes (SEEC) en instalaciones industriales.

DEFINICIONES

SEEC: sistema, equipo, estructura o componente.

PROGNOSTICS: Según el ISO 13381-1 (2004) El estimado de tiempo a la falla para uno o más modos de falla existentes y futuros.

La vida útil remanente VUR: el periodo de tiempo estimado desde cuándo se hace la evaluación hasta un estado limite especificado por algún índice de condición del SEEC

La vida residual - el periodo de tiempo estimado desde cuándo se hace la evaluación hasta cuando un SEEC llegue a su límite de retiro.

Vida de diseño: El periodo de tiempo de operación continua de un SEEC, que se consideró en los cálculos originales de integridad física del SEEC, cumpliendo satisfactoriamente una función

Vida Funcional Remanente (VFR): El periodo de tiempo en que un sistema, equipo o componente puede continuar desarrollando su función satisfactoriamente en forma; segura, confiable y económica.

Incertidumbre: una expresión que manifiesta el grado de desconocimiento acerca de una condición futura, pudiendo implicar una previsibilidad imperfecta de los hechos.

Condición técnica: El grado de degradación de un componente relativo con su condición de diseño.



Índice de condición técnica (ICT): Parámetros o variables de los SEEC que pueden ser medidos físicamente y que describen la condición de Técnica de los mismos.

Índice de degradación: Parámetros o variables de los síntomas de un proceso de degradación de un componente que pueden ser detectados y/o medidos físicamente y que describen el grado de daño inducido al componente.

TEORIA

Cuando se requiere extender la vida de cualquier organismo viviente o de cualquier maquina o estructura diseñada y construida por el hombre, más allá del límite establecido de muerte en organismos vivientes, falla o tiempo excedido de la vida de diseño en un SEEC, es necesario primero conocer los factores que afectan el envejecimiento en cada caso específico.

Los factores que afectan el envejecimiento se denominan mecanismos o procesos de degradación o deterioro. Una vez que se conocen los mecanismos y/o procesos de degradación de un componente estos se tienen que representar por modelos matemáticos que describan su comportamiento a través del tiempo.

La disciplina de “Prognostics” pronostica el desempeño futuro de un Sistema, Equipo, Estructura o componente (SEEC) mediante la valoración del grado de desviación o degradación de un SEEC a través del tiempo con respecto a sus condiciones normales de diseño.

El proceso de “Prognostics” consiste en monitorear y detectar fallas en sus etapas incipientes mediante índices de degradación en los componentes y con esta información generar pronósticos de Vida Útil Remanente con cierta exactitud.

Las incógnitas que PROGNOSTICS trata de resolver son las siguientes:

1. Cuál es la condición actual de los SEEC. (Evaluación del desempeño)
2. Cuál es la Vida Útil Remanente VUR para los SEEC.
3. Cuáles son los factores que limitan la vida operacional de los SEEC.
4. Cuáles son las Acciones que se pueden tomar para extender el periodo de VUR de los SEEC.

Diferencia entre Diagnostico y “Prognostics”.

Las metodologías de diagnóstico se llevan a cabo para investigar y analizar la causa de una situación, condición o problema mientras que la disciplina de “Prognostics” está enfocada a calcular o pronosticar el futuro mediante la generación de un estimado racional de la VUR o de VFR de los SEEC de una instalación industrial. Sin embargo antes de aplicar el proceso de “Prognostics” es necesario tener un diagnostico que haya detectado, aislado e identificado la falla en un SEEC.

El diagnostico identifica y cuantifica el daño que ha ocurrido mientras que “Prognostics” trata de pronosticar el daño que no ha ocurrido. El proceso de “Prognostics” utiliza los resultados del diagnóstico como datos de entrada al proceso.

El proceso de “prognostics” se basa en el desarrollo de las siguientes actividades;

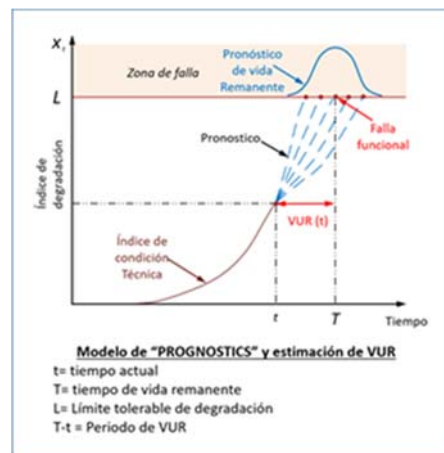
- a. El análisis de modos de fallas y mecanismos de degradación que afectan a los SEEC.

- b. La detección de síntomas de desgaste y/o envejecimiento de los SEEC.
- c. La evaluación de la condición actual de los SEEC
- d. El desarrollo de modelos matemáticos que describan la degradación a través del tiempo.
- e. La determinación de la VUR de los SEEC.

La evaluación de la VUR es la parte central de una evaluación de la condición de un SEEC y de una evaluación de extensión de vida operacional de los SEEC de una instalación con servicio de 20 años o mayor.

Los beneficios de pronosticar la VUR de los SEEC durante la etapa de operación y mantenimiento del ciclo de vida de una instalación industrial son la reducción de riesgos y reducción de costos de mantenimiento reactivo, así como el incremento de la disponibilidad, confiabilidad, mantenibilidad, seguridad y productividad de la instalación.

La VUR se considera como una variable aleatoria condicional y se puede expresar en términos de tiempo operacional absoluto, tal como; horas de vuelo, ciclos de carga, RPM's, kilómetros recorridos, etc. La VUR al ser una variable aleatoria puede ser representada por la función de densidad de probabilidad de una distribución estadística.



La evaluación de la VUR puede tomar dos vertientes. La primera, es el uso sistemático de la información para calcular o estimar un valor numérico de la probabilidad de sobrevivir un periodo de tiempo particular y la segunda es simplemente determinar el tiempo disponible para llegar a un estado límite de degradación.

El punto de referencia es el valor de la Vida de diseño o sea el periodo de tiempo de operación continua de un SEEC, cumpliendo satisfactoriamente una función, que se consideró en los cálculos originales de diseño del SEEC.

La vida de Diseño se da por terminada cuando:

- El tiempo de servicio ha llegado al valor del periodo de tiempo considerado en los cálculos de diseño de los SEEC.
- Las estadísticas de falla indican alta probabilidad de falla en operación con graves consecuencias.



- Los indicadores de condición han llegado al límite umbral (threshold) determinado.
- La frecuencia y costo de las reparaciones para mantener la operación hacen la operación no rentable.
- La degradación actual causada por mecanismos de daño (corrosión, agrietamiento, picaduras) es excesiva.
- Las deformaciones estructurales son excesivas.

los pronósticos de VUR deben proporcionar los siguientes valores:

- a. Un estimado del valor esperado de la Vida Útil Remanente.
- b. Un estimado de la desviación estándar del error de pronóstico.
- c. un intervalo de pronóstico que proporcione la probabilidad de contener el valor real futuro (estimado de incertidumbre).

Existen cuatro métodos de análisis de la VUR en el proceso de “prognostics”

1. Basado en modelos matemáticos de física de la falla.
2. Basado en datos e información previa y actual de la condición. (Estadístico)
3. Basada en distribuciones estadísticas de fallas. (probabilístico)
4. Híbrida. Combinación entre los métodos 1, 2 y 3

Método basado en modelo matemático de física de la falla.

El método basado en física de fallas (Physics-of-failure) construye modelos matemáticos (algoritmos) para demostrar la física del sistema y sus modos de falla. Ejemplos; fatiga, propagación de grietas, corrosión y desgaste.

Los modelos físicos implican que se tiene un conocimiento profundo del comportamiento de la resistencia de los componentes en respuesta al esfuerzo a que son sometidos en operación y que además este comportamiento puede ser reproducido analíticamente con exactitud.

Con este método se supone que existe alguna ecuación o relación matemática que describe el proceso del deterioro de los SEEC a través del tiempo. Los modelos pueden incorporar información de tiempo real, así como conocimiento de expertos en los algoritmos desarrollados.

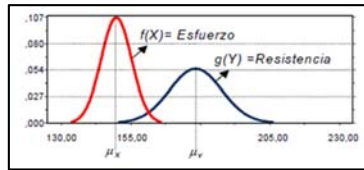
Los modelos físicos estiman la VUR de un SEEC por medio de la resolución de una ecuación determinística o juego de ecuaciones derivadas de datos empíricos o de bases científicas o ingenieriles de un sistema específico que implica identificar uno o varios parámetros específicos para ese sistema (niveles de esfuerzo, propiedades físicas, constantes matemáticas, etc.).

Por la característica del proceso estocástico y la variabilidad de los parámetros se tiene que tomar en cuenta el factor de incertidumbre en la VUR resultante por lo que esta se tiene que definir como una distribución estadística y no como un valor determinístico.

Este método se presta para aplicarlo a los mecanismos de degradación de estructuras y equipos estáticos, para los cuales se han desarrollado ecuaciones validadas enfocadas al modo de falla de



pérdida de contención que constituye uno de los mayores riesgos en instalaciones petroleras y químicas.



Estos modelos no son muy prácticos para los equipos dinámicos (rotatorios; bombas, compresores, centrifugas, sopladores) por la complejidad de los mismos, las condiciones tan variables con las que operan y el gran número de modos de falla que se manifiestan. La complejidad de los equipos hace muy costoso el desarrollo de modelos que generen resultados confiables y con precisión aceptable.

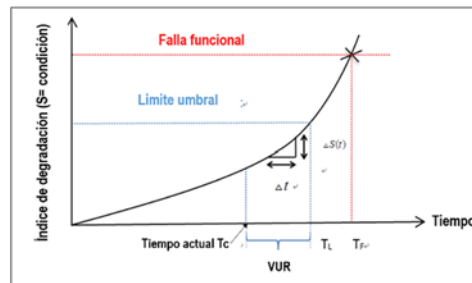
Ejemplos de modelos conocidos de física de la falla para el cálculo de la VUR son:

- a. Esfuerzo-resistencia. Espesor mínimo remanente para recipientes a presión.
- b. Inicio y propagación de grietas por fatiga
- c. Modelo de crecimiento de grietas Forman.
- d. Modelo Paris-Erdogan para fatiga.
- e. Modelos de defectos del API 579 fitness-for-service.

Método basado en datos e información de monitoreo de la condición.

El método basado en datos e información previa y actual de la condición depende en la utilización de los datos de monitoreo de condición para estimar la VUR.

Para pronosticar el final de la vida útil de un SEEC se requiere contar con criterios que definan los límites umbral (Threshold) de parámetros que miden el desempeño o índices de degradación de los SEEC, tales como; espesor mínimo de pared, tamaño máximo de grietas, profundidad máxima de picaduras, número máximo de tubos flux tapados en calderas o calentadores, número máximo de circuitos dañados, liberación máxima en fugas, cantidad de calor transferido en intercambiadores, potencia de bombeo, etc.



El definir los límites umbral es una parte crítica del proceso para estimar la vida útil remanente ya que los límites umbral representan los tiempos esperados donde ocurrirá la falla funcional.



El primer paso en este método es conocer el estado actual del deterioro o sea la condición física en base a los indicadores de desempeño y/o índices de degradación monitoreados.

El monitoreo de la condición consiste en efectuar mediciones periódicas de los parámetros que describen la condición del componente (ejemplos; medidas de vibración, medición de espesores, mediciones de temperatura, medición de grietas, pérdida de eficiencia, etc) hasta que alguno de los valores llega a un límite máximo (umbral) donde se considera que el SEEC fallo.

La VUR se determina generando algoritmos de tendencias (trending) de la trayectoria de la falla en desarrollo y pronosticando el tiempo en que se llegará al límite máximo (umbral) predeterminado.

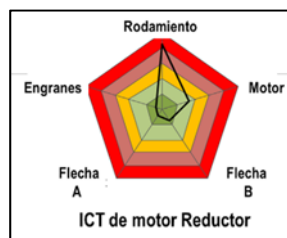
Con estos modelos se puede estimar el tiempo para llegar a ese tiempo umbral, lo cual se basa en modelos de proceso estocástico, utilizando distribuciones estadísticas.

La Condición técnica se define como el grado de degradación de un componente relativo con su condición de diseño. La condición puede tomar valores entre un valor máximo y un valor mínimo, donde el valor máximo describe las condiciones de diseño y el valor mínimo describe el estado de degradación total. La condición técnica es un valor estático en un punto en tiempo.

Los índices de condición técnica (ICT) se forman en base a aquellos parámetros o variables de los SEEC que pueden ser medidas físicamente y que describen una faceta de la condición de Técnica de los mismos.

En base a estos diferentes parámetros o métricos de condición integrados y ponderados se establece un índice de Condición Técnica general del SEEC que valore la condición con un valor límite máximo de 100 y un valor límite mínimo de 0 con una escala que pueda variar del 0 al 100%.

También se puede utilizar una escala de valoración semaforzada con rangos de color para representar la condición con una escala que pueda variar del 0 al 100%. (ver figura):



Verde - Condición aceptable puede continuar en servicio.

Amarilla - Condición favorable con un(os) detalle(s) que atender a corto plazo.

Roja - condición muy riesgosa no puede continuar en servicio.

El modelo de monitoreo de degradación se compone de:

- Definición de una función estocástica de degradación $Z(t)$ que represente la evolución de un proceso de degradación (desgaste, corrosión, pérdida de desempeño, etc.) de un SEEC.

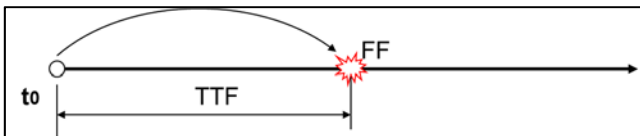
- Un límite de umbral z_c que corresponde a la falla del SEEC (esfuerzo crítico, tamaño de la grieta, espesor mínimo, límite mínimo de desempeño, etc.). El tiempo al cual se llega al límite umbral T_c es probabilístico y por lo tanto $Z(T_c) = z_c$



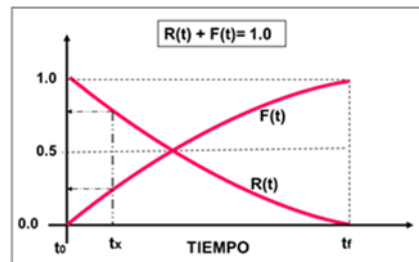
Método basado en distribuciones estadísticas de fallas. (probabilístico)

El tercer método es el de determinar una distribución estadística que describa una serie de fallas ocurridas registradas a través del tiempo.

La colección de datos de tiempo a la falla (TTF) de los modos de falla más importantes de los SEEC se puede considerar como un proceso estocástico y por lo tanto se puede ajustar una distribución estadística que describa el comportamiento de vida del SEEC bajo los diferentes modos de falla.



Teniendo una distribución estadística que describa el comportamiento de los modos de falla más importantes de un SEEC a través del tiempo, se podrá estimar la vida útil remanente en términos probabilísticos antes de llegar a la falla funcional (FF)



La distribución más utilizada para este propósito son las siguientes:

- Distribución Weibull
- Distribución Exponencial
- Distribución normal
- Distribución Lognormal



Todos los componentes de los SEEC de características similares y operando bajo condiciones iguales tienen modos de falla comunes, por lo que se prestan para poderse analizar estadísticamente en forma conjunta.

Los componentes de los SEEC pueden tener uno de tres comportamientos de vida o una combinación de dos a través del tiempo. Estos tres comportamientos de vida son:

- Mortalidad infantil.
- Comportamiento aleatorio
- Envejecimiento operacional

Estos 3 comportamientos de vida reconocidos pueden ser representados por las 4 distribuciones estadísticas mencionadas anteriormente.



La metodología híbrida.

La metodología híbrida utiliza conceptos de las otras tres metodologías descritas anteriormente.

La selección del método apropiado para el pronóstico requerido está influenciada por los siguientes factores:

- Tipo de pronóstico requerido
- Horizonte, periodo e intervalo del pronóstico
- Disponibilidad de información y datos.
- Grado de exactitud de certidumbre requerida.
- Comportamiento del proceso de falla a pronosticar
- Costo del desarrollo del modelo de pronóstico.
- facilidad de operación del modelo.

CONCLUSION:

La tendencia de las plantas industriales en la actualidad es depender más en la administración del riesgo que implica conocer la probabilidad de ocurrencia de eventos negativos que impacten el negocio financieramente. Por esta razón se hace imperante que las áreas de mantenimiento y confiabilidad sean capaces de generar valores estimados de VUR de; sistemas, equipos, estructuras o componentes críticos.

Estamos en la mejor disposición de apoyar a empresas en la aplicación de los métodos descritos en este documento.

Nuestro correo es: consultoriaitc@industrialtijuana.com