

Herramientas para la optimización del Mantenimiento Predictivo en la planta GICC de Puertollano dentro del programa conjunto ELCOGAS-UCLM

M^a Carmen Carnero Moya¹

¹ Universidad de Castilla-La Mancha, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Avda. Camilo José Cela s/n, 13071 Ciudad Real, Carmen.Carnero@uclm.es

RESUMEN

En el proyecto FEDER "Tecnologías avanzadas de control y procesos para mejorar el funcionamiento y la disponibilidad de la planta GICC de Puertollano, dentro del programa conjunto ELCOGAS-UCLM de actividades de innovación e I+D" en su actividad 5 y dentro de las actividades desarrolladas en la Escuela de Ingenieros Industriales de Ciudad Real se han implementado varias aplicaciones informáticas relacionadas con la implantación de programas de Mantenimiento Predictivo. Este software proporciona el tiempo de vida remanente de los dispositivos de la planta GICC a partir de la evolución de medidas de espesores integrando herramientas fiabilísticas y técnicas predictivas, así como se ha abordado la programación de las inspecciones de Mantenimiento Predictivo para lo que se han diseñado una serie de métodos dinámicos que consideran diferentes factores: fiabilidad, degradación y costes de mantenimiento, además de utilizar diferentes estrategias lo que permite que el centro decisor pueda incorporar su experiencia en el resultado final.

1. Introducción.

ELCOGAS es una planta de demostración GICC (Gasificación Integrada en Ciclo Combinado) de 335 MW de potencia en Puertollano (Ciudad Real). Su objetivo es la demostración de la viabilidad comercial de estas tecnologías limpias, dentro de las líneas generales del programa energético de la Unión Europea.

Sin embargo, durante el proceso de puesta en marcha de la planta, se han detectado una serie de aspectos que son mejorables, y cuya optimización produciría un impacto notable en la eficiencia de la misma. Por estos motivos se lleva a cabo el proyecto "Tecnologías avanzadas de control y procesos para mejorar el funcionamiento y la disponibilidad de la planta GICC de Puertollano". El proyecto es de naturaleza interdisciplinar y se ha dividido en 4 subproyectos, incidiendo cada uno de ellos en problemas de naturaleza diferente, y siendo realizados por grupos de investigadores de áreas de conocimiento distintas.

La actividad 5 del citado proyecto se encarga del desarrollo de técnicas de evaluación de la disponibilidad, fiabilidad y mantenibilidad a fin de determinar los eventos, sistemas y procedimientos que contribuyen a realizar los objetivos de la Central. Algunas de las aportaciones que se han desarrollado dentro de esta actividad son las que se exponen en esta ponencia, para lo que se ha contado con un becario y un contratado dentro del citado proyecto.

2. Herramientas para la optimización del Mantenimiento Predictivo en la planta GICC de Puertollano.

Entre las carencias detectadas en la política de Mantenimiento Predictivo se encuentran la optimización de la frecuencia de las inspecciones predictivas [1] y la determinación del tiempo de vida remanente de los equipos industriales [2]. En estos aspectos es en los que se pretende contribuir mediante el desarrollo de métodos y herramientas informáticas, cuyas carencias son relevantes en el ámbito del Mantenimiento Industrial [3] y cuyo desarrollo y aplicación pueden mejorar la planificación y programación del mantenimiento [4].

2.1 Sistema informático basado en técnicas de fiabilidad para la estimación de la vida remanente de equipos industriales a través de medidas de espesores.

En una central térmica como ELCOGAS los equipos se encuentran sometidos a unas condiciones de trabajo severas, impulsadas por la temperatura y por la acción de gases corrosivos y erosivos, que no se encuentran en centrales térmicas convencionales. Para controlar los mecanismos de corrosión y erosión de los equipos críticos, se ha establecido un sistema de control de medidas mediante la monitorización de espesores aplicando la técnica de ultrasonidos. Los espesores y demás variables predictivas son almacenadas en la base de datos del sistema de referencia SOR (State Of Reference). Sin embargo, SOR no dispone de unas herramientas de análisis de los datos. Las carencias analíticas se circunscriben a la capacidad de estimación de la vida útil del equipo y programación efectiva de las inspecciones, actividades de mantenimiento e incorporación de un sistema de diagnóstico automático.

El análisis de espesores serán la base del software realizado, con el objeto de predecir la vida remanente del equipo y planificar el intervalo óptimo de las nuevas inspecciones.

Como ejemplo de aplicación del sistema desarrollado se muestra el análisis al que se ha sometido a una tubería localizada en la central térmica GICC ELCOGAS. Previamente ha sido sometida a inspecciones predictivas mediante ultrasonidos para medir la variable espesor a lo largo del tiempo en seis localizaciones distintas.

En primer lugar se introducen los datos predictivos correspondientes al primer año, obteniéndose los parámetros de la distribución de Weibull para esta primera muestra temporal [5], [6] y [7]. Los valores obtenidos son los siguientes utilizando el método de Johnson: $\beta=52,7511$; $\eta=8,0229 \times 10^{-3}$; $\mu=MTBF=7,9379 \times 10^{-3}$. En la figura 1 se observa la distribución de espesores para la primera y sexta muestra [8].

Se obtendrán también la función probabilidad de fallos y tasa de fallos de la primera muestra para una posterior comparación con la última muestra y ver su evolución a lo largo del tiempo. Como resultado se obtiene que para un valor del espesor igual al parámetro de escala la probabilidad que la variable espesor sea menor que dicho parámetro es del 63,2%.

La evolución de la función densidad de probabilidad se puede apreciar en los resultados obtenidos para la sexta muestra. Si se compara esta gráfica con la de la primera muestra se observa la evolución de la distribución de espesores hacia valores más pequeños de los mismos. Se puede repetir el proceso para todas las inspecciones.

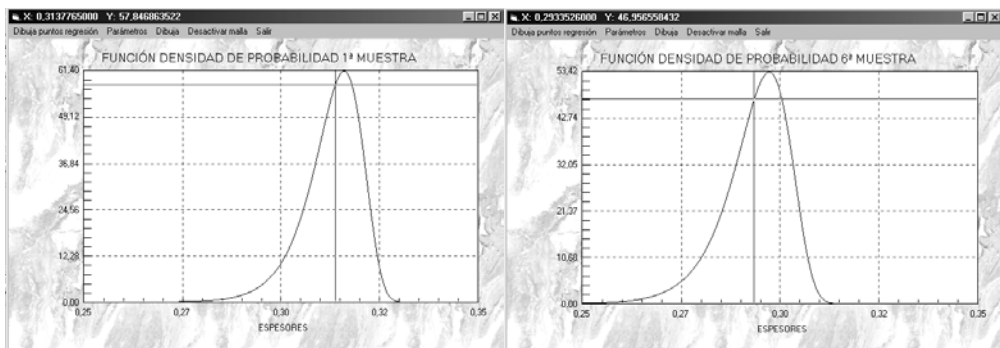


Figura 1: Distribución de espesores de la 1ª muestra (izquierda) y 6ª muestra (derecha).

Una vez obtenidos los valores de los parámetros para las distintas muestras se ha de establecer el valor práctico mínimo de espesor que es capaz de soportar las condiciones de funcionamiento. El equipo de ingeniería ha establecido el espesor mínimo en $3,32 \times 10^{-3}$ m. Sin embargo, se ha llegado a la conclusión de que dicho espesor es demasiado bajo para cubrir situaciones anómalas, por lo que se ha introducido un factor de seguridad.

Además, a través de un análisis de riesgos, se establece que, debido a un alto riesgo de pérdida de producción e integridad para la salud, el coste asociado a dicho fallo se valora en 510.860 €. Por otro lado, por razones económicas, se desea mantener este riesgo controlado y por debajo de 60.101 €. Puesto que existe riesgo para la salud se ha establecido que la máxima probabilidad de fallo permitida sea de un 0,01%.

Para estimar la vida remanente del equipo se realiza el siguiente procedimiento:

1. Se halla el valor del parámetro de escala crítico, en este caso un espesor característico, tomando como datos de entrada primero el parámetro de forma de la última muestra, segundo como valor de la variable (espesor) el espesor práctico mínimo y tercero la probabilidad deseada de fallo.
2. Se establece una regresión de los espesores característicos (parámetro de escala) a lo largo de las distintas inspecciones.
3. Se extrapola la función regresión hasta el punto de corte con el parámetro de escala crítico. Para la unidad de tiempo de ese punto de corte se establece el final de la vida del elemento (vida útil). La vida remanente será la diferencia entre el tiempo de la última inspección y la estimación de la vida del equipo.

La solución obtenida para el ejemplo desarrollado se muestra en la figura 2.

Es posible estimar los valores que se obtendrían en la siguiente inspección a través de un análisis mediante regresión de las medidas. También se puede apreciar la evolución temporal de los espesores en las distintas localizaciones. Así el valor estimado de los espesores en las distintas localizaciones para una inspección dentro de otros dos años se muestran en la tabla 1.

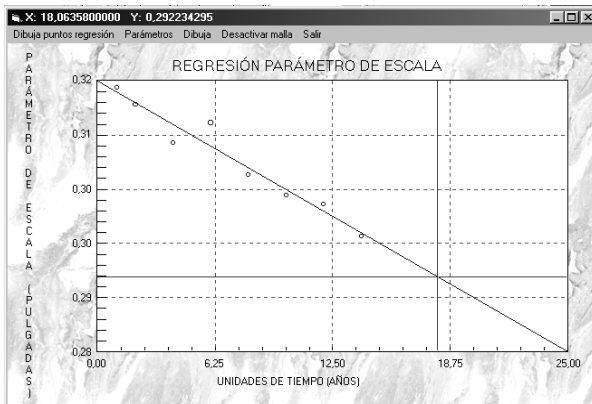


Figura 2: Gráfico de la regresión del parámetro de escala.

Localización	Extrapolación año 16	Localización	Extrapolación año 16
1	0,3056	4	0,2858
2	0,2944	5	0,2841
3	0,2887	6	0,2925

Tabla 1: Previsiones sobre el espesor en diferentes localizaciones de una tubería.

Tomando como datos de partida los costes de mantenimiento en sus distintas políticas es posible:

- Calcular en base a costes la existencia de un intervalo óptimo de mantenimiento preventivo sistemático frente a una política correctiva.
- Calcular en base a costes la existencia de una rentabilidad de efectuar Mantenimiento Predictivo y el cálculo del valor óptimo entre inspecciones.

2.2 Técnicas de optimización de la programación de las inspecciones de Mantenimiento Predictivo.

A continuación, se presentan los diferentes métodos diseñados para la programación de las inspecciones de Mantenimiento Predictivo, siendo válidos para cualquier técnica predictiva.

2.2.1 Método integrando las funciones de distribución de fallos y de degradación.

La función densidad de probabilidad de fallos proporciona el valor medio de la vida de un elemento, mientras que la función de degradación aporta información sobre la vida útil de ese mismo elemento. Ambas funciones se pueden relacionar, como se muestra en la figura 3.

Las funciones de degradación son empíricas y pueden sufrir modificaciones en función del nivel de utilización del equipo industrial, calidad de las acciones de mantenimiento efectuadas, etc. La función de degradación puede ser modulada por la función densidad de probabilidad de fallos del elemento. A partir de la función distribución de fallos de un elemento se puede programar el instante en el que se realizará la primera inspección de Mantenimiento Predictivo para una fiabilidad dada, que será inferior o superior en función del nivel de riesgo de fallo que se quiera asumir.

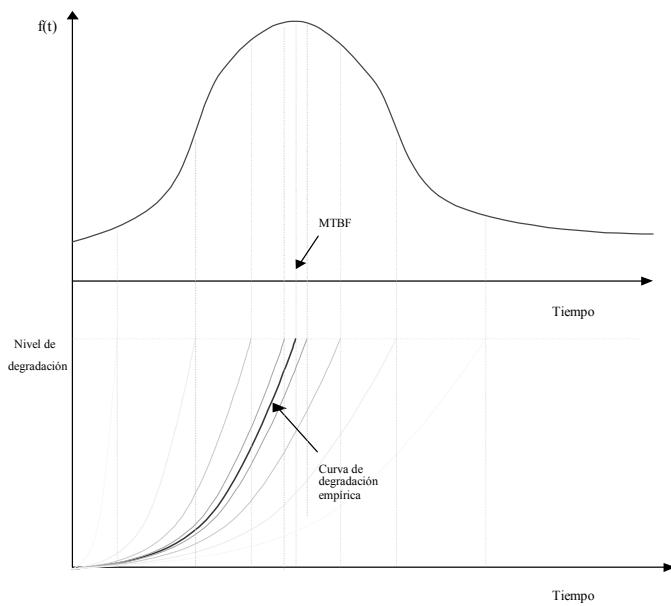


Figura 3: Relación entre las funciones de degradación y densidad de probabilidad.

Se tiene un nivel de degradación alcanzado para la primera inspección. El resto de las inspecciones se van a programar partiendo de la función de degradación y distribuyéndose en el tiempo considerando la experiencia del implantador del programa de Mantenimiento Predictivo. Es necesario establecer un nivel máximo de degradación. A continuación, se asigna una periodicidad a las inspecciones de Mantenimiento Predictivo dependiendo del nivel de degradación que se aprecie. Finalmente, debe efectuarse un análisis de costes de la estrategia diseñada que se puede comparar con el de otras técnicas propuestas.

Los costes asociados a las inspecciones predictivas que se van a considerar son los siguientes:

- Coste de cada inspección, tratamiento y diagnóstico de datos (C_{IU}).
- Coste de amortización de la instrumentación de Mantenimiento Predictivo (C_A).
- Coste del fallo (C_F). Se incluyen todos los costes que se derivan de un fallo, como el de reparación o de la indisponibilidad de planta.
- Coste de la no-fiabilidad (NR). La primera de las inspecciones se efectúa para un nivel de fiabilidad dado, lo que supone un riesgo, puesto que se ha asumido que anteriormente a esta inspección no se tienen fallos.

El coste de la programación de Mantenimiento Predictivo (CPR) se define como:

$$CPR = n \times C_{IU} + C_A + C_F \times NR \quad (1)$$

2.2.2 Método del coste del riesgo.

En este método se requiere la función de degradación del elemento e información sobre costes; se van a considerar los siguientes costes: el coste de la ejecución de las actividades de

Mantenimiento Predictivo, el coste del fallo y el coste de la no realización de las inspecciones de Mantenimiento Predictivo, que se va a denominar coste del riesgo.

Se hace depender el coste del riesgo del coste de fallo del elemento, en el cual se incluye todos los costes asociados al fallo como son los de correctivo, pérdidas por parada en la producción, etc. Por tanto, el coste del riesgo es:

$$CR = CF \times \alpha, \quad (2)$$

siendo CR el coste del riesgo, CF el coste del fallo y α un coeficiente denominado coeficiente de riesgo, $0 \leq \alpha \leq 1$. Se hace depender α de la curva de degradación del elemento con lo que:

$$\alpha = \frac{N(t)}{N_{max}}, \quad (3)$$

siendo $N(t)$ el nivel de degradación alcanzado en un momento dado y N_{max} el nivel máximo de degradación admisible o de rotura.

Si se suponen los elementos A y B, cuyas curvas de degradación se pueden apreciar en la figura 4.

$$N(t)_A > N(t)_B \Rightarrow \frac{N(t)_A}{N_{max}} > \frac{N(t)_B}{N_{max}} \Rightarrow \alpha_A > \alpha_B \quad (4)$$

Cada vez que se efectúa una inspección de Mantenimiento Predictivo y se verifica que el elemento sigue la curva de degradación, se garantiza la imposibilidad del fallo. Por tanto, el coste del riesgo toma el valor cero modificándose el coeficiente α según la expresión 5.

$$\alpha = \frac{N(t)}{N_{max}} \times \frac{T_I}{T_V} \quad (5)$$

donde T_I es el tiempo transcurrido desde la última inspección y T_V tiempo de vida del elemento según la curva de degradación. Por tanto, si U_i es el instante de la última inspección:

$$\alpha = \frac{N(t)}{N_{max}} \times \frac{(t - U_i)}{T_V} \quad (6)$$

Si se fija un coste del riesgo máximo para el cual se desea que se realicen las inspecciones se obtiene la programación de Mantenimiento Predictivo.

Si se supone que los costes de fallo son los mismos para los elementos A y B, y se toma un valor de 1.10^6 u. m. Se asigna un coste del riesgo asumido de 1.10^5 u. m. El nivel máximo de degradación que va a ser admitido es de 600 unidades de degradación, y el tiempo de vida para los 2 elementos es de 26 unidades de tiempo y CR máximo = 1.10^5 e inicialmente $U_i = 0$.

Si se modifica el tiempo haciéndolo crecer desde 0 a 26, instante de tiempo para el cual se alcanza la degradación máxima, CR se incrementa; cada vez que CR alcanza el valor CR máximo se hace $U_i = t$, instante para el que se programa una inspección de Mantenimiento Predictivo. Los resultados obtenidos para los elementos propuestos son los que se muestran en la tabla 2 [9]:

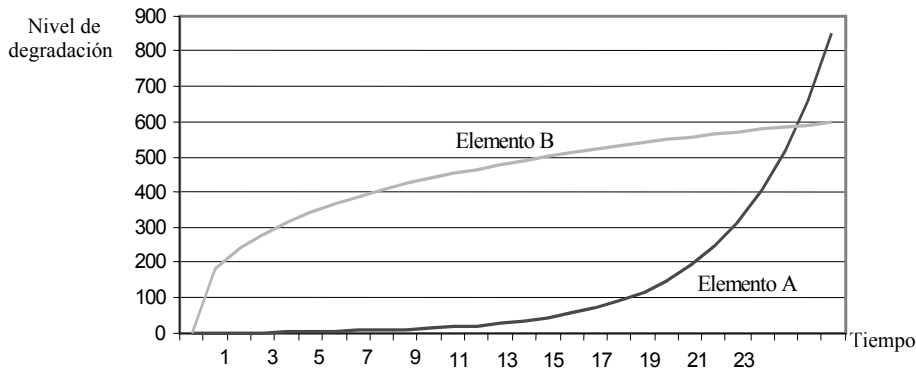


Figura 4: Curvas de degradación.

INSPECCIÓN	ELEMENTO A			ELEMENTO B		
	Nivel	Momento	Intervalo	Nivel	Momento	Intervalo
1	86,14	17,87	17,87	332,86	4,63	4,63
2	306,23	22,91	5,04	412,26	8,37	3,74
3	590,47	25,53	2,62	462,06	11,70	3,33
4				498,71	14,76	3,09
5				527,75	17,71	2,92
6				551,78	20,50	2,79
7				572,29	23,19	2,69
8				590,17	25,8	2,61

Tabla 2: Estrategia asociada a los elementos A y B.

Se obtiene un número superior de inspecciones para el elemento B que para el A. Ello es debido a que el elemento B posee una función de degradación de crecimiento rápido, por lo que sobre este elemento se tendrá que efectuar un control superior que sobre el elemento A. En la figura 5 se representa como varía el coste de los dos elementos.

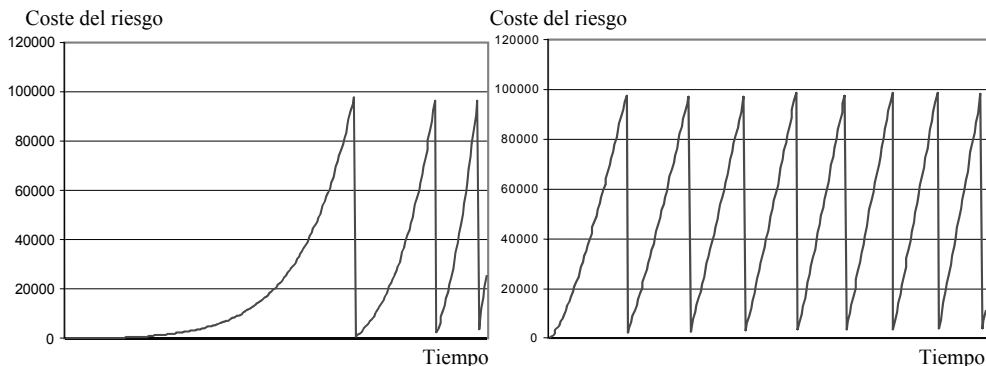


Figura 5: Variación del coste del riesgo de los elementos A (izquierda) y B (derecha).

Si se incrementa o disminuye el CR máximo admisible disminuye o se incrementa respectivamente el número de inspecciones de Mantenimiento Predictivo, y con ello los costes

de la realización de inspecciones. Es posible encontrar un valor de CR máximo que minimice el coste total de la estrategia de Mantenimiento Predictivo.

2.2.3 Método del mínimo coste por inspección.

Este método minimiza la suma de los costes de correctivo, preventivo y predictivo, de forma que en ese instante se aconseja efectuar la inspección de Mantenimiento Predictivo. Para ello se definen los siguientes costes:

- $C_{c_{ij}}$ son los costes de correctivo previos a la inspección de predictivo i que tienen lugar en un intervalo de tiempo j desde la anterior inspección de predictivo.
- $C_{p_{ij}}$ son los costes de preventivo previos a la inspección de predictivo i que tienen lugar en un intervalo de tiempo j desde la anterior inspección de predictivo.
- $C_{pd_{ij}}$ son los costes de predictivo de la inspección de predictivo i que tienen lugar en un intervalo de tiempo j desde la anterior inspección de predictivo.
- $C_{t_{ij}}$ son los costes totales previos a la inspección de predictivo i que tienen lugar en un intervalo de tiempo j desde la anterior inspección de predictivo.

El periodo para el cual se ha obtenido el coste total mínimo es el que indica el instante en el que debe efectuarse la primera inspección de Mantenimiento Predictivo. A partir del instante de realizar la primera inspección se repite el procedimiento.

2.2.4 Método del mínimo coste por periodo acumulado.

Para realizar las inspecciones de Mantenimiento Predictivo se selecciona el instante en el cual la media del coste acumulado de los periodos es mínima. Se continúa con un procedimiento similar para efectuar la toma de decisiones sobre la programación del resto de las inspecciones de Mantenimiento Predictivo.

Se ha desarrollado el programa informático Sistema de Programación de Inspecciones en Mantenimiento Predictivo (SPI-MP) en Visual Basic 6.0. SPI-MP incorpora las opciones de programar las inspecciones predictivas atendiendo a las técnicas expuestas.

Referencias

- [1] Wang, W., (1999) "A model to determine the Optimal Critical Level and the Monitoring Intervals in Condition Based Maintenance, Technical Report CMS-99-07.
- [2] Carnero, C., (2001) "Evaluación del ciclo de vida de un Programa de Mantenimiento Predictivo mediante técnicas multicriterio", Tesis Doctoral, Universidad de Castilla-La Mancha, ETSII.
- [3] Scarf, P. A., (1997) "On the application of mathematical models in maintenance", *European Journal of Operational Research*, Vol. 99, pp. 493-506.
- [4] Crespo, A., Sánchez, A., Moreu, P., (2000) "Técnicas de investigación operativa aplicadas al mantenimiento", *Mantenimiento*, septiembre.
- [5] Hahn, G. J., Doganaksoy, N., Meeker, W. Q., (2000) "Mejora de la fiabilidad. Características y métodos", *Gestión de Activos Industriales*, septiembre/octubre, pp. 45-50.
- [6] Crevecoeur, G.U., (1994) "Reliability assessment of ageing operating systems", *European Journal Of Mechanical Engineering*, Vol.39, N°4, pp. 219-228.

- [7] Butler, R. W.; Johnson, S. C., (1995) "Techniques for modeling the reliability of fault-tolerant systems with the Markov State-Space approach", NASA, Langley Research Center.
- [8] Navarro J., (2000) "Estimación de la vida remanente de equipos industriales aplicando técnicas fiabilísticas a la evolución de medidas de espesores" Proyecto fin de carrera, Universidad de Castilla-La Mancha, ETSII.
- [9] Grueso, F. A., (2001) "Optimización de las inspecciones de mantenimiento predictivo mediante integración de la curva de distribución de fallos y las curvas de degradación", Proyecto fin de carrera, Universidad de Castilla-La Mancha, ETSII.