Ingeniería y mantenimiento aplicado a válvulas relacionadas con la seguridad en centrales nucleares

M.ª F. Verdú y J. Pérez-Aranda

La División de Generación Nuclear de Iberdrola Ingeniería y Construcción cuenta con un Grupo de Válvulas que dispone de amplia experiencia en trabajos de ingeniería y servicios relacionados con las mismas. Además, se colabora con Unesa como apoyo técnico y centro de referencia.
La experiencia de Iberdrola Ingeniería y Construcción en el área de válvulas en centrales nucleares permite dar una respuesta eficaz a las trabajos tanto de ingeniería como de mantenimiento que puedan surgir en una planta y que requieren un alto grado de conocimiento y especialización, tanto en operación normal, como durante las recargas.

Nuclear División in Iberdrola Engineering and Construction has a team with extensive experience on engineering and services works related to valves. Also, this team is linked to UNESA as Technical Support and Reference Center. Iberdrola Engineering and Construction experience in nuclear power plants valves, gives effective response to engineering and maintenance works that can be demanded in a nuclear power plant and it requires a high degree of qualification and knowledge both in Operation and Outages.

Mª FE VERDÚ RÍOS
es ingeniero industrial, especialidad Mecánica por la ETSII de la Universidad Politécnica de Madrid. Desde 1997 trabaja en Iberdrola Ingeniería y Construcción, actualmente en el Departamento de Ingeniería a Centrales en Explotación dentro de la División de Generación Nuclear como responsable de Ingeniería del Proyecto CN Cofrentes en las oficinas centrales así como de las áreas de especialización de Válvulas y Gestión de Vida.

JAVIER PÉREZ-ARANDA LOPERA
es ingeniero industrial por la Universidad Pontificia de Comillas (ICAI) y Project Management Professional (PMP) por el Project Management Institute (PMI). Con 9 años de experiencia profesional, desde 2008 trabaja en IBERDROLA INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN, en la actualidad como Responsable del Grupo de Válvulas en el Departamento de Ingeniería a Centrales en Explotación dentro de la División de Generación Nuclear.

ANTECENDENTES

Válvulas motorizadas

Para las centrales de diseño americano, se publicaron una serie de documentos como IEB 81-02, IEB 81-02 Suplemento, IN 82-10, IN 81-31, AEOD-E501 e IN 85-50 en los que se recogían los diferentes problemas y fallos ocurridos en las válvulas motorizadas (MOV). A éstos se añadió el documento IEB 85-03, surgido como consecuencia de la imposibilidad de abrir las válvulas de aislamiento AFW por mal ajuste del interruptor de par en la central nuclear David Besse. Como consecuencia de los hechos ocurridos, la NRC editó la *Generic Letter* (GL) 89-10 que englobaba todos los documentos existentes y recomendaba el establecimiento de un programa para demostrar que las MOV relacionadas con la seguridad eran capaces de desarrollar su función en condiciones Base de Diseño.

La implementación de la G L 89-10 supuso la realización de una serie de actividades tales como, revisión de bases de diseño, de puntos de tarado de los interruptores, análisis de fallos, creación de procedimientos y programas de pruebas de diagnosis periódicas.

A este documento se le añadieron una serie de suplementos que aportaban información adicional para ayudar a las centrales a definir los alcances.

Conforme la industria va adquiriendo más conocimiento se constatan nuevas necesidades de estudio como la degradación de los materiales, por lo que surge una nueva carta genérica, la G L 96-05 bajo el título *Verificación periódica de la capacidad, en condiciones base de diseño, de válvulas motorizadas relacionadas con la seguridad*. La GL 96-05 engloba a la GL 89-10 y sus suplementos en lo que a verificación periódica se refiere. Se introducen los conceptos de riesgo y margen para establecer las periodicidades de pruebas de diagnosis en las MOV.

Además de las GL 89-10 y 96-05 que son las fundamentales en cuanto a programas regulatorios en MOV se han ido publicando otros documentos regulatorios que han instado a las plantas a realizar ciertos estudios específicos. Entre ellos, cabe destacar los siguientes:

- *Generic Letter* 95-07 *Pressure Locking and Thermal Binding of safety Related Power Operated Gate Valves*, fenómenos que aplican únicamente a válvulas de compuerta de cuña flexible.
- NUREG/CP-0152 en el que se recogen las causas de aparición del

fenómeno del *pressure induced binding* en MOV de compuerta de cuña sólida.

Posteriormente, la industria, para dar respuesta a la GL 96-05, edita el documento de referencia MPR-2524-A donde se refleja el resultado de un programa de pruebas dinámicas en una serie de válvulas aportadas por la mayoría de centrales en Estados Unidos con objeto de identificar las degradaciones sufridas por cada tipo de válvula.

Válvulas operadas por aire

A raíz de la experiencia obtenida en la industria con las válvulas motorizadas, el sector en EE UU decide tomar la iniciativa en las válvulas operadas con aire (AOV) relacionadas con la seguridad o con funciones importantes para la misma con objeto de realizar una mayor vigilancia también en este tipo de válvulas y evitar cualquier incidente que pueda ocurrir. Para ello se edita el documento *Joint Owners group Air Operated Valve Program* de ref. NX-1018 que sirve de guía para establecer estos programas en las plantas.

La NRC no establece ningún documento regulador aunque realiza un seguimiento de los trabajos englobados dentro de esta iniciativa. Sin embargo, el Consejo de Seguridad Nuclear edita una Instrucción Técnica de Seguridad en la que se establecen los plazos de implantación de este programa en las plantas españolas.

Toda la normativa descrita es de aplicación a centrales nucleares de diseño americano. Las centrales con otros tipos de diseños cumplen normalmente con la normativa implantada en el país de origen la planta. No obstante, los organismos reguladores de cada uno de ellos son los que finalmente imponen la normativa a seguir.

INGENIERÍA DE VÁLVULAS

Como consecuencia de los programas regulatorios e independientemente de los cálculos de diseño que se realizan en las fases previas a la fabricación, es preciso realizar a cada válvula una serie de cálculos de ingeniería que fijarán los criterios de ajuste a emplear durante las pruebas periódicas de diagnosis. Cabe destacar que estos cálculos se apoyan en información obtenida de la industria norteamericana pero que muchos de ellos son aplicables a cualquier tipo de diseño de planta.

El objetivo final de dichos cálculos es la obtención de unas ventanas de ajuste que sirvan de herramienta para garantizar que las válvulas se taran a unos niveles de esfuerzo lo suficientemente altos como para que éstas puedan realizar su función de seguridad (abrir o cerrar) bajo las condiciones de un accidente Base de Diseño y sin sobrepasar los límites estructurales del conjunto válvula-actuador y la capacidad del actuador. Por todo ello, para obtener las ventanas de ajuste de cada válvula, se necesitan otra serie de cálculos complementarios los cuales se definen a continuación.

Cálculo de esfuerzo requerido

Este cálculo tiene la finalidad de determinar qué fuerzas deberá vencer el conjunto válvula-actuador en un escenario de accidente. Para ello será necesario conocer cuáles son las cargas de presión y fricción en el vástago, disco y asiento de la válvula. Este análisis se realiza de manera particularizada para cada tipo de válvula ya que depende de cuál sea su configuración, los materiales empleados en su fabricación, el tipo de empaquetadura utilizada, así como de las características del sistema de la planta en la que se ha instalado.

En líneas generales el estudio de cualquier válvula se puede descomponer en esfuerzos no dependientes de las condiciones del fluido (fricción en empaquetadura), y esfuerzos generados por la presión interna de la válvula (efecto pistón y presión diferencial) (Figura 1).

Capacidad del actuador

Mediante este cálculo se verifica que el actuador es capaz de suministrar un par/esfuerzo superior al requerido por la válvula bajo las condiciones Base de Diseño. Para el caso de actuadores motorizados, esto no es suficiente a la hora de evaluar su capacidad ya que también es necesario garantizar que para dicho ajuste el motor no trabajará en condiciones de rotor bloqueado (capacidad con tensión degradada). Además, no se excederán los límites estructurales de la válvula y/o el actuador (puntos débiles de la válvula y ratio actuador).

Cálculo de capacidad del actuador en condiciones de tensión degradada

Una vez se ha comprobado que el actuador tiene capacidad suficiente, es necesario calcular cuánto par puede suministrar teniendo en cuenta las condiciones de degradación de tensión y temperatura a las que se vería expuesto durante un escenario de accidente. Resulta fundamental conocer cuál es esta capacidad del actuador, ya que si se ajustara el interruptor de par por encima de este límite, en una situación de accidente, el motor no generaría par suficiente como para alcanzar el punto de tarado, lo que le llevaría a rotor bloqueado, no permitiendo a la MOV cumplir con la función de seguridad para la que fue diseñada.

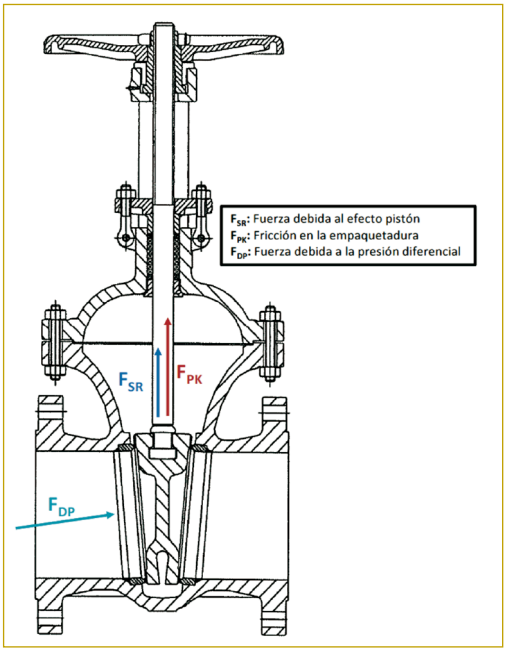

Figura 1: Ejemplo de descomposición de fuerzas en una válvula de compuerta.

Cálculo del límite estructural de válvula y actuador

Por último, para que el ajuste de la válvula durante la diagnosis garantice la operabilidad de la misma, es necesario conocer cuáles son sus límites estructurales.

En lo relativo a los actuadores, es generalmente el fabricante quien facilita la información necesaria sobre los máximos ratios de par y esfuerzo que su componente es capaz de soportar (en el caso, por ejemplo, del suministrador *Limitorque* estos datos están publicados en su *Technical Update 92.02*).

Para el caso del límite estructural de válvulas, las ingenierías realizan cálculos que complementan a los de diseño que realizan los fabricantes. A estos se les denomina *cálculos de puntos débiles*, y tienen como objeto modelar todos los componentes, subcomponentes o conexiones entre componentes de una válvula para determinar cuál de ellos limita el empuje o par máximo que puede ser suministrado por el actuador. Un cálculo en condiciones de diseño/operación permite conocer el empuje o par máximo al que la válvula puede ser sometido sin que su operabilidad se vea afectada.

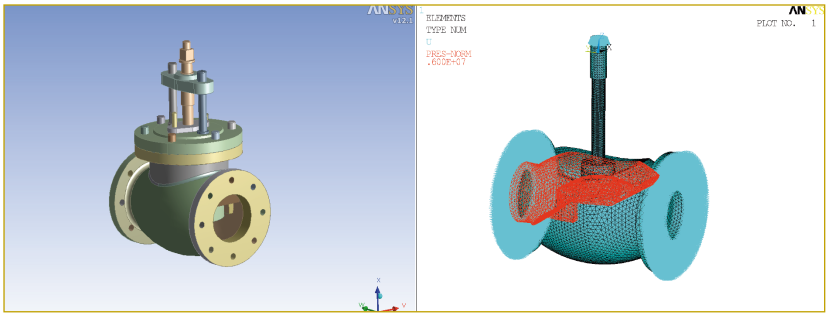

Figura 2. Válvula de globo modelada mediante elementos finitos.

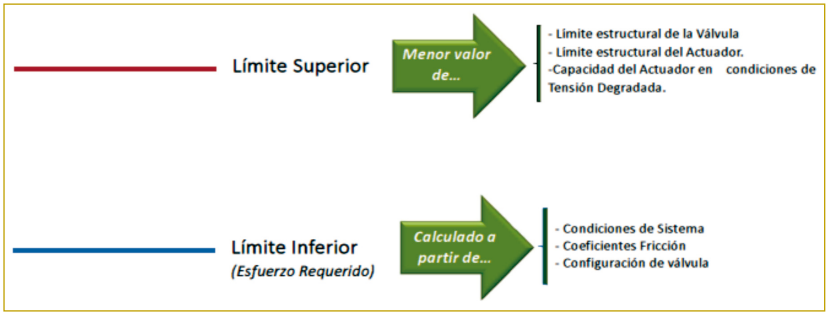

Figura 3. Ventana de ajuste de una válvula motorizada.

Generalmente, se emplea el código ASME para el uso de tensiones admisibles en componentes que forman la barrera de presión de la válvula (típicamente cuerpo, tapa y unión tapa-cuerpo). Para los elementos no retenedores de presión, las tensiones admisibles de comparación son impuestas en base a la Teoría de Resistencia de Materiales y el juicio de Ingeniería, permitiendo siempre que el componente cumpla su función de operación de manera correcta. En algunas ocasiones, además, se realizan modelos de elementos finitos complementarios (Figura 2).

Cálculo de la ventana y del margen de ajuste

Para el caso de las MOV, una vez se han obtenido todos los parámetros anteriormente citados, se ha de conformar con ellos las ventanas de ajuste. Estas estarán definidas por un límite inferior (LI) y otro superior (LS). Toda válvula cuyo interruptor de par se encuentre ajustado dentro de su ventana, estará actuando a unos niveles de esfuerzos que garantizarán su operabilidad.

El LI viene definido por el esfuerzo requerido, mientras que el LS es el menor de los límites estructurales de válvula-actuador y el de capacidad en condiciones de tensión degradada (Figura 3).

Además, a estos límites se les aplica un conservadurismo al compensarlos con incertidumbres tales como:

- **Equipo de medida:** considera, tanto el equipo empleado para la diagnosis como el sensor utilizado para el registro del esfuerzo o par en vástago.
- **Repetibilidad del interruptor de par:** evalúa en qué medida, para un determinado ajuste del interruptor de par, el esfuerzo registrado durante la diagnosis se mantiene dentro de unos límites de control.
- ***Rate of loading* (ROL):** cuantifica cómo varía el esfuerzo medido en condiciones estáticas y dinámicas para un mismo ajuste del interruptor de par, es decir, cómo varía la relación entre el par de salida del actuador y el esfuerzo en el eje (a este cociente se le denomina factor de vástago). Esta variación puede llegar a ser del 30% según la NRC *Information Notice* 96-48.

Una vez queda definida la ventana, hay que garantizar que el margen de ajuste (Figura 4) (el cual relaciona el tarado del interruptor de par con el LI) es lo suficientemente amplio como para cubrir la potencial degradación de los componentes hasta que se vuelva a realizar la siguiente prueba periódica. De esta manera, se garantiza durante dicho periodo la operabilidad de la válvula en cuanto a capacidad de actuación se refiere. Las periodicidades, aun estando dadas por documentos existentes en la industria, pueden ser modificadas por las diferentes plantas basadas en la información obtenida de sus análisis de tendencia.

En lo relativo a AOV, las ventanas de ajuste se definen siguiendo criterios similares: el LI está fijado por el esfuerzo requerido en válvula y se verifica que el ajuste en diagnosis no supere los límites estructurales. No obstante, al ser un programa de reciente implantación, se prevé que evolucione con el paso de los años de igual manera que ha sucedido con el de MOV.

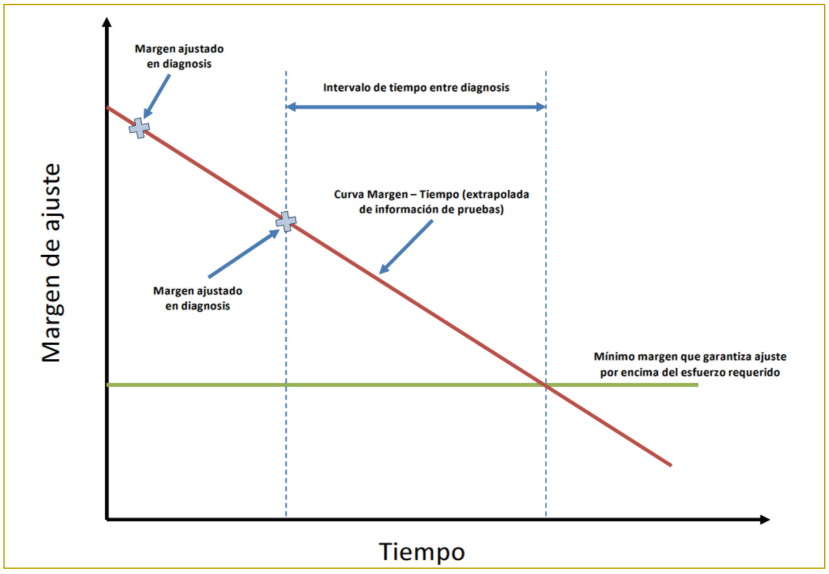

Figura 4: Reducción del margen de ajuste de una MOV en función del tiempo.

PROGRAMAS DE MANTENIMIENTO

Las centrales nucleares disponen de una amplia población de válvulas, de las cuales, sólo una pequeña parte, está sujeta a programas regulatorios por las funciones que desempeñan. *A priori*, las válvulas no tienen el mismo tratamiento que los grandes equipos de una central nuclear, sin embargo, un fallo en una de ellas puede provocar la parada de la planta por lo que

es imprescindible y necesario realizar un seguimiento completo y exhaustivo de las mismas.

Por lo tanto, es recomendable realizar unas buenas prácticas de mantenimiento eléctrico, mecánico y de instrumentación, según aplique a cada tipo de válvula y unas pruebas de diagnosis periódicas según los plazos establecidos en los programas regulatorios con el fin de mantener una vigilancia en válvulas clave de la planta.

Deben existir planes de mantenimiento preventivo tanto para los actuadores como para las válvulas siendo recomendable que se encuentren integrados con los programas de diagnosis y los documentos de ingeniería.

Mantenimiento

En general, en las plantas existen procedimientos de todas las disciplinas (mecánica, eléctrica, I&C) de mantenimiento aplicados a válvulas.

Para el caso de MOV sujetas a programa regulatorio es especialmente recomendable realizar un mantenimiento eléctrico y mecánico del actuador así como revisión mecánica de la válvula de forma periódica para evitar degradaciones en las mismas. En estas actividades se revisa no sólo el engrase de los diferentes componentes sino además el correcto estado de los mismos y en caso necesario, se sustituyen por sus repuestos. Para el caso del *backseat*, cuñas y asientos se verifica que se encuentren en buen estado y en caso contrario se mecaniza el citado *backseat* y se lapean los asientos realizando prueba de azul para verificar un buen sellado. Todo esto unido al programa de diagnosis establece un excelente mantenimiento preventivo de cada válvula. La periodicidad se debe establecer teniendo en cuenta el histórico de cada equipo así como su relación con el riesgo y el margen existente.

También es importante realizar un adecuado mantenimiento a las empaquetaduras, no sólo para evitar fugas sino también para disminuir fricciones en el recorrido. Las empaquetaduras pueden ser de diversos materiales y cada válvula lleva sus propias recomendaciones de fabricante.

Para el caso de los actuadores neumáticos además de revisar y verificar el buen estado de los componentes, el mantenimiento debe enfocarse principalmente a conservar la estanqueidad de los diferentes tipos de actuadores. De este modo se debe tener un programa de mantenimiento periódico de sustitución de juntas, revisión de diafragmas y estanqueidad de los paquetes de muelles.

Ensayos

La realización de las pruebas de diagnosis, es un importante paso dentro de las operaciones de mantenimiento preventivo de la planta, ya que a partir de los resultados obtenidos de la prueba, se pueden detectar posibles incidencias en el conjunto válvula-actuador que permitan programar las acciones correctoras necesarias.

Dentro de las pruebas de diagnosis, existen diversos tipos de ensayos dependiendo de lo que se desee medir, así se tendrá:

Calibración en banco de actuadores

Se realiza sobre el actuador de la válvula desacoplado de la misma a fin de poder ajustar los interruptores de par de éste de acuerdo con sus correspondientes ventanas de ajuste.

En dicha prueba se monta el actuador de la válvula sobre un freno eléctrico accionado mediante una unidad de control. Para montar el actuador sobre el freno es necesario sustituir la tuerca de roce original del actuador por una similar que acople en el banco.

En el mercado hay diversos modelos de bancos para permitir la medida en diferentes rangos de par.

El ensayo consiste en realizar una medición del par *as found* tanto al cierre como a la apertura. A continuación, se obtiene la curva par-posición dial desde la posición mínima del dial hasta la máxima (placa limitadora o rango máximo del muelle) a intervalos, normalmente, de un punto y tanto para la apertura como para el cierre. Una vez realizada la calibración se ajustan los diales a la posición requerida según los cálculos (*as left*).

Para el caso de AOV también se recomienda la realización de una prueba con el actuador desacoplado de su válvula para medir la capacidad máxima del actuador. Esta prueba puede realizarse en un banco de pruebas similar al descrito para las MOV o bien mediante el uso de una pieza que frene mecánicamente el actuador en diversas posiciones, con el objetivo de obtener su capacidad máxima en cada una de ellas, registrando dicha capacidad mediante una galga extensiométrica.

Calibración de muelle en actuadores neumáticos

La calibración del muelle en un actuador neumático es necesaria ya que en función de ella se encuentran importantes parámetros de operación de la válvula como son: capacidad, tiempo de actuación y carrera. La calibración se enfoca al ajuste de la gama resorte del muelle, mediante la aplicación de una mayor o menor precarga del mismo.

Pruebas de diagnosis estáticas

Es la prueba más común y en ella se realiza el ensayo y evaluación del conjunto válvula – actuador.

Las pruebas de diagnosis de MOV, consisten básicamente en el registro de una serie de parámetros como son la tensión instantánea en cada una de las fases del motor, la intensidad instantánea de dichas fases, los valores de empuje y par a los que se ve sometido el husillo de la válvula (esta medida se realiza preferiblemente con extensometría en zona libre del vástago, aunque existen también sensores para medir en vástago roscado y puente de la válvula), la actuación de los distintos interruptores de control de la válvula, el desplazamiento del paquete de muelles o el giro del interruptor de par.

En las pruebas de diagnosis de AOV se registran principalmente los valores de presión de suministro, señal del transductor I/P, estanqueidad del actuador, desplazamiento, capacidad del actuador, tiempos de actuación, ajuste de los finales de carrera y fricciones en el conjunto válvula-actuador.

Con la evaluación de estos parámetros, convenientemente tratados, se puede realizar el correspondiente análisis del conjunto válvula-actuador y observar posibles anomalías que necesiten una corrección inmediata, a medio o a largo plazo.

Pruebas de diagnosis dinámicas

Aunque por la operativa que conllevan es difícil realizar este tipo de pruebas en una planta, son ensayos muy interesantes, que pueden dar información adicional a las pruebas de diagnosis estáticas convencionales. Una prueba dinámica es una prueba de diagnosis con caudal. En este tipo de pruebas se registran los mismos parámetros junto con la presión aguas arriba y aguas abajo de la válvula.
Al realizar una prueba de este tipo se puede obtener el coeficiente de fricción disco-asiento que puede realimentar los cálculos de esfuerzo requerido.

INTEGRACIÓN ENTRE MANTENIMIENTO E INGENIERÍA

Las prácticas de una buena gestión de proyectos pasan ineludiblemente por una eficaz integración entre sus diferentes procesos.

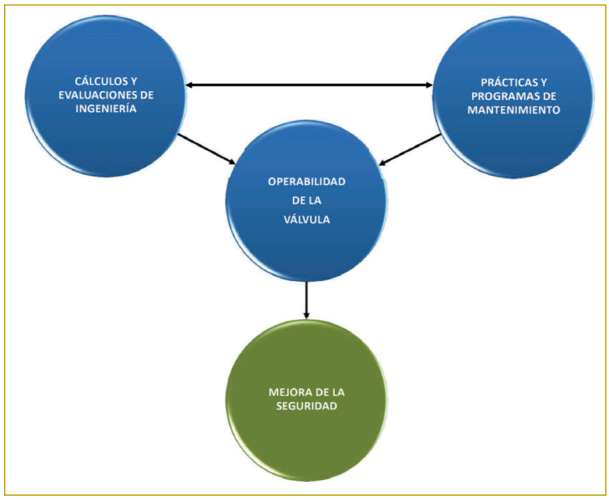

Figura 5: Esquema integración entre Ingeniería y Mantenimiento.

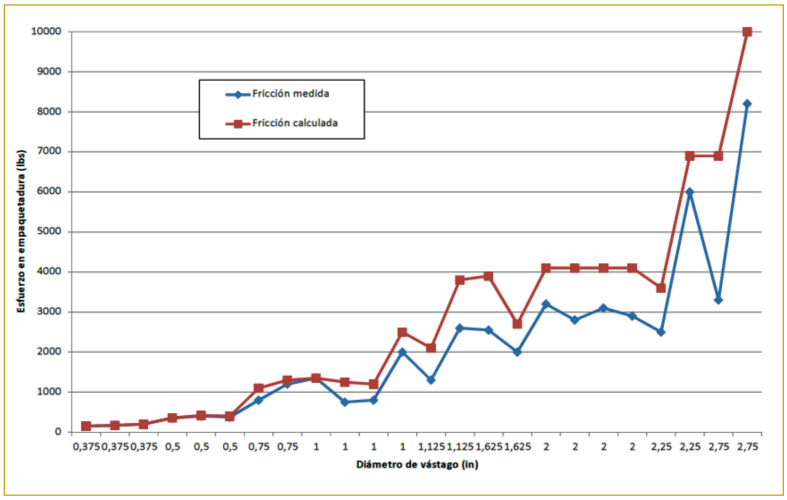

Figura 6: Comparativa entre el esfuerzo en empaquetadura medido y calculado.

Esta afirmación no deja de ser cierta cuando hablamos de proyectos de Válvulas. Cuando éstos se definen, se considera que para un buen comportamiento de las válvulas es necesario que en su mantenimiento se tengan en cuenta las hipótesis consideradas por la Ingeniería, y que además, los cálculos de Ingeniería sean realimentados con los resultados de las mediciones realizadas durante las pruebas de diagnosis. Si las prácticas de Mantenimiento no son las adecuadas o si la Ingeniería no modela satisfactoriamente el funcionamiento del componente, los resultados obtenidos no serán realistas, y por lo tanto, no servirán para justificar la operabilidad del conjunto válvula-actuador (Figura 5).

Algunos ejemplos existentes en la industria, entre otros, son:

- Fricción en empaquetadura: diferentes estudios demuestran la elevada interrelación entre las fórmulas empleadas para calcular los esfuerzos en empaquetaduras y su comportamiento real (Figura 6) (por ejemplo, *Valve Packing Performance Improvement*, EPRI TR 1000923).
  Si existe una alta integración entre Ingeniería y Mantenimiento, los resultados de las diagnosis pueden determinar con un elevado grado de confianza si la empaquetadura está en buenas condiciones, degradada o es preciso darle un nuevo apriete debido a la consolidación; y de igual manera, si los resultados obtenidos son fiables, se pueden usar para realimentar los cálculos de Ingeniería, lo que dará una información más realista del comportamiento de cada MOV.
- Lubricación de tuercas de roce: las características y el estado del lubricante empleado en la zona roscada del vástago de una válvula afecta considerablemente al esfuerzo medido en su eje. Los efectos de la temperatura sobre el lubricante, así como su envejecimiento, provocan aumentos en los coeficientes de fricción de las tuercas de roce, lo que supone una pérdida en la capacidad del actuador.
  Si no se emplean lubricantes cuyo comportamiento es conocido y si no existen programas de mantenimiento que garanticen que éstos se encuentren en óptimas condiciones, las consideraciones de Ingeniería que fueron empleadas para determinar la ventana de ajuste de una MOV dejan de ser ciertas, y por lo tanto, los resultados obtenidos de las medidas en campo poseen una elevada incertidumbre. Por otro lado, si existen unas adecuadas prácticas de Mantenimiento, éstas pueden ser asumidas por la Ingeniería para realimentar las hipótesis de los cálculos, logrando así que se acerquen más a la realidad.