

PARA ESTABLECER UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO EFICAZ, ES NECESARIO CONOCER DESDE EL INICIO EL ESTADO DE LOS EQUIPOS

T. A. KOZLOSKY

Un Programa de Mantenimiento estratégico eficaz requiere un conjunto de datos y unas fuentes de información coordinadas. Es fundamental disponer de una base de información con el estado de los equipos, a través de los datos de operación, control y diagnóstico, base de diseño y otras fuentes.

Este artículo describe de forma resumida los elementos que componen un programa de mantenimiento estratégico y se centra en el sistema integral de información ALLY de Westinghouse que combina la información sobre el estado de los equipos, realiza un razonamiento automático de sistema experto, organiza y establece prioridades para realizar la diagnosis sobre el estado de los equipos, y ayuda a identificar las acciones de mantenimiento. ALLY ha sido instalado en tres Centrales Nucleares, situadas en la República Checa, Rusia, y China. En este artículo también se da una descripción breve de la aplicación de este programa a estas centrales.

Establishing an effective plant maintenance strategy requires a consortium of information and coordinated resources. A fundamental element of achieving such a program is to have a comprehensive knowledge base of equipment health derived from operational data, monitoring and diagnostic data, design base data, and others.

This paper presents a summary of the elements of a maintenance strategy and focuses on the Westinghouse information integration scheme, called ALLY, that combines equipment health information, performs automated expert system reasoning, organizes and prioritizes equipment health diagnostics, and helps to identify maintenance actions. ALLY has been applied to a VVER nuclear plant located in the Czech Republic, a RBMK nuclear plant located in Russia and a PWR nuclear plant located in China. A short description of these applications is also presented.

ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO

Los elementos necesarios para establecer una estrategia de mantenimiento se resumen en:

1. Control de los indicadores que definen el estado de los equipos.
2. Análisis y diagnóstico de las degradaciones en los equipos.
3. Análisis de causa raíz y confirmación de la diagnosis.
4. Plan de acción: continuar operando, reparar o reemplazar.
5. Ejecución del plan de acción.
6. Documentación de la eficacia del plan para mejorar el proceso.

Los indicadores que definen el estado de los equipos están disponibles desde diversas fuentes independientes.

Los Sistemas de Instrumentación y Control (IyC) suministran la mayoría de los datos, que se enfocan a cubrir las necesidades que tienen los operadores para el seguimiento y operación de la central bajo unas condiciones controladas y de las que, una parte considerable, pueden utilizarse para evaluar el estado de los equipos.

Las alarmas de proceso, tales como las que dan los niveles de vibración de los grandes equipos rotativos o la tem-

peratura de los cojinetes, son unos buenos indicadores de los mecanismos de degradación de los equipos, no obstante, estas alarmas se producen generalmente cuando el daño ha ocurrido y tras el evento, solo se puede ejecutar una estrategia no programada o un mantenimiento correctivo.

Los Programas de Aplicación Nuclear (PAN) de IyC, tales como, el de control de Grandes Motores, utilizan datos de proceso para controlar su estado de uso, como el número total de horas de operación y el número de arranques, comparándolos con los plazos de mantenimiento recomendados por el fabricante, y consecuentemente establecer un programa de mantenimiento preventivo. Otras aplicaciones de los PAN, tales como el del Control del Nivel del Sumidero y del Grado de Fugas en el Circuito Primario, se pueden combinar junto con otros sistemas de detección de fugas (por ejemplo, detección acústica de fugas), con el fin de aumentar la fiabilidad en el diagnóstico de fugas.

Los sistemas de Control y Diagnóstico (CyD) vigilan el estado de los equipos mediante técnicas muy especializadas y pueden alertar con antelación sobre la degradación en los equipos, y son fundamentales para establecer la condición de los equipos o la estrategia o

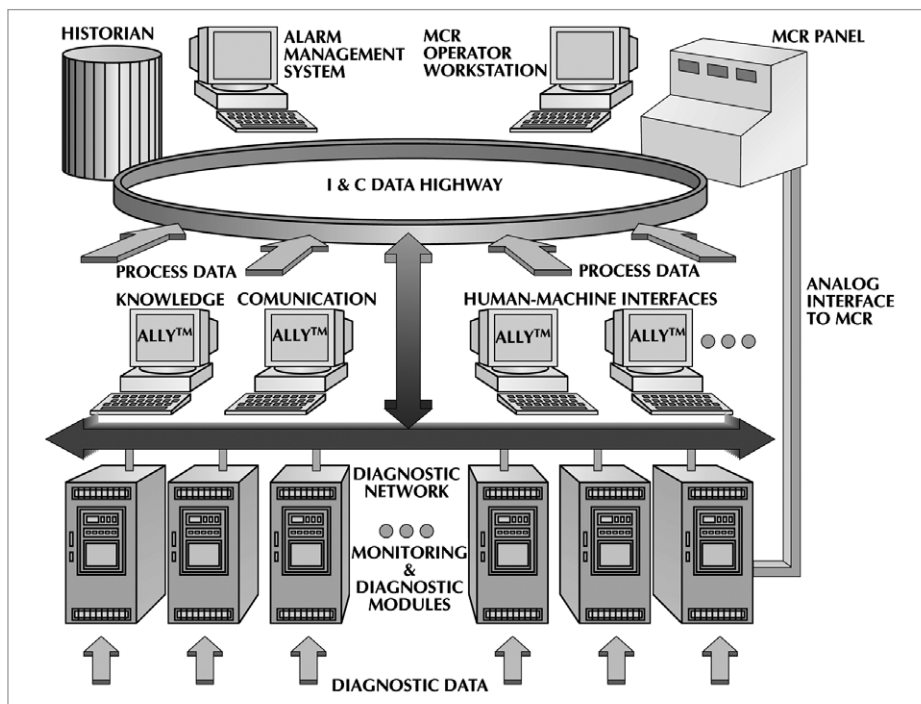


Figura 1. Arquitectura del ALLY.

programa de mantenimiento preventivo, a través de los sensores específicos especializados, de acondicionamiento de señal y de adquisición de datos, procesadores, y equipos locales de interfase hombre-máquina.

Algunos de estos sistemas, tales como los de control de vibraciones en la turbina o en una bomba, son recomendados o incluso impuestos por el fabricante con el propósito de establecer un seguro, aunque puedan o no ser parte del sistema lyC de protección de los equipos. El sistema de control de vibraciones puede generar todos los niveles de vibración, que se podrían utilizar para protección, e incluso puede captar el espectro de vibración, durante transitorios tales como, subidas y bajadas en la operación de Turbina, que dan signos para alertar con antelación sobre un conjunto de mecanismos de degradación. Otros sistemas de CyD, tales como el de partes sueltas, fugas, y sísmico, juegan un papel crítico en la evaluación del estado del sistema y alertan al operador para que inicie la parada de la Central de una forma segura y ordenada, en caso de que apareciesen estas condiciones.

Como los sistemas de CyD producen, en general, datos que no son relevantes para la operación de la Central y son de naturaleza científica (espectro de vibración, tensiones en el material generadas por transitorios, etc), estos sistemas se incorporan dentro de una infraestructura de información específica de la central. En la práctica, no forman parte de la red de seguridad lyC

porque han sido desarrolladas por suministradores que no son de lyC y además muchos de los sistemas de CyD no son requeridos por los organismos reguladores y su coste es algunas veces difícil de justificar. Esto es muy normal en los EEUU, pero menos en los países del Este Europeo, donde los sistemas de CyD se emplean para la seguridad y fiabilidad.

Además de los datos dinámicos suministrados por de los sistemas lyC, y CyD, los datos estáticos, tales como, los de diseño y económicos de los equipos (coste de los mismos, coste de las reparaciones, etc) y los históricos de mantenimiento, también forman una parte importante de la base de datos necesarios.

Dada la gran variedad y diversidad de fuentes de información disponibles, se presenta el reto de integrar toda esta información, con el fin de poder comprobar el estado de los equipos de una forma ordenada.

INTEGRACIÓN DE SISTEMAS: LA PLATAFORMA ALLY

La plataforma ALLY de Westinghouse se diseñó fundamentalmente para integrar los datos e información necesaria para diagnosticar el estado de los equipos. Desde el punto de vista físico, ALLY está formada por una red de sistemas especializados en el Control y Diagnosis, una estación de trabajo de integración ALLY, una red de infraestructuras (cables, concentradores, repetidores, impresoras, etc) y conexión a

la red de datos de lyC, según se muestra en la Figura 1.

Tal como se ha mencionado anteriormente, los sistemas de Control y Diagnosis (CyD) están formados por un conjunto de sistemas independientes y a menudo altamente especializados que precisan un personal especializado y dedicado a su operación. Los datos de estos sistemas se envían con ALLY a las estaciones de trabajo de integración y se convierten en "cajas negras" con entradas y salidas que no requieren la interacción del usuario local.

La red de los sistemas de lyC contiene la información relativa a los datos de proceso y control. Una estación de trabajo ALLY sirve como pasarela de datos para esta red y contiene cortafuegos necesarios para aislar y proteger la operación crítica de los sistemas de lyC.

Las estaciones de trabajo ALLY suministran el enlace con los datos generados en los sistemas de CyD e lyC, centrándose en el control sobre el funcionamiento de los equipos, para uso de los departamentos de ingeniería y mantenimiento. En estas máquinas se integran y organizan los datos para ser procesados y visualizados desde una gran interfase común y necesariamente robusta. Como las estaciones de trabajo ALLY están en un segmento aislado de la red, se pueden instalar en cualquier parte de la Central o incluso acceder a ellas remotamente vía Internet (world-wide-web).

FLUJO DE DATOS

Como la operación de la Central es dinámica y la degradación de los equipos ocurre con el paso del tiempo, el control y evaluación del estado de los equipos se realiza mejor si se hace en tiempo real. La arquitectura del programa (software) ALLY está basado en el procesamiento en tiempo real, y las condiciones son evaluadas tan pronto como se dispone de los datos. Los datos nuevos obtenidos mediante los sistemas de Control y Diagnosis (CyD) y de Instrumentación y Control (lyC), continuamente ponen en funcionamiento las fuentes de información (sistemas expertos basados en reglas o código lógico) para a continuación procesar los datos, e inmediatamente informar al usuario, cuando son evidentes las degradaciones en los equipos.

Como ejemplo de fuentes de información pueden destacarse:

- Vibración de la Bomba Principal: evalúa los datos de vibración conjun-

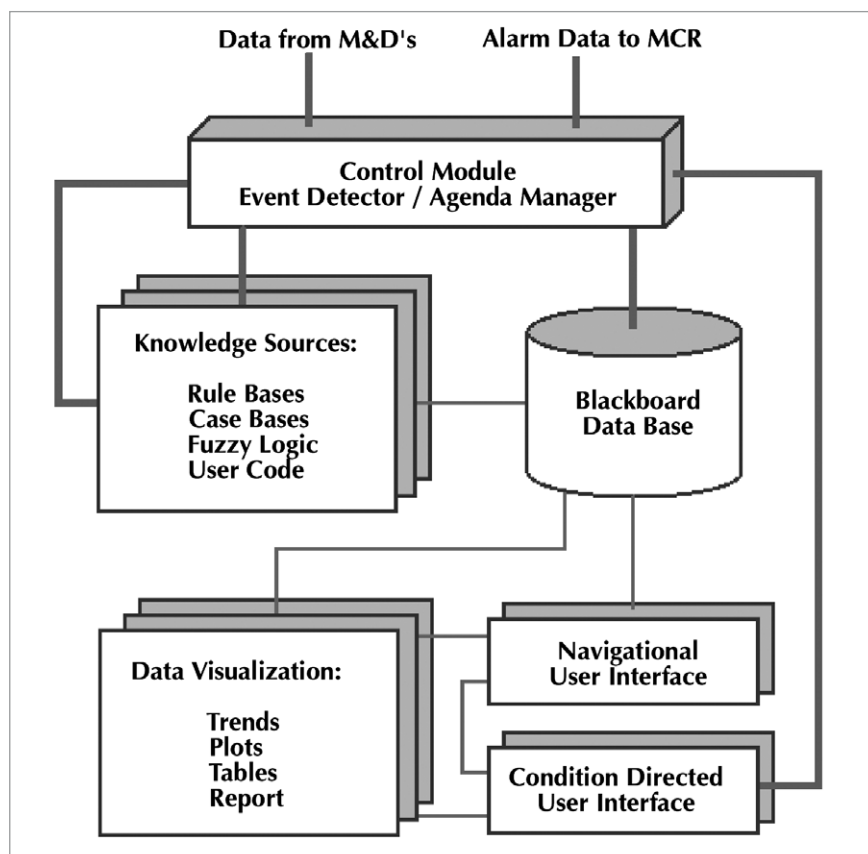


Figura 2. Diagrama de la Arquitectura del programa "Blackboard" ALLY y Flujo de Datos.

tamente con datos de proceso para diagnosticar fallos en el proceso, desgaste de cojinetes, pandeo del eje y fallos en el estator.

- **Análisis de fugas detectadas acústicamente:** define la presencia de fugas mediante sensores acústicos, especifica su situación y estima el grado de fuga.

- **Análisis de la fuga por humedad:** define su presencia y grado mediante sensores de humedad.

- **Asesoramiento de Parada ante Sismo:** evalúa la condición de los equipos principales, antes y después de un terremoto, para ayudar a programar la visita de inspección a pie de los equipos, antes de realizar la parada de la Central de una forma segura y ordenada.

- **Calibración de Sensores:** evalúa el estado y la respuesta de los sensores para especificar cuando se necesita su reemplazo o recalibración.

- **Sala de Control:** combina las condiciones de la diagnosis, para un equipo o sistema dados, desde distintas fuentes, para generar un diagnóstico resumen, que se comunica a los operadores de la sala de control.

Dado que hay que manejar una gran cantidad y variedad de información, es esencial aplicar herramientas organizativas para ayudar al usuario a separar

los equipos que funcionan con normalidad de los que funcionan de forma sospechosa. La base de datos "Blackboard" del ALLY utiliza características de base de datos relacional y de red, desarrolladas originalmente para aplicaciones de inteligencia artificial. Por encima de la base de datos está la interfase del usua-

rio, lugar donde finalmente se presenta y utiliza la información. La figura 2 muestra la arquitectura del programa y las rutas del flujo de datos de la "Blackboard" del ALLY.

INTERFASES DEL USUARIO:

Hay disponibles dos interfaces primarias para el usuario de ALLY: Condición Dirigida y Navegacional. La interfase del usuario llamada Condición Dirigida muestra una lista de condiciones diagnosticadas similar a la de una lista de alarmas. Gracias a la base de datos "Blackboard", se pueden visualizar estas condiciones desde varios puntos de vista (cronológico, confianza en el diagnóstico, severidad de la degradación, etc). A partir de esta interfase, el usuario puede acceder rápidamente a los datos de soporte para verificar el estado, navegar hacia el componente para ver otros datos, o realizar otras actividades de gestión de alarmas. La Figura 3, muestra una tabla resumen de la Alarma ALLY y la información que la sustenta.

La interfase Navegacional suministra al usuario un navegador para visitar el sistema, los modelos gráficos de los equipos y acceder a cualquier tipo de información relacionada con ese modelo. Los Modelos e Iconos tienen un código de colores en función de su condición de diagnosis para llamar la atención del usuario. Los datos que sustentan el modelo son fácilmente accesibles utilizando varias herramientas de visualización de datos. La Figura 4 muestra un ejemplo de despliegue Navegacional.

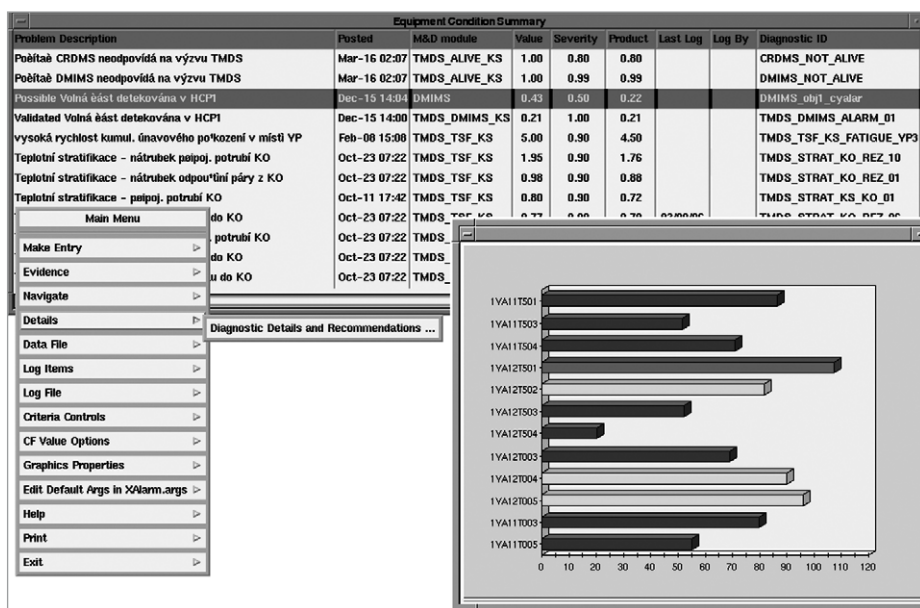


Figura 3. Gestor de Alarmas y Evidencia que lo Sustenta.

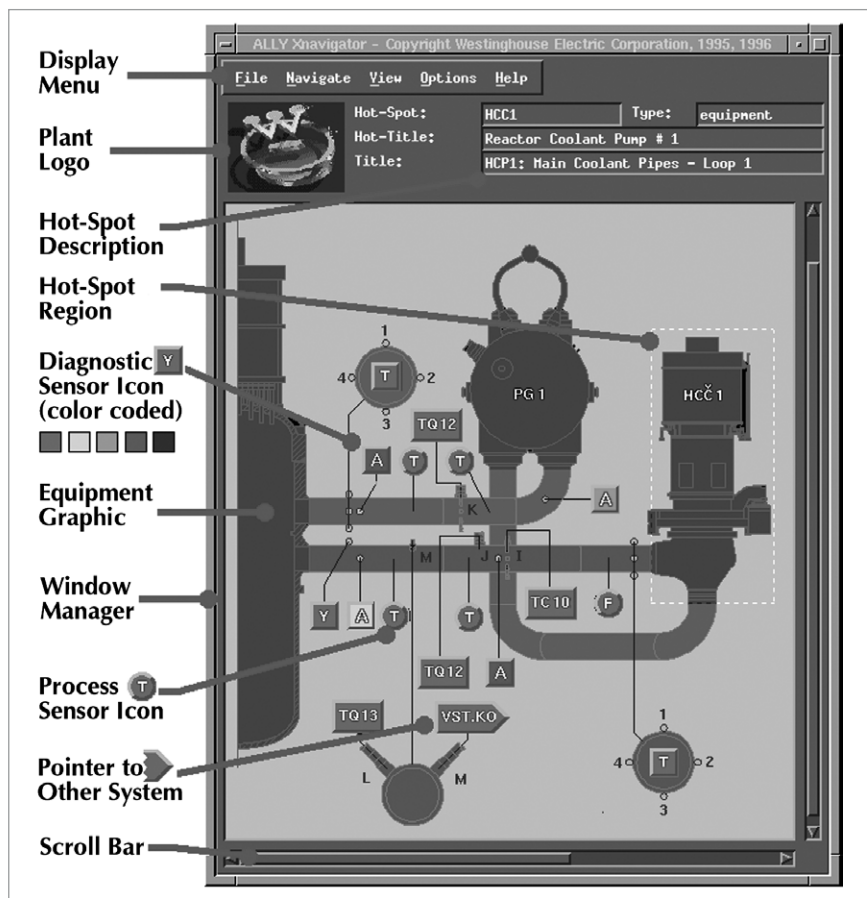


Figura 4. Pantalla de Navegación del Lazo Primario.

Las herramientas de visualización de datos son de extraordinaria importancia ya que el usuario, debe finalmente utilizar esos datos para confirmar el

diagnóstico (tal vez definido automáticamente, por un sistema experto), o para permitirle continuar con el seguimiento del estado del equipo, ya que,

este podría empeorar con el transcurso del tiempo. Como los datos provenientes de distintas fuentes se almacenan en una Base de Datos Común "Black-board", estos se pueden combinar de distintas formas, con el fin, por ejemplo, de realizar análisis paramétricos o de causa raíz.

Es fácil obtener la curva temperatura-tiempo durante un transitorio junto con la tensión latente en el material debido a cargas térmicas para visualizar los efectos del tiempo, temperatura y tensión o para dibujar la tensión en función de la temperatura para un transitorio dado. La Figura 5 muestra una pantalla de datos de una serie de espectros de vibración de una bomba, tomados en el transcurso del tiempo. Los datos de la pantalla tienen un código de colores, que están relacionados con la amplitud de la vibración. Las líneas horizontales dan desde el primer hasta el quinto armónico.

Con ALLY, el departamento de mantenimiento dispone de las herramientas para realizar con eficacia el control y diagnóstico de la degradación de los equipos y para analizar y confirmar el diagnóstico. El paso siguiente será el de decidir el plan de acción.

Las herramientas de decisión, para determinar si continuar la operación, reparar o reemplazar, evalúan el equipo considerando su precio, su importancia para la seguridad y fiabilidad, probabilidad de fallo y sus consecuencias, con el fin de orientar al departamento de mantenimiento hacia la mejor alternativa.

Las lecciones aprendidas de otros casos similares pueden ser consultadas también para su consideración y utilización.

La decisión de continuar con la operación puede requerir un programa de control mas riguroso, mientras que, una decisión de reemplazar, significa el final de vida del componente usado y el reemplazarlo por un modelo nuevo.

Si se ha decidido reparar, se debe comenzar la programación de las actividades de mantenimiento. Las herramientas para programación del mantenimiento ya pueden iniciar la preparación de las ordenes de trabajo, coordinar los medios, los recursos y la fecha para preparar el equipo para su reparación y realización de ésta, hasta ponerle de nuevo en línea. La aplicación lyC del SSCI (Supervisory Sequential Controller Interface) es un procedimiento computerizado que evalúa el estado del equipo y dirige al operador paso a paso para aislarlo, desenergizarlo y prepararlo para un mantenimiento seguro.

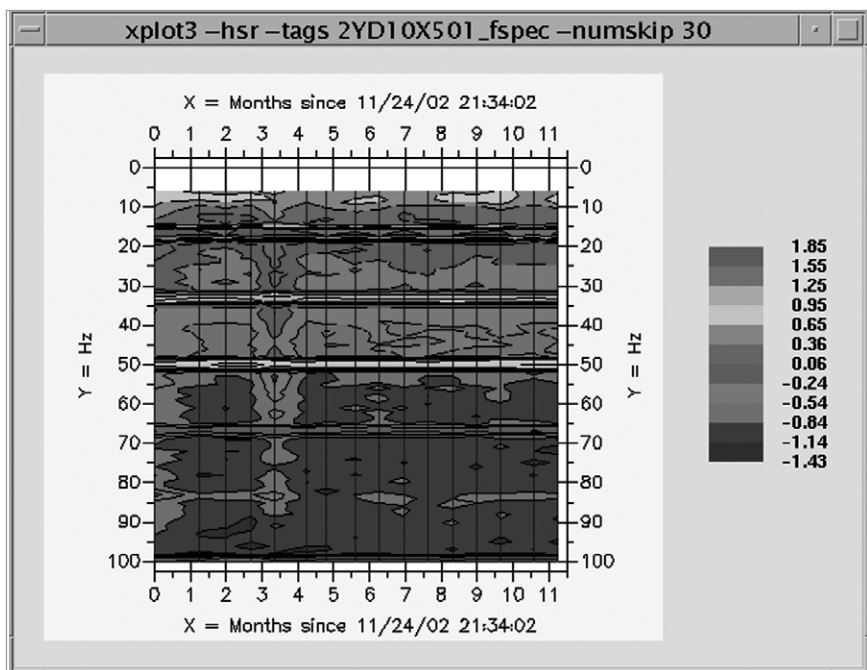


Figura 5. Ejemplo de Pantalla de Visualización de Datos de una serie de espectros de vibración de una bomba respecto al tiempo.

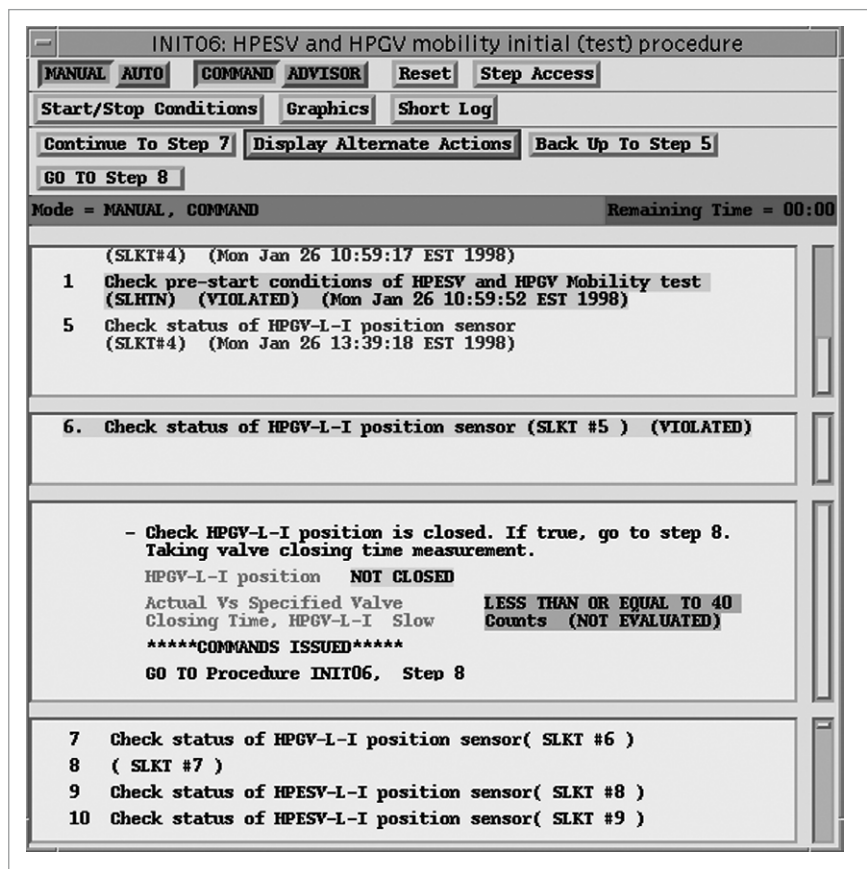


Figura 6. Pantalla SSCI de un Procedimiento Automatizado.

APLICACIONES

Hasta la fecha la plataforma ALLY se ha utilizado en tres Centrales Nucleares. A continuación se da una descripción breve de estas aplicaciones.

En una Central Nuclear situada en la República Checa, la aplicación ALLY consistió en una red de diez sistemas especializados de control y diagnóstico con su propio juego de sensores y equipos de toma de datos, integrado con la red de datos del sistema IyC de control.

En resumen, la aplicación a esta central consistió en los sistemas integrados siguientes:

- Control de partes sueltas: sistema de detección de impactos de metales, utilizando una disposición de sensores acústicos montados sobre la vasija del reactor, generadores de vapor y bombas principales de refrigeración del reactor.

- Control sísmico: mediante acelerómetros triaxiales montados en campo libre y en las estructuras de contención.

- Detección de fugas: mediante una disposición de sensores acústicos montados sobre líneas de alta energía y sensores de humedad dentro de contención.

- Control de vibración de los internos del reactor: control de la vibración en el barrilete del núcleo, elementos de combustible y termohidráulica, mediante acelerómetros montados en el reactor, detectores neutrónicos de potencia extranucleares y detectores neutrónicos fijos intranucleares.

- Control del funcionamiento de los equipos de control de barras: control de su funcionamiento mecánico y eléctrico desde los paneles de posicionamiento y potencia.

- Control de la vibración en la bomba principal: control de la vibración en el eje y carcasa mediante una disposición de sondas de velocidad y aceleración.

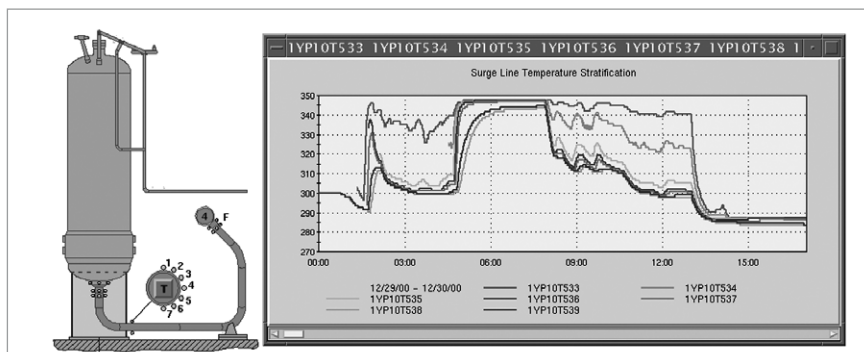


Figura 7. Transitorio Térmico de la Línea de Compensación del Presionador.

- Control de tensiones y fatiga en transitorios: control de tensiones y fatiga producidas por temperatura mediante galgas de deformación y temperatura colocadas en tuberías con transitorios grandes y áreas sometidas a grandes tensiones. La figura 7 ilustra los transitorios térmicos detectados en la línea de compensación del presionador.

- Control del desplazamiento en los equipos: desplazamiento de equipos y tuberías producidos por cargas térmicas controladas mediante una disposición de cordones de desplazamiento.

- Control de válvulas motorizadas y operadas por aire: control de su funcionamiento mediante un sistema de toma de datos manual y cargándolo en ALLY.

- Integración del sistema de IyC: datos de proceso (temperatura, presión, caudal, etc) leídos desde los sistemas de control WDPF de Westinghouse.

Los esquemas de control y las técnicas de proceso de todos estos sistemas son dignos de ser analizados, pero nuestra intención en este artículo, es solamente enumerar los tipos de datos integrados en el sistema ALLY. En esta central alrededor de 5000 variables de proceso de IyC y 400 sensores dedicados al control y diagnóstico constituyeron los datos de entrada ALLY. Además, la mayoría de los sensores de Control y Diagnóstico (CyD) produjeron un gran número de variables de control, aumentando enormemente el conjunto de datos. Por ejemplo, un único sensor de vibración produjo variables tales como armónicos de vibración (desde el pico del primer armónico hasta el quinto armónico y amplitudes de vibración RMS (Root Mean Square)), espectro FFT (Fast Fourier Transform), fase, coherencia, órbita y otros datos. En resumen, ALLY tenía acceso a cerca de 10.000 parámetros, a tener en cuenta para evaluar el estado de los equipos.



Figura 8. Cabina de Control y Diagnósis y Estación de Trabajo ALLY.

En la central rusa, la aplicación consistió en dos sistemas de control y diagnóstico: control de humedad (fugas) y control de fugas de hidrógeno. El sistema de detección y control de fugas detectó un cambio en la humedad y correlacionó el cambio dando la situación de la fuga y el grado de su caudal. El sistema de control de fugas de hidrógeno empleó una disposición de sensores de hidrógeno. La figura 8 muestra una cabina típica de Control y Diagnósis (CyD) y una estación de trabajo ALLY.

En la central Nuclear china. La aplicación consistió en un sistema de detección de partes sueltas, similar al de la aplicación en la Central de la República Checa.

DESARROLLOS FUTUROS

Los desarrollos futuros en ALLY, consistirán, en la integración de sistemas adicionales, razonamiento automatizado del diagnóstico, y mejoras en la plataforma. Como la arquitectura del sistema se basa en una red de sistemas que alimentan de información a una base de datos común (la "Blackboard"), los sistemas adicionales darían valor añadido a la base de conocimiento de los equipos. Las herramientas adicionales de razonamiento, también podrían mejorar las capacidades de diagnóstico automático. Los sistemas expertos basados en reglas son actualmente una parte integral del sistema ALLY, y otras herramientas de razonamiento, tales como la lógica difu-

sa y las redes neuronales están disponibles y podrían ser incorporadas fácilmente dentro del ALLY.

Actualmente el sistema está basado en un sistema operativo SUN/ Solaris. Cuantas más aplicaciones IYC se muevan hacia un entorno Microsoft, la migración a esta plataforma o incluso a un entorno de plataforma independiente podría ser interesante.

RESUMEN

Un programa estratégico eficaz de mantenimiento debe combinar muchos elementos de una forma estructurada.

- Los indicadores del estado de los equipos deben ser controlados con regularidad.
- Las herramientas de análisis deben estar instaladas para diagnosticar las condiciones potenciales y para investigar las causas raíces. Las herramientas automatizadas están instaladas para ayudar a organizarse y para llamar la atención del usuario, no obstante, la evaluación de los ingenieros, sobre el estado de los equipos es necesaria, en caso de que deban aplicarse las lecciones aprendidas y realizar cambios operacionales con el fin de mitigar la condición
- La decisión de si continuar con la operación, reparar o reemplazar, debe ser hecha teniendo un conocimiento claro de la importancia del equipo para la seguridad, su fiabilidad e impacto económico. Incluso, una decisión de continuar con la operación puede requerir un programa de control más riguroso.
- Los históricos de mantenimiento y lecciones aprendidas sobre equipos similares deben ser analizadas como guía.
- Las herramientas de programación para el mantenimiento deben ser utilizadas para iniciar el trabajo, programar los recursos, identificar las herramientas y partes necesarias y para documentar los resultados.
- La preparación del equipo para un mantenimiento seguro se debe hacer según un procedimiento escrito, especialmente cuando el mantenimiento pueda realizarse durante operación.
- La documentación del programa de mantenimiento realizado y de su eficacia aseguran el éxito continuado.

La base de datos que nos da el estado de los equipos, es fundamental para controlar con eficacia los datos sobre el funcionamiento de los mismos durante su vida en servicio. Se intenta que sea la depositaria de la información,

desde donde los ingenieros de la central y el personal de mantenimiento puedan controlar el estado de los equipos, entender el comportamiento dinámico de los mecanismos de degradación, y justificar una acción de continuar con la operación o de mantenimiento basada en este conocimiento.

REFERENCIAS

1. T.A. Kozlosky, D.A. Barman, "Integrating Equipment Condition Monitoring and Diagnostic Systems with Advanced Plant Information systems", 1995 IEEE Nuclear Science Symposium.
2. S.S. Palusamy, O. Matal, J. Brom, "ALLYTM Equipment Condition Diagnostics and their Contribution to Safety and Symposium on Safety and Reliability systems of PWRs and BWRs, Brno, Czech Republic, May, 1995.
3. T.A. Kozlosky, S. Lowenfeld, D.A. Bouman, R. Baltus, "Advanced Plant Information systems Using Intelligent Monitoring and Diagnostics and the ALLYTM Plant Monitoring and diagnostics System", SMiRT Conference on Knowledge Based System Applications in Power Plant and Structural Engineering Post Conference Seminar, 1993, Konstanz, Germany.
4. V. Jagannathan et al, "Blackboard Architecture and Applications", Academic Press, 1989.
5. US NRC RTG 1.1160 Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants".



Tom KOZLOSKY natural de Pittsburgh, PA EEUU, es Licenciado y Master en Ingeniería Mecánica por la Universidad de Pittsburgh. Comenzó a trabajar en Westinghouse en 1982, ha diseñado y probado bombas para uso nuclear, diseñado y programado herramientas robóticas, realizado análisis de tensiones y de rotura, y ha desarrollado aplicaciones para sistemas expertos e interfaces gráficas para la evaluación automática del estado de equipos. Ha sido jefe de proyecto y líder técnico para el seguimiento y diagnóstico de equipos. Tom trabaja actualmente en el departamento de marketing de Instrumentación y Control Digital de Westinghouse.