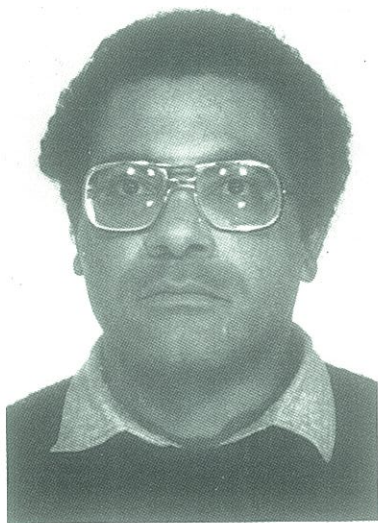


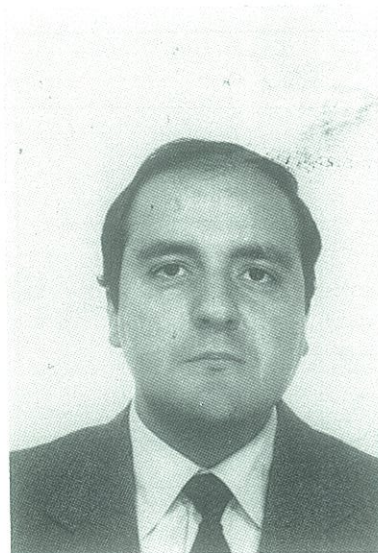
TRANSITORIOS TERMOHIDRAULICOS EN SISTEMAS DE TUBERIAS

TERMOHIDRAULICA

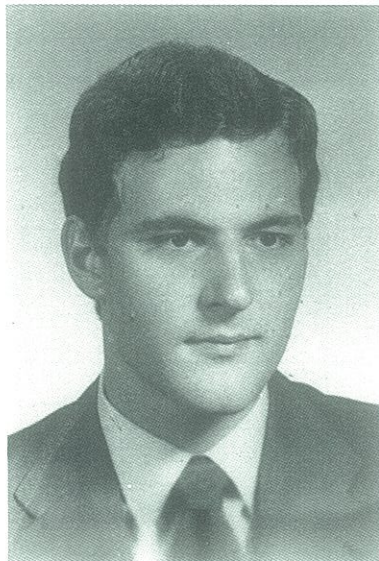
Angel BARRASA IBAÑEZ, Blas de la ROSA MARTINEZ
y Ramón PEREZ VARA



Blas de la ROSA MARTINEZ es Ingeniero Aeronáutico por la ETSIA de Madrid. Sección de Análisis Mecánicos del Departamento de Mecánica Aplicada de Empresarios Agrupados. Responsable de la ingeniería y medidas de transitorios y vibraciones para C.N. Trillo. Ha asistido a cursos de su especialidad en el Georgia Technological Institute y en diferentes centros docentes españoles.



Angel BARRASA IBAÑEZ es Ingeniero Industrial, especialidad mecánica, por la Universidad Pontificia de Comillas. Jefe de la Sección de Análisis Mecánicos del Departamento de Mecánica Aplicada de Empresarios Agrupados. Miembro de la Sociedad Nuclear Española. Ha trabajado en análisis de tuberías con Gibbs and Hill Inc. N.Y. y ha asistido a diferentes cursos de su especialidad en el Georgia Technological Institute, MIT y en diferentes centros españoles.



Ramón PEREZ VARA es Ingeniero Aeronáutico por la ETSIA de Madrid. Sección de Análisis Mecánicos del Departamento de Mecánica Aplicada de Empresarios Agrupados. Ha participado en la evaluación de nuevas cargas para C.N. Garoña, C.N. Co-frentes y C.N. Valdecaballeros y ha asistido en el exterior a diferentes cursos de su especialidad (programas RETRAN, RELAP5 y MMS, especialmente) y en diferentes centros docentes españoles.

INTRODUCCION

El comportamiento de los sistemas de tuberías en condiciones transitorias tiene un gran interés por su impacto en el diseño y el análisis del sistema y de sus soportes. La NRC también se ha ocupado de estos asuntos por las implicaciones que pueden tener en la seguridad de la planta. Resultado de esta atención han sido las referencias (1) a (6), citadas al final, en las que se contienen requisitos detallados para sistemas pertenecientes a centrales tipo PWR o BWR.

Frente a estas situaciones es posible actuar mediante dos tipos de medidas: unas tomadas en el proyecto y otras durante la operación de la central. Dichas medidas, los problemas que implican y los métodos de análisis utilizados son el objeto de este artículo.

CAUSAS Y MEDIDAS DE PREVENCIÓN DE TRANSITORIOS HIDRAULICOS

En este apartado se describen los sistemas de seguridad en los que son de esperar transitorios hidráulicos cuyas consecuencias hay que estudiar, sus causas y las medidas que, en opinión de los autores, cabe tomar para paliar sus efectos.

Para realizar los análisis de dichos transitorios ha sido preciso poner a punto, o desarrollar, un conjunto de programas de ordenador, que se describen más adelante, gracias a los cuales es posible obtener los siguientes resultados:

- Determinación de ciertas características de los elementos de protección del sistema, tales como:
 - Válvulas rompedoras de vacío y desaireadoras.
 - Tiempos de cierre y apertura de válvulas.
 - Amortiguación de válvulas «check».
 - Trinquetes de bombas.
 - Calderines.
 - Chimeneas de equilibrio.
 - Amortiguadores de pulsadores de presión.
- Determinación de cargas hidrodinámicas inducidas sobre las tuberías, necesarias para su análisis y soportado.
- Recomendaciones o modificaciones en los procedimientos de operación del sistema o de algún parámetro del control.

PROGRAMAS DE CALCULO UTILIZADOS

Son muchos los programas de ordenador que ha sido preciso utilizar para resolver estos transitorios. Algunos están disponibles en el mercado, mientras que otros han tenido que ser desarrollados específicamente. Entre los diversos programas desarrollados por Empresarios Agrupados, se hará referencia a los cuatro más interesantes.

THICOM (Ref. 7)

Se trata de un programa desarrollado para el cálculo del golpe de ariete en sistemas que conducen fluidos incompresibles. También se puede aplicar a la simulación del funcionamiento de dichos sistemas junto con sus elementos de control, lo que permite ajustar o diseñar dichos controles.

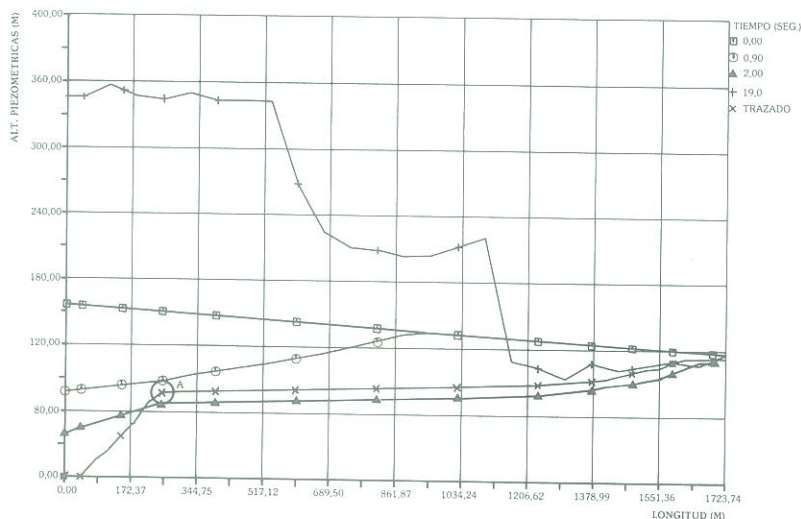
Los modelos admisibles por THICOM son muy flexibles y en su estado actual, se admite cualquier red de tuberías formada por tramos de sección constante cuyos extremos están sujetos a alguna de las siguientes condiciones de contorno:

- Depósitos de altura piezométrica regulada por el bloque de operaciones de control.
- Válvulas de salida de área regulable.
- Curvas de llenado que introducen o extraen un caudal regulado.
- Colectores en los que concurren varias ramas con o sin rompedores de vacío y purgadores de aire.
- Válvulas interiores entre dos ramas con pérdida de carga y área regulable.
- Bombas con velocidad variable definidas por sus curvas características.
- Turbinas hidráulicas reversibles o no.
- Chimeneas de equilibrio de área constante y eje inclinado.
- Calderines presurizados con gas.

El carácter modular del programa facilita la incorporación de nuevos elementos.

La modelización del THICOM hace posible definir un bloque de operaciones de control, que permite operar entre sí las variables que se obtienen durante el cálculo y controlar mediante ellas las condiciones de contorno regulables, si bien es posible utilizar estos bloques de control más ampliamente definiendo sistemas realimentados de control, modelizando actuadores hidráulicos de pistón o válvulas antirretorno o calculando el margen de presión por encima del umbral de cavitación en la succión de bombas durante situaciones transitorias.

El proceso se inicia mediante el cálculo, por el método de Newton-Raphson de la situación estacionaria que precede al transitorio. El régimen variable se calcula por el método de las características, a partir de las ecuaciones en derivadas parciales de continuidad y cantidad de movimiento que, transformadas en ecuaciones



F I Espectros de alturas piezométricas. Sistema sin elementos de alivio.

diferenciales ordinarias que se cumplen a lo largo de líneas características, se resuelven por diferencias finitas.

TRANVA (Ref. 8)

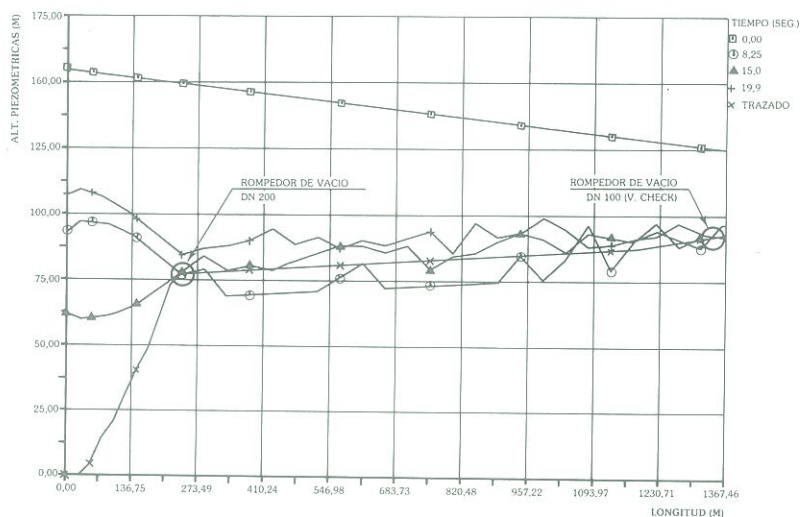
Se trata de un programa desarrollado para el cálculo del golpe de ariete en sistemas por los que circula un gas o vapor saturado o sobrecalentado.

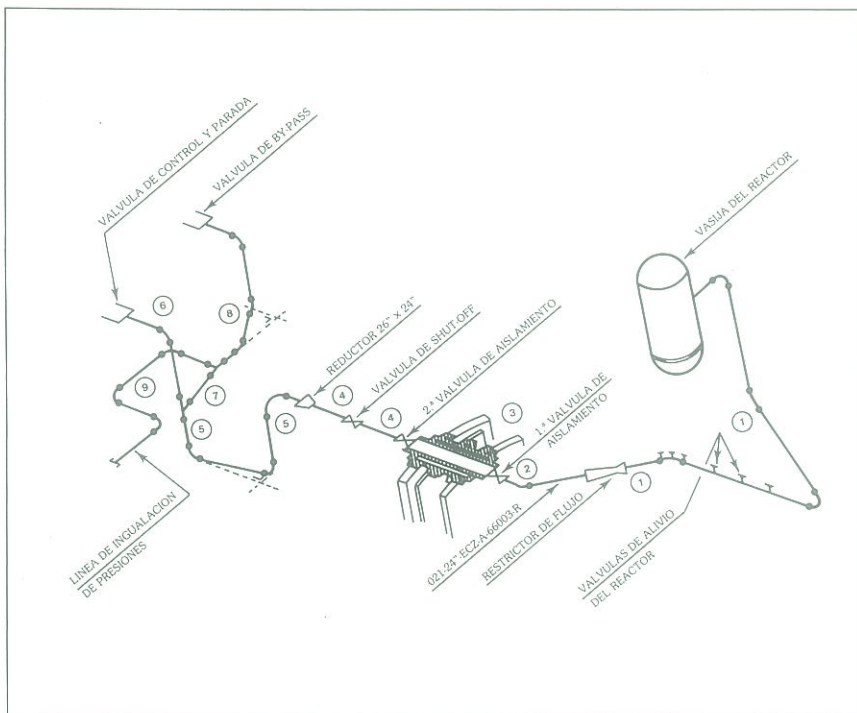
La modelización requerida por el programa es similar a la del THICOM incluyendo la consideración de flujo sónico o subsónico.

Es interesante la posibilidad de añadir o extraer calor, lo que permite, entre otras cosas, modelizar líneas muy largas o recalentadores de vapor.

El fluido se considera un gas perfecto, lo que es admisible si se elige adecuada-

F II Espectros de alturas piezométricas. Sistema con elementos de alivio.





F III Vapor principal. Modelo de cálculo. Distribución por ramas.

mente la relación de calores específicos (Ref. 13). El método de cálculo es, nuevamente, el de las características aplicado al caso de gas perfecto (Ref. 11 y 12) basado en las ecuaciones de continuidad, conservación de la energía y de la cantidad de movimiento, transformación a ecuaciones diferenciales ordinarias a lo

largo de líneas características y resolución por diferencias finitas.

BALDAG (Ref. 9)

BALDAG es un programa desarrollado para resolver un problema concreto que

se presenta en los reactores BWR cuando actúan las válvulas de alivio y seguridad. Dichas válvulas se abren cuando se supera su presión de tarado permitiendo al vapor penetrar en la línea y produciendo los siguientes efectos:

- El aire contenido en la línea se comprime.
- La sobrepresión del aire impulsa el agua de la parte inferior de la línea (bala de agua) hasta expulsarla totalmente.
- Tras el aire, avanza el vapor, procedente de la vasija, que acaba por expulsar el aire.
- Tras un corto intervalo se alcanza un estado estacionario con expulsión de vapor.

La línea se modeliza mediante un conjunto de ramas de sección constante. En las ramas inferiores es donde se supone una bala de agua, de cierta longitud, que puede ocupar varias ramas.

El programa supone que el aire es un gas perfecto, que el flujo es unidimensional y que el agua es incompresible.

La solución se calcula por el método de las características para la zona de aire-vapor y para la bala de agua como columna rígida. Las fuerzas en los tramos rectos de la tubería se calculan por el método de la fuerza de onda (Ref. 14).

WAWES (Ref. 10)

Este programa resuelve pequeñas oscilaciones por golpe de ariete en sistemas fluidos. La suposición de pequeñez permite linealizar los sistemas de ecuaciones del movimiento de los fluidos y la aplicación del análisis modal. Este planteamiento permite la determinación de efectos de resonancia y diseñar apropiadamente los sistemas de control.

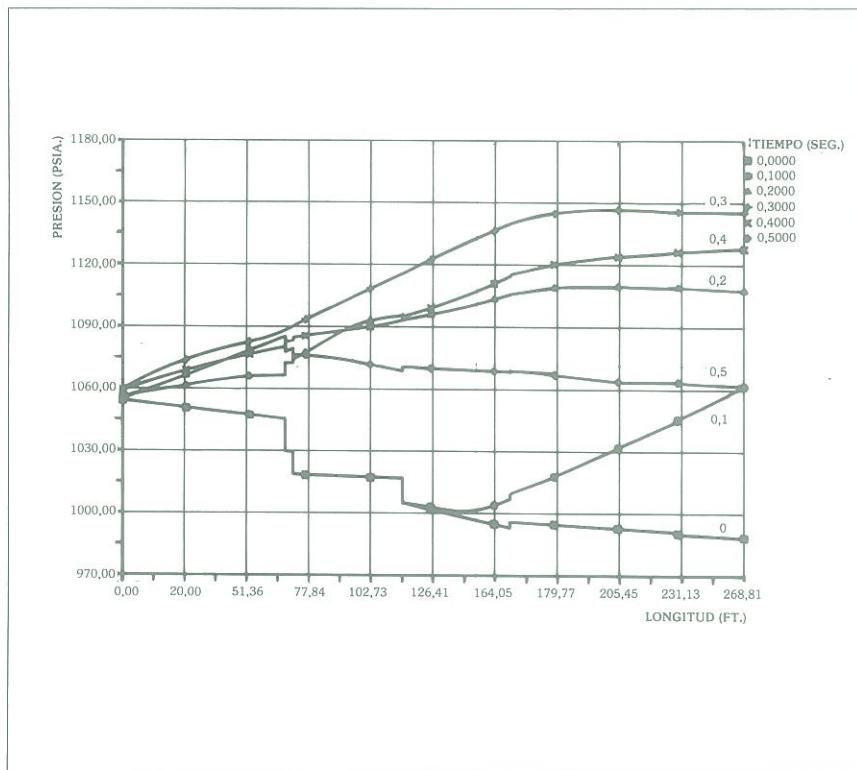
El modelo admisible por el WAWES es el mismo que el del THICOM, salvo que no se permiten bloques de operaciones de control.

Son métodos clásicos para la resolución de pequeñas oscilaciones hidrodinámicas el de las impedancias (Ref. 11 y 15) y el de las matrices de transferencia (Ref. 11 y 12), pero tienen el inconveniente de que admiten lazos de primer orden, pero no de segundo. (Se llaman lazos de primer orden a aquellos que quedan completamente anidados uno en otro, mientras que en los de segundo orden se produce un solape parcial.) WAWES plantea las ecuaciones del sistema (Ref. 16) y aplica la transformación de Laplace llegando a un sistema de tipo:

$$[M(s)] \{X(s)\} = \{F(s)\}$$

Para el cálculo de oscilaciones periódicas forzadas, basta sustituir «s» por «iω». Para la determinación de los autovalores de M(s) se aplica el método de Newton-Raphson en variable compleja.

F IV Cierre válvula de parada turbina de alta presión. Espectros de presión. Líneas de vapor principal (0-0,5 seg.).



APLICACIONES REALIZADAS

Las aplicaciones descritas a continuación han sido realizadas tanto con alguno de los programas descritos antes como con otros disponibles en el mercado informático.

SISTEMAS DE BOMBEO

En estos sistemas se pueden producir golpes de ariete por dos causas: Por cierre retrasado de la válvula de retención o por formación de bolsas o burbujas de vapor que se colapsan. Contribuyen a favorecer este segundo tipo de golpe de ariete la baja inercia de las unidades de bombeo, la existencia de grandes desniveles en el trazado de la tubería (del orden de ocho metros), la elevada inercia de la columna líquida, la mala situación de las válvulas de control y los tiempos inadecuados de actuación de las válvulas.

En las Figs. I y II se muestran las líneas piezométricas en diferentes instantes del transitorio de disparo de bombas, para un sistema de agua de captación con y sin elementos de alivio de sobrepresión.

SISTEMAS DE VAPOR

En estos sistemas sólo se presentan golpes de ariete por actuación rápida de válvulas. La Fig. III representa el sistema de vapor principal de una central BWR. El cierre de la válvula de parada se realiza en 0,15 segundos. La Fig. IV muestra la variación de la línea de presión a lo largo de la tubería en diferentes instantes del transitorio. En la Fig. V se da la evolución de la presión agua arriba de la válvula de parada, y en la Fig. VI el histograma de fuerza en un tramo típico de la tubería.

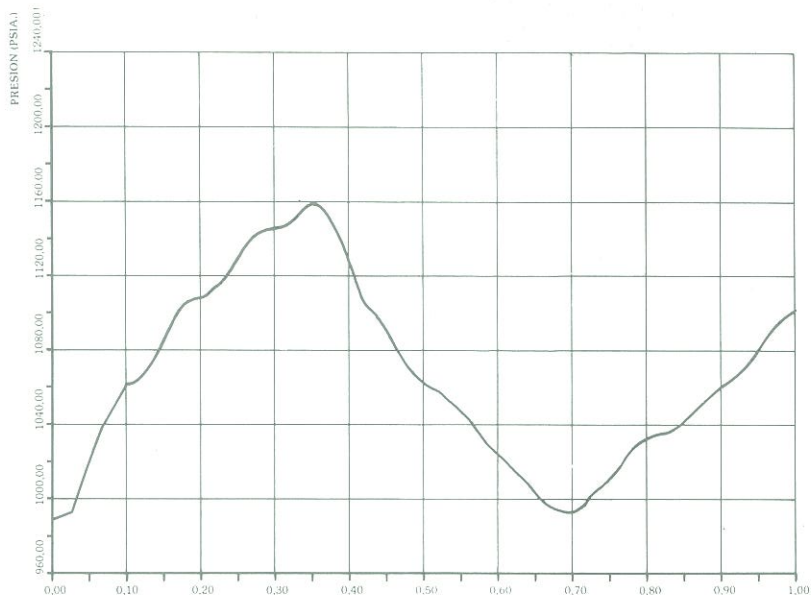
SISTEMAS LIGERAMENTE SUBENFRIADOS

Los transitorios que habitualmente se analizan en estos sistemas, y que durante su ocurrencia pueden originar un régimen bifásico en el agua, se refieren a la transmisión de la onda de presión producida por una rotura postulada de la tubería. Se pueden analizar con el programa RELAP 5, aunque no se incluye aquí ningún resultado típico.

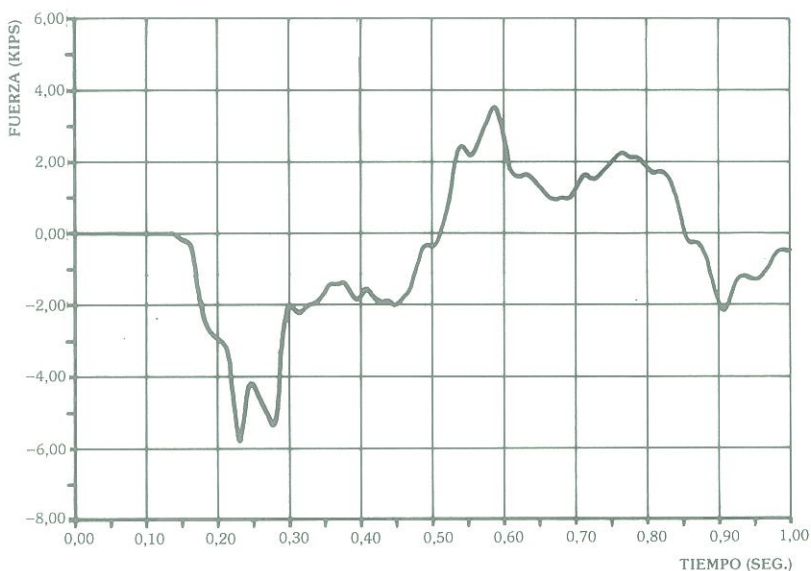
SISTEMAS CON ANALISIS ESPECIALES

Los casos que requieren análisis termo-hidráulicos especiales son:

- La descarga de las válvulas de alivio y seguridad del presionador, en especial los casos con sello de agua.
- Las oscilaciones de presión y caudal en sistemas hidráulicos de control de

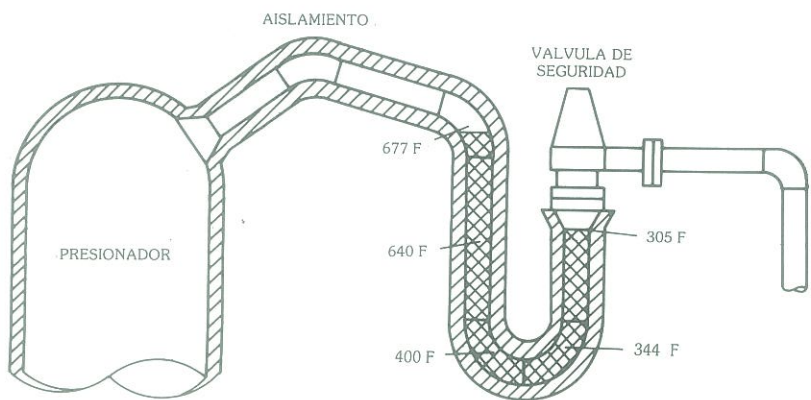


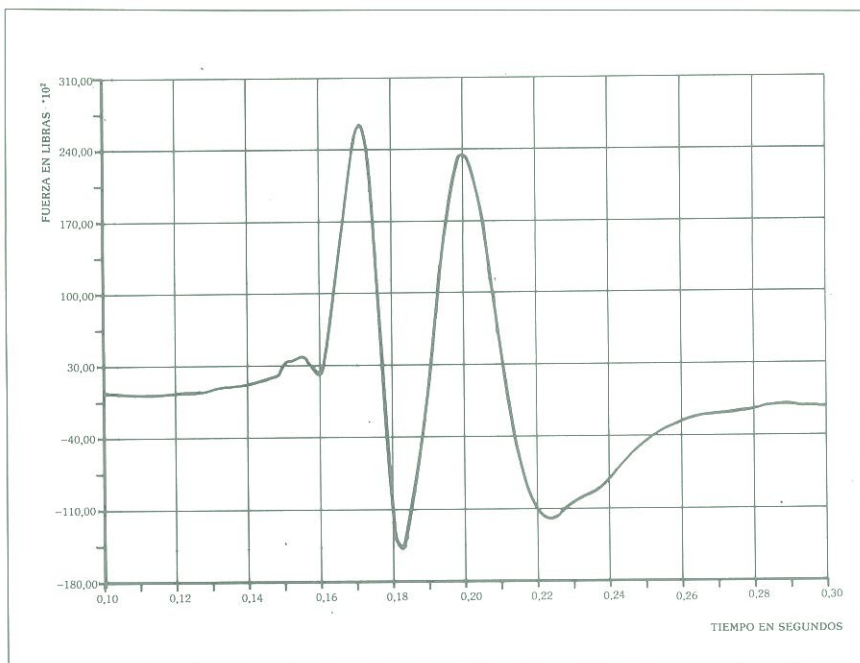
F V Cierre válvula de parada turbina alta presión. Presión aguas arriba de la válvula de parada.



F VI Cierre válvula parada turbina alta con actuación by-pass. Fuerza en rama 1. Tramo 3.

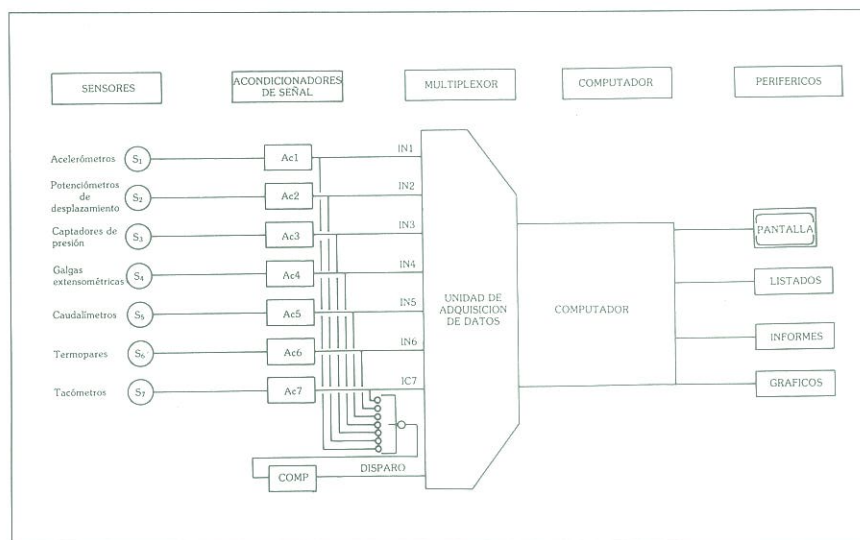
F VII Disposición de las válvulas de seguridad con indicación del aislamiento y distribución de temperaturas resultante en el sello líquido.



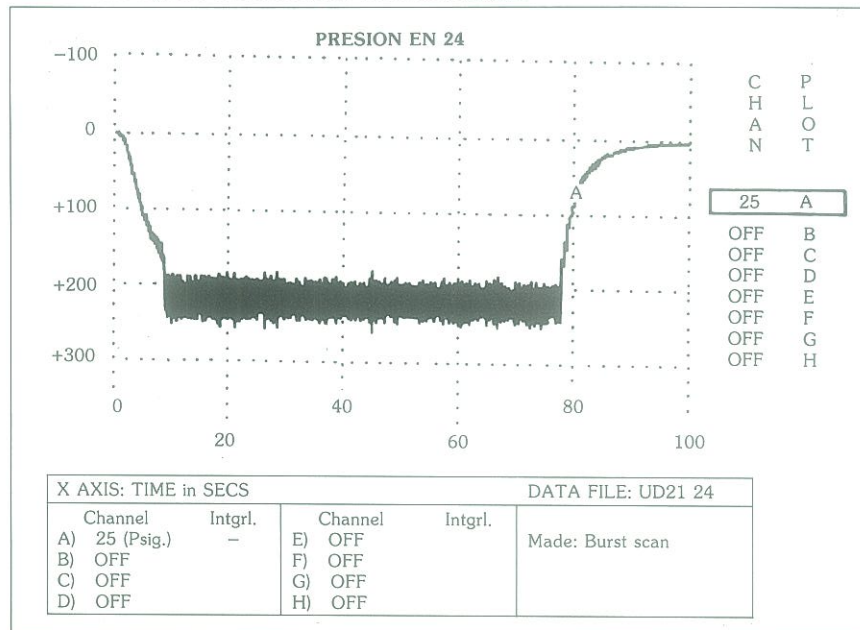


F VIII Descarga válvulas seguridad mod. 1/2 pie (relap 5). Fuerza en el tramo número 11.

F IX Sistema de análisis y adquisición de datos para pruebas dinámicas.



F X Presión en la descarga de la bomba. Las presiones positivas son hacia abajo del cero y están en psig. Hacia los ocho segundos se produce el paso de estrella a triángulo.



alta presión con bombas de desplazamiento positivo.

Las Figs. VII y VIII se refieren al sistema de control de presión del circuito primario analizado mediante el programa RELAP 5. La actuación de las válvulas de seguridad produce fuerzas hidráulicas considerables pese a la consideración de descarga con sello de agua caliente.

MEDIDAS DURANTE LA PUESTA EN MARCHA Y OPERACION. REALIMENTACION PARA LOS ANALISIS Y AYUDA EN EL DIAGNOSTICO DE DEFICIENCIAS OPERACIONALES

Tras haber descrito los métodos analíticos y algunas de sus aplicaciones, vale la pena dedicar alguna atención a las medidas en planta destinadas a:

- Validar los modelos y resultados del cálculo.
- Detectar causas de mal funcionamiento, evaluarlas y proponer acciones correctoras.

La Fig. IX muestra el esquema de un equipo de adquisición de datos para pruebas dinámicas. El sistema está preparado para trabajar con diversos tipos de sensores (acelerómetros, potenciómetros, piezómetros, galgas extensométricas, termopares y tacómetro). Tiene una capacidad de medida de 92 acondicionadores con variables dinámicas, ampliable hasta 192 canales. Todos los canales tienen la misma jerarquía y cada uno de ellos es capaz de adquirir desde unas pocas lecturas diarias hasta 25.000 lecturas por segundo. El conversor del multiprogramador tiene una velocidad de adquisición de datos de 33.000 lecturas por segundo, que se reparten entre los canales activados.

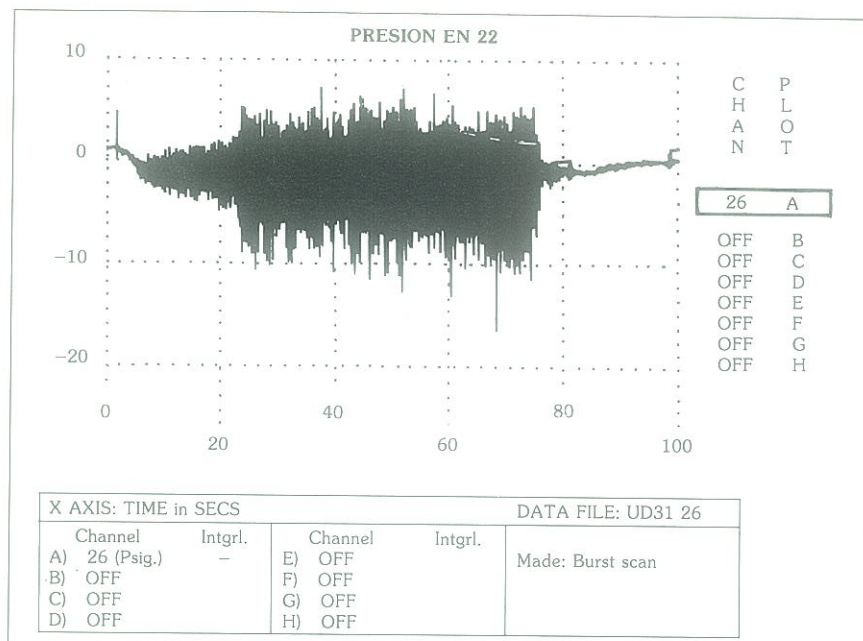
El computador es un microordenador con 1 Mbyte de memoria interna, ampliable a 3 Mbytes, con pantalla monocromática de 12", teclado, impresora gráfica y disquetes de 5 1/4.

El «software» lo suministra el fabricante del ordenador e incluye rutinas de test para instrumentos de manipulación de información, de almacenamiento y gestión de datos y de cálculo y análisis de vibraciones.

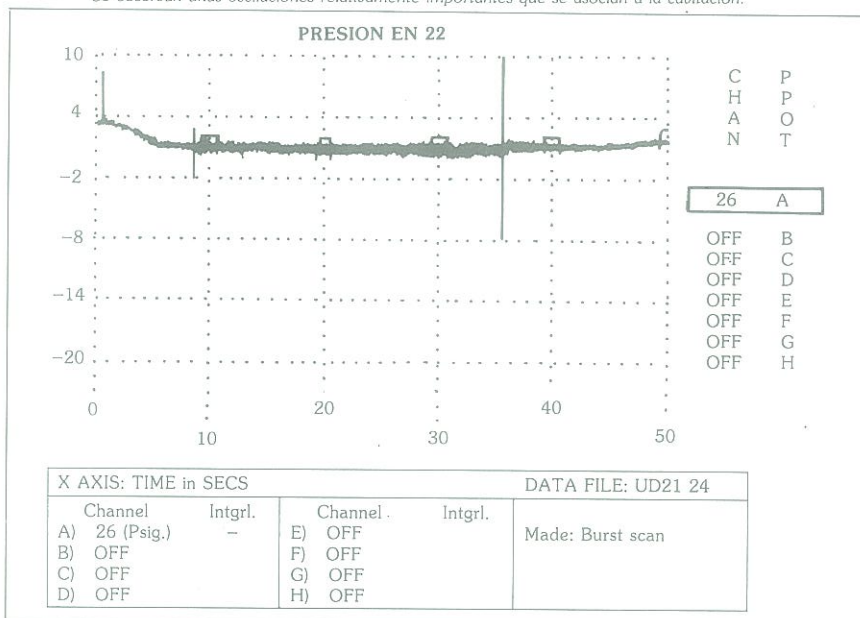
Ha habido que desarrollar «software» adicional, accesible por «menús», que desarrolla las siguientes operaciones:

- Estado del sistema en un momento dado.
- Calibración.
- Chequeo de ceros.
- Grabación de la prueba.
- Cargar datos de la prueba.
- Análisis y cálculos de la prueba.
- Presentación de datos y resultados.
- Final.

Cada una de estas opciones del menú

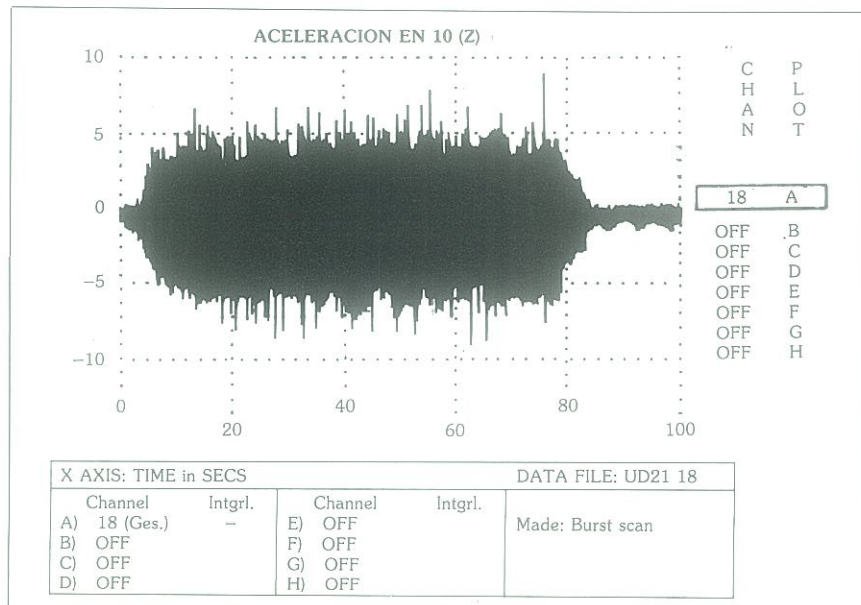


F XI Presión en la línea con un solo orificio aguas abajo del mismo. Las presiones positivas son hacia abajo. Se observan unas oscilaciones relativamente importantes que se asocian a la cavitación.



F XII Presión en la línea con dos orificios aguas abajo del segundo. Las presiones positivas son hacia abajo. Las oscilaciones asociadas a la cavitación han desaparecido.

F XIII Aceleración en un punto próximo a donde se colocaría un segundo orificio antes de instalarse el mismo.



principal se subdivide en otras opciones mediante paneles secundarios.

Los modos de trabajo más interesantes del sistema son:

- Captura de transitorios: el sistema toma datos a alta velocidad en espera de que se produzca el pulso de referencia, almacenando los datos un tiempo antes y después del disparo.
- Vibraciones y señales dinámicas estacionarias.
- Otros modos de funcionamiento en tiempo real, registrando en papel continuo hasta ocho señales simultáneamente.

Las Fig. X a XIII muestran algunos resultados de medidas realizadas para una línea de flujo mínimo de una bomba con un orificio cavitante y con dos orificios que distribuyen la pérdida de carga y eliminan la cavitación.

REFERENCIAS

- NUREG 0582, *Waterhammer in Nuclear Power Plants*. July 1979.
- NUREG/CR 2059, *Compilation of Data Concerning Known and Suspected Waterhammer Events in Nuclear Power Plants*. May 1982.
- NUREG/CR 2781, *Evaluation of Waterhammer Events in Light Water Reactor Plants*. July 1982.
- NUREG 0927, *Evaluation of Waterhammer Experience in Nuclear Power Plants. Technical Findings Relevant to unresolved Safety Issue A-1*, December 1982.
- NUREG 0927, *Evaluation of Waterhammer occurrence in Nuclear Power Plants*, revision 1.
- NUREG 0800, capítulo 5.
- THICOM: *Transitorios Hidráulicos en Líquidos en Condiciones de Contorno Múltiples*. Empresarios Agrupados.
- TRANVA: *Transitorios Hidráulicos en Sistema de Vapor*. Empresarios Agrupados.
- BALDAG: *Transitorios en Líneas de Descarga de Válvulas de Alivio y Seguridad*. Empresarios Agrupados.
- WAWES: *Análisis Linealizado de Transitorios Hidráulicos en Líquidos con Condiciones de Contorno Múltiples*. Empresarios Agrupados.
- E. Benjamin Wylie and Victor L. Streeter. *Fluid Transients*.
- M. Hanif Chaudry. *Applied Hydraulic Transients*. Van Nostrand Reinhold Company.
- A. J. Wheeler and F. J. Moody. *A Method for Computing Transient Pressures and forces in Safety Relief Valve Discharge Lines*. SAFETY RELIEF VALVES, Ed. Haupt, R. W. & Meyer, R. A., ASME 1979.
- R. T. Lahey Jr. and F. J. Moody. *The Thermal-Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor*. American Nuclear Society.
- J. A. Fox. *Hydraulic Analysis of Unsteady Flow in Pipe Networks*. The MacMillan Press Ltd.
- W. Zielke and H. P. Hack. *Resonance Frequencies and Associated Mode Shapes of Pressurized Piping Systems*. Proceedings of the First International Conference on Pressure Surges, England.
- R. J. Wagner et al., *RELAP5/MOD1 Code Manual*, NUREG/CR-1826 EGG-2070, INEL, U. S. Nuclear Regulatory Commission (1980).