APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN EN LA EVALUACIÓN DEL GASTO EN FATIGA

Dalinda Pando (1), José Alberto Álvarez (1), Iñaki Gorrochategui (2)

(1) Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y los Materiales, Universidad de Cantabria, Santander.
(2) NUCLENOR S.A., Santander.

Resumen. La fatiga es un factor limitante en la vida de los componentes estructurales. Los cálculos de diseño de éstos se realizan conforme a métodos conservadores que acotan su vida útil. Frente a éstos existen los sistemas de monitorización de fatiga, los cuales permiten el seguimiento de las condiciones a las que están sometidos los componentes. En este artículo se trata la aplicación de uno de estos sistemas a la evaluación del gasto por fatiga del safe end de la tobera del sistema de Agua de Alimentación de la Central Nuclear de Santa María de Garoña. El registro de los transitorios reales permite su comparación con los contenidos en sus bases de diseño y su proyección de ocurrencia hasta el final de su vida útil. El sistema de monitorización de fatiga proporciona valores de gasto por fatiga inferiores a los de diseño principalmente por dos causas: generalmente los transitorios reales son menos severos, y el número de ocurrencias es menor que la estimación de las bases de diseño.

Abstract. Fatigue is a limiting factor in structural components life. Design calculations are performed according to conservative methodologies that do shorten components' life. Fatigue Monitoring Systems are an alternate that registers the component service conditions. This work studies the application of one of those systems to determine the fatigue usage of the safe end of the Feedwater System nozzle of the Santa María de Garoña Nuclear Power Plant. The transients recorded are compared to the ones evaluated in the design specifications and the fatigue usage is compared with the one provided in the stress report. The main conclusion is that the fatigue monitoring system calculates a fatigue usage that is significantly lower than the design one, this is due to two main reasons: actual transients are less severe than design ones, and the number of occurrences of actual transients is lower than the specified.

1. INTRODUCCIÓN.

La fatiga es un factor limitante en la vida de los componentes estructurales. Los cálculos de diseño de éstos se realizan conforme a métodos conservadores que acotan su vida útil. Un sistema de monitorización de fatiga (FMS) es una herramienta que permite el seguimiento continuo de las condiciones de los componentes y el cálculo del gasto por fatiga.

Este artículo trata sobre la aplicación de uno de estos sistemas de monitorización de fatiga a la Central Nuclear de Santa María de Garoña (SMG). Uno de los componentes más críticos de SMG es la vasija del reactor. Diferentes sistemas conectados a la vasija a través de toberas, con distinta geometría y configuración en diferentes posiciones, garantizan el funcionamiento normal y la seguridad de la planta. Estas conexiones crean discontinuidades geométricas que están sometidas a grandes exigencias térmicas en servicio y por lo tanto son las localizaciones de la vasija en las cuales las tensiones son mayores y desde la perspectiva de la fatiga resultan las más críticas.

Entre los sistemas conectados a la vasija, el sistema de Agua de Alimentación (AA), con dos lazos y dos toberas por lazo, es el que posee un mayor gasto por fatiga calculado. Este hecho se confirma a través de los cálculos contenidos en el Informe Original de Tensiones [1]. La tobera de AA (N4) posee el mayor gasto por fatiga calculado, y por lo tanto el seguimiento de esta localización constituye una envolvente de la estimación del gasto por fatiga de la vasija del reactor y el punto más adecuado como objeto de la aplicación del FMS.

2. CÁLCULOS DE FATIGA DE DISEÑO.

Los cálculos de diseño originales de la vasija [1] así como los cálculos adicionales llevados a cabo por General Electric (GE), con motivo de la instalación de un FMS [2], de la tobera N4 demuestran que la localización crítica de la tobera, desde el punto de vista de fatiga, se encuentra en la región del safe end. El safe end de la tobera fue reemplazado en 1994, y se realizó un nuevo informe de tensiones [3]. Este informe, al igual que los anteriores, determinó que la localización crítica de la tobera se encuentra en la región del safe end. El estudio de fatiga se realiza tanto para la

configuración actual del safe end, como para la configuración original ya que constituye un envolvente del gasto sufrido por la tobera desde el comienzo de funcionamiento hasta el momento actual.

El gasto por fatiga a 40 años para el safe end instalado en 1994 se calcula de acuerdo con las especificaciones de diseño (DS) de GE [4]. Los requisitos más importantes establecidos por estas especificaciones son:

- El safe end de la tobera N4 es un componente de Clase 1 de acuerdo con el Código ASME, Sección III [5] y por lo tanto se deben cumplir los requerimientos del código.
- Las DS establecen las condiciones de diseño de presión, temperatura y caudal a través de la tobera, además definen las cargas actuantes y las combinaciones de cargas que se deben considerar. Por otra parte definen los transitorios y establecen su número máximo para una vida de 40 años. En la Tabla 1 se muestran los transitorios establecidos por las bases de diseño así como su número máximo de ciclos para una vida de 40 años.
- Para cada transitorio, las DS establecen la evolución de cuatro variables en función del tiempo: la presión y temperatura del reactor, y el caudal y temperatura de Agua de Alimentación. Un ejemplo se muestra en la Fig. 1, donde se representa el transitorio #1 de la Tabla 1, arranque.
- El gasto por fatiga causado por las tensiones originadas por los transitorios de la Tabla 1 se calcula de acuerdo con lo dispuesto por el Código ASME.

El gasto por fatiga determinado en [3] en la localización crítica del safe end es 0.9369, valor menor del límite permitido en [5] de 1.0.

Tabla 1. Transitorios de Diseño.

Nº de Evento	Descripción	Nº de ciclos (40 años)
1	Arranque.	120
2	Sobrevelocidad de la turbina.	120
3	Reducción diaria al 75% de potencia.	10000
4	Reducción semanal al 50% de potencia.	2000
5	Prueba de las barras de control.	50000
6	Cambio de posición de las barras de control.	400
7	Pérdida de los calentadores de AA.	80
8	Inyección de refrigerante.	10
9	Interrupción del caudal de AA.	80
10	Scram.	200
11	Disparo de la turbina.	40
12	Sobrepresión 1250 psig.	1
13	Sobrepresión 1375 psig.	1
14	Reducción a potencia cero.	120
15	Inicio parada caliente.	120
16	Parada caliente.	2600
17	Parada e inundación de la vasija.	120
18	Descarga del caudal del sistema de enfriamiento en parada.	1
19	Prueba de presión de diseño.	130

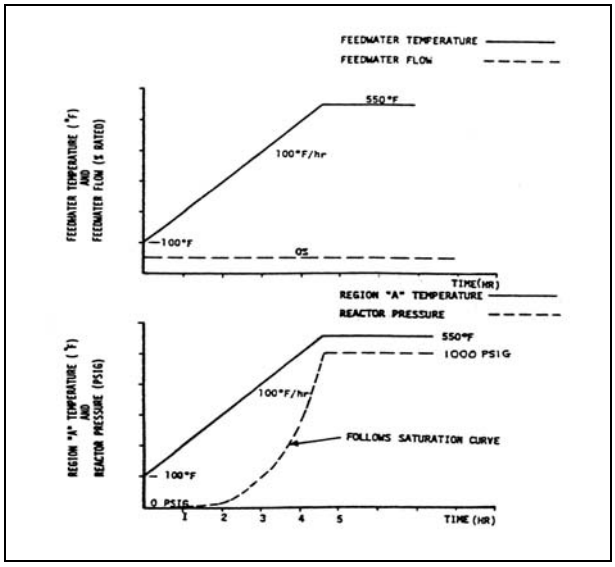


Fig. 1. Transitorio #1.

3. SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE FATIGA.

Un FMS es una aplicación informática que permite el registro continuo de las condiciones de un componente mediante la toma de datos en tiempo real y el cálculo continuo y actualizado del gasto en fatiga.

El sistema actualmente instalado en SMG, que opera desde 1999, es el software de EPRI FatiguePro Versión 2.0 (FPro) [6]. Este sistema adquiere los datos necesarios que determinan las condiciones locales a través de la instrumentación de la planta. Esta información se convierte en valores de tensión frente al tiempo mediante funciones de transferencia. Desde 1994 a 1999 estuvo instalado un sistema similar desarrollado por GE.

La Fig. 2 ilustra el proceso seguido por el programa para el cálculo de fatiga. FPro adquiere los datos de operación de planta, entre ellos presión y temperatura del reactor y caudal, temperatura y posición de las válvulas de todos los sistemas que afectan a la tobera N4. Estos datos se combinan para obtener las condiciones de caudal, presión y temperatura en la localización de interés [7].

La tensión térmica se calcula a través de una función de Green previamente calculada [8]. Las tensiones por presión, presión diferencial y mecánica se calculan a través de las funciones de transferencia previamente desarrolladas y definidas en [7]. Esta metodología permite el cálculo de la tensión total actuante en la localización de interés. La historia tensional es evaluada aplicando un método de contabilidad de ciclos, y a través de la aplicación de la curva S-N del código ASME [5], el programa calcula de forma acumulativa el gasto por fatiga.

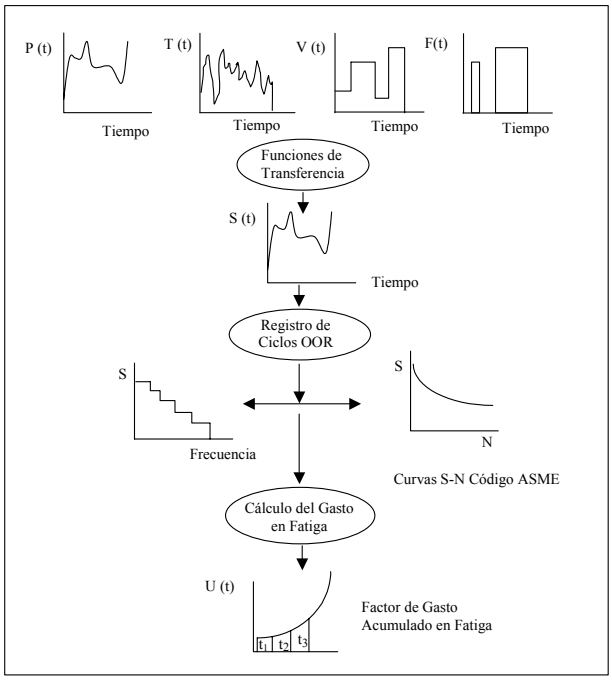


Fig. 2. Sistema de Monitorización de Fatiga.

4. MONITORIZACIÓN DE LOS TRANSITORIOS DE DISEÑO.

En esta sección se describen los cálculos llevados a cabo para demostrar el conservadurismo de la metodología empleada por FPro [9]. Para ello los transitorios de diseño incluidos en las DS se simularon con FPro y se obtuvo su gasto en fatiga asociado. El gasto en fatiga resultante se compara con el valor de diseño proporcionado por el informe de tensiones.

Para llevar a cabo este proceso se crearon hojas de cálculo que contuvieran las cuatro variables (presión y temperatura del reactor, y caudal y temperatura de agua de Alimentación) que definen los transitorios de diseño contenidos en la Tabla 1. Estas variables se definieron con la misma frecuencia de adquisición que la utilizada por el computador de planta. Al resto de los parámetros necesarios para definir las condiciones locales en la sección analizada se les asignaron los valores correspondientes a su valor nominal o al más apropiado para el transitorio considerado. Se creó un programa que simulara el proceso de adquisición de señales utilizado por FPro, con lo cual se crearon los ficheros de datos con el formato requerido por FPro. Por último se analizaron con FPro. La Fig. 3 muestra como ejemplo el transitorio de la Fig. 1 después de su análisis con FPro.

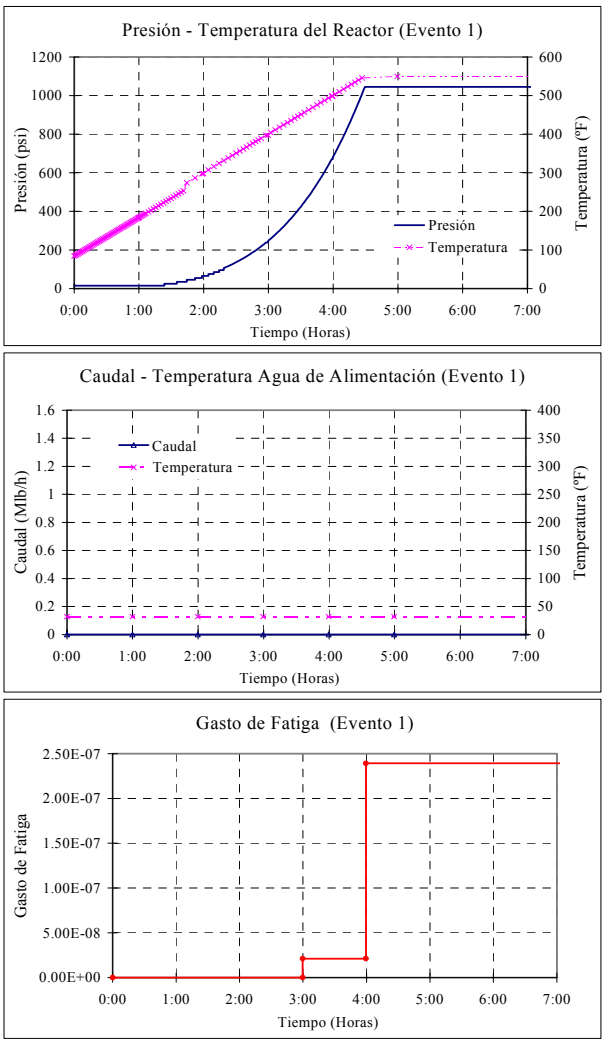


Fig. 3. Transitorio #1 analizado con FPro.

El valor del gasto por fatiga calculado por este método para 40 años de vida es de 2.09. El hecho de que este valor sea más de dos veces el valor del informe de tensiones, 0.9363, para la misma combinación de transitorios, demuestra el conservadurismo de los cálculos realizados por el FMS instalado en SMG.

Se ha de hacer notar que la secuencia de ocurrencia de los transitorios no tiene una influencia significativa en los resultados. El gasto en fatiga también se calculó sumando la contribución de cada de cada transitorio de diseño de forma independiente. Este método menos conservador da como resultado un gasto de fatiga, para 40 años, de 2.07, sólo ligeramente menor (1%) que el resultado obtenido utilizando la combinación de transitorios del informe de tensiones.

El conservadurismo de FPro tiene su origen en tres causas principales:

- FPro calcula los términos individuales de tensión (tensión térmica, mecánica...) de forma independiente y

posteriormente suma los valores de las mayores tensiones principales calculadas. Por lo tanto la orientación de la tensión aplicada no se considera. La suma algebraica de términos de tensión de diferentes direcciones y la evaluación de las tensiones aplicadas de forma independiente hace que los cálculos de FPro sean conservadores. Por otra parte el cálculo de la tensión térmica a través de funciones de Green es conservador comparado con el cálculo tensional a través de modelos de elementos finitos.

- Debido a las limitaciones de programación, el método de contabilidad de ciclos empleado por FPro asigna a todos los ciclos de tensión contenidos en rangos de tensión predefinidos el valor máximo del rango. Este agrupamiento de tensiones conduce a una evaluación conservadora de la tensión.
- Por último en la aplicación de FPro a SMG se introdujo un factor de seguridad en la curva de fatiga, debido a las condiciones del modelo de elementos finitos creado para deducir la función de Green. Este factor de seguridad conduce a cálculos del factor de gasto en fatiga conservadores.

5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE FATIGA.

En esta sección se resumen los resultados del análisis de datos realizado con el FMS FPro en el periodo comprendido entre el 27 de Mayo de 1994 y el 28 de Febrero de 2002 (7.75 años).

En este periodo de 7.75 años se registraron 18 transitorios causantes de gasto por fatiga, entre ellos 6 scrams, 4 paradas programadas, 4 arranques después de una parada y 4 paradas no programadas para mantenimiento o pruebas. En la Fig. 4 se muestra el gasto por fatiga calculado por FPro en este periodo: 0.002775 y 0.002615 para el safe end de las toberas de AA, lazos A y B respectivamente.

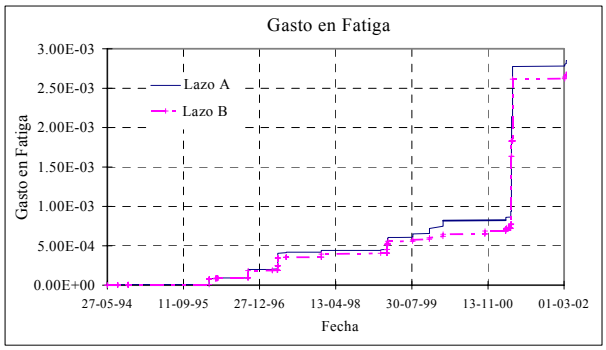


Fig. 4. Gasto en Fatiga calculado por FPro en las Toberas de AA, Lazos A y B.

En la mayoría de los casos la notación empleada por los operadores de planta en la designación de los transitorios no coincide con la definición de los transitorios dada por las DS. Un ejemplo típico se da para los seis scrams registrados en los que las variables del transitorio real son más parecidas al transitorio de diseño #9 (Interrupción del caudal de AA) que al transitorio de diseño #10 (Scram). Por lo tanto aunque los operadores de planta registren estos eventos como scram, de cara al seguimiento de fatiga se consideran interrupción del caudal de AA.

Las Fig. 5, 6, y 7 ilustran un ejemplo. La Fig. 5 muestra un scram real y las Fig. 6 y 7 los eventos #9 y #10 definidos por las DS. Se puede observar como el evento real se ajusta mejor al transitorio de diseño #9 que al #10 especialmente para las condiciones del AA.

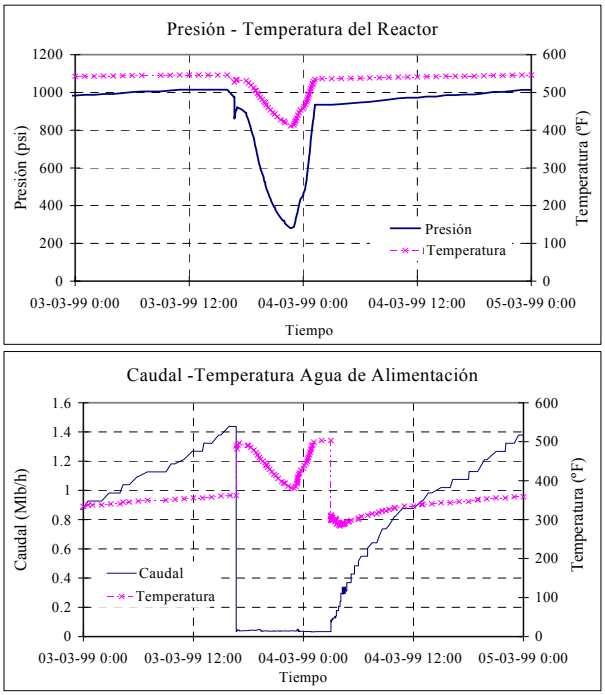


Fig. 5. Transitorio Real. Scram.

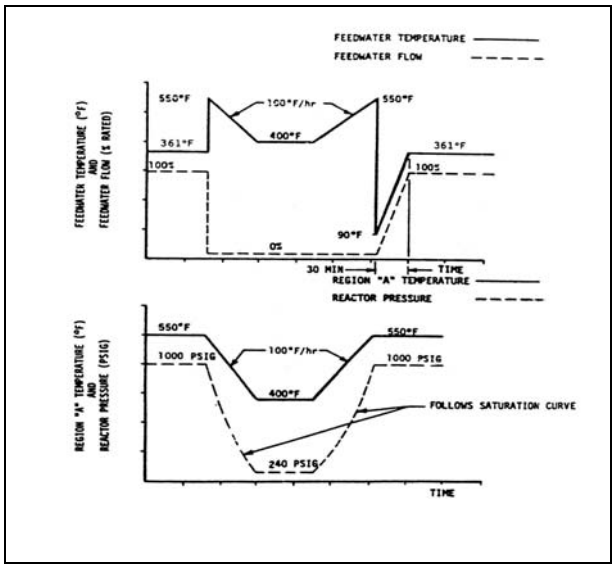


Fig. 6. Transitorio #9. Interrupción del Caudal de AA.

Otro ejemplo son los transitorios arranque y parada. Mientras que el operador de planta registra éstos como un único transitorio, en los eventos reales se observa que las variables registradas no concuerdan con la definición de diseño de estos transitorios (#1, #17). Por

otra parte se observa que los eventos registrados son una combinación de varios de los transitorios contenidos en las DS. En la Fig. 8 se ilustra este caso, se observa un arranque real en el cual se identifican los transitorios de diseño que corresponden a las variables observadas.

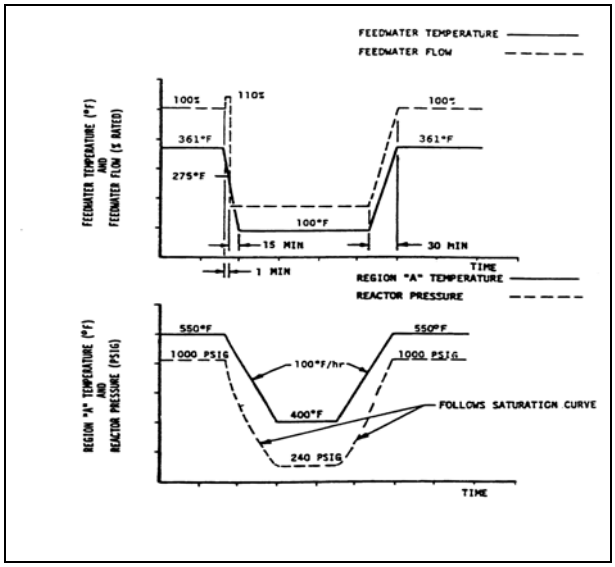


Fig. 7. Evento #10. Scram.

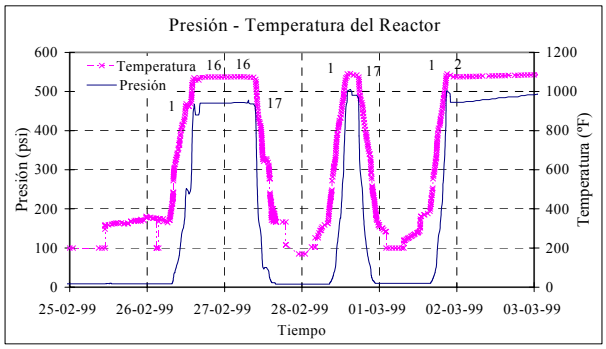


Fig. 8. Transitorio Real. Arranque.

Comparando los 18 transitorios ocurridos con los transitorios de diseño, desde el punto de vista de gasto por fatiga se identifican los siguientes eventos: 11 Eventos #1, 5 Eventos #2, 2 Eventos #7, 10 Eventos #9, 5 Eventos #14, 5 Eventos #15, 3 Eventos #16 y 11 Eventos #17. Por otra se detectaron 116 eventos que no produjeron gasto en fatiga. Estos se reparten de la siguiente forma: 67 Eventos #3 (reducción de potencia al 75%), 12 Eventos #4 (reducción de potencia al 50%) y 37 Eventos #5 (prueba de las barras de control).

En general, los transitorios reales son muy parecidos a los eventos de diseño aunque menos severos. Este hecho se aprecia en el siguiente ejemplo donde se compara el Evento #1 con el transitorio definido en las DS.

En la Fig. 9 se representan los datos de un arranque real registrado por FPro. Como se puede observar este evento se corresponde con una combinación de transitorios #1 y #2, cuya definición de diseño se muestra en las Fig. 1 y 10 respectivamente. Comparando las Fig.1 y 10 con la Fig. 9 se observa que los transitorios de diseño y real tienen la misma forma pero el transitorio real es menos severo. La tasa de calentamiento de AA del evento real, 50ºF/h, es aproximadamente la mitad de la del evento de diseño, 100ºF/h. Por otra parte el salto térmico es de 300ºF en el evento real frente a 460ºF en el de diseño. En general tanto las tasas de calentamiento-enfriamiento como los saltos térmicos son menos severos en la realidad de lo especificado en las DS.

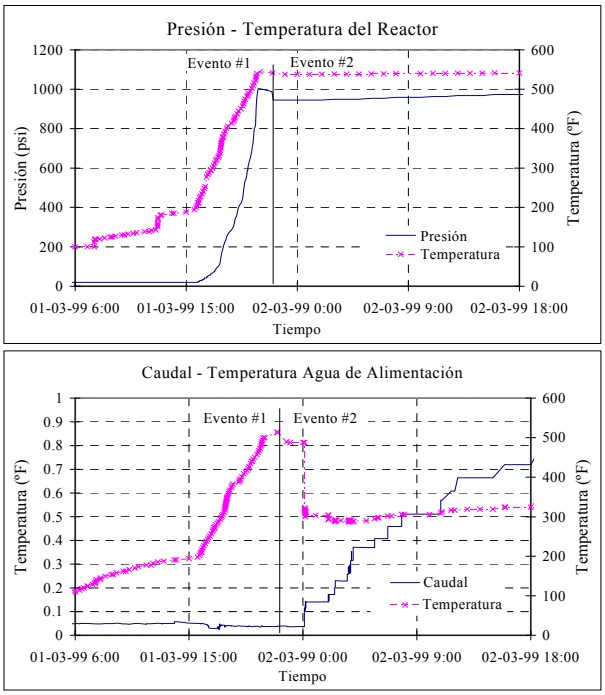


Fig. 9. Transitorio Real. Arranque (2).

Otros resultados significativos son en relación con el número proyectado de ciclos para 40 años y el gasto en fatiga total asociado. Si el gasto por fatiga registrado para el periodo de 7.75 años se extrapola linealmente hasta 40 años, se obtiene un gasto por fatiga total de 0.014323 y 0.013497 para los lazos A y B respectivamente. En la Tabla 2 se muestra el número de ciclos proyectados para 40 años para todos los transitorios de diseño en base a los registrados en los 7.75 años de funcionamiento del FMS.

Los resultados mostrados en la Tabla 2 demuestran que el número de ciclos proyectados para 40 años es, en todos los casos, inferior al especificado en las DS. La diferencia observada entre el número de ciclos proyectados y el número de ciclos permitidos es especialmente notable para el Evento #16. Este transitorio es el principal contribuyente al gasto en fatiga calculado en las bases de diseño para la tobera N4. El gasto en fatiga individual producido por este transitorio, calculado con FPro, es 0.00078. Si este gasto por evento se multiplica por las 2600 ocurrencias determinadas por las DS, se obtiene un valor que

representa más del 95% del gasto en fatiga total calculado (U_{16} = 2.037). La razón principal del bajo número de ocurrencias de este evento es que los operadores de planta están adiestrados para evitar que se produzca.

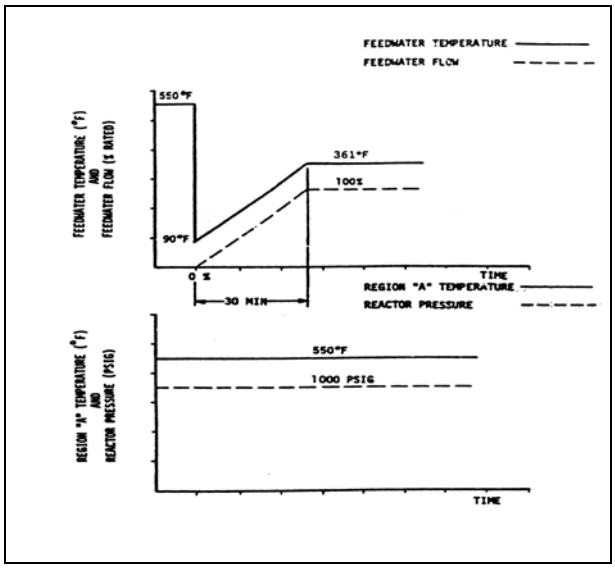


Fig. 10. Transitorio #2. Sobrevelocidad de la Turbina.

Tabla 2. Proyección de Transitorios.

Transitorio de Diseño	Nº Ocurr. (7.75 años)	Extrap. (40 años)	Nº Máx. Ocurr. (40 años)
1	8	41	120
2	5	26	120
3	67	346	10000
4	12	62	2000
5	37	191	50000
6	-	-	400
7	2	10	80
8	0	-	10
9	10	52	80
10	0	-	200
11	0	-	40
12	0	-	1
13	0	-	1
14	5	26	120
15	5	26	120
16	3	15	2600
17	8	41	120
18	0	-	1
19	6	30	130

6. CONCLUSIONES.

El alto valor del gasto por fatiga calculado con FPro para los transitorios de las bases de diseño comparado con el gasto por fatiga proporcionado por el informe de tensiones para la localización considerada, demuestra que la metodología empleada por el FMS es conservadora. Los principales factores que justifican este conservadurismo son: (i) el método de cálculo y combinación de las tensiones individuales en la localización de interés, (ii) la agrupación conservadora de los ciclos de tensión en rangos discretos y (iii) la aplicación de un factor de seguridad a la curva de fatiga de ASME.

El gasto por fatiga calculado por FPro para los transitorios ocurridos en un periodo de 7.75 años es significativamente inferior que el gasto por fatiga calculado para los transitorios equivalentes de diseño, y muy inferior al valor permitido de 1.0 especificado por el Código ASME. Las principales razones que contribuyen a este bajo valor son, en primer lugar, que la secuencia de ocurrencia de los transitorios no es la secuencia más desfavorable tal como se establece en el análisis de los transitorios de diseño. En segundo lugar, aunque los transitorios reales son similares en forma a los transitorios de diseño sus condiciones son en general menos severas. Por último, el número de ocurrencias de los transitorios reales, en su proyección a 40 años, es inferior a los límites establecidos por las bases de diseño.

La ventaja más importante de la utilización de un FMS como FPro radica en que registra transitorios reales cuyas variables difieren de las de los de diseño en orden, severidad y, especialmente, número de ocurrencias.

REFERENCIAS

[1] "Nuclenor Reactor Pressure Vessel - Analysis of Nozzles", RDM-IGE-1104, Rev. 0, The Rotterdam Dockyard Co., 1968.
[2] "Technical Description Manual for the General Electric Fatigue Monitoring System", General Electric Nuclear Energy, GE-NE-523-47-0592, Rev. 0, 1992.
[3] "Detailed Analysis of Feedwater Nozzle", Design Report, Equipos Nucleares S.A., AR-4401, Rev. 0, 1994.
[4] "Reactor Vessel - Feedwater Nozzle", Certified Design Specification, General Electric Nuclear Energy, 25A5481, Rev. 0, 1993.
[5] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, 1986 Edition.
[6] "FPro Version 2: Fatigue Monitoring Software", EPRI, TR-107448, 1997.
[7] "Transfer Function and System Logic Report for the FPro Transient and Fatigue Monitoring System for the Santa María de Garoña Nuclear Power Plant", Structural Integrity Associates, SIR-99-030, Rev. 0, 1999.
[8] "Tobera de Alimentación – N4", Informe de Cálculo, ENSA, AR-5904, Rev. 1, 1996.
[9] Dalinda Pando, "Evaluación del Gasto por Fatiga de la Vasija del Reactor de la Central Nuclear de Santa María de Garoña", Proyecto Fin de Carrera, E.T.S.I.I.T., Universidad de Cantabria, 2002.