

ANÁLISIS DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DEL FACTOR AMBIENTAL EN TRANSITORIOS REALES DE CENTRALES NUCLEARES.

R. Cicero^{1,2}, S. Cicero¹, R. Lacalle^{1,2}, I. Gorrochategui³, J.A. Laso¹

¹ Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria
E-mail: cicror@unican.es

² Inesco Ingenieros, S.L

³ Centro Tecnológico de Componentes

ABSTRACT

El medio en el que se encuentran inmersos los componentes de las centrales nucleares disminuye, generalmente, la vida a fatiga de estos. A este respecto, se han obtenido diferentes expresiones para el cálculo del efecto ambiental ante unas condiciones dadas, si bien todavía no se ha conseguido desarrollar una metodología de aplicación para la evaluación de transitorios, y especialmente los transitorios reales que suceden en planta y que son analizados mediante sistemas de monitorización. En este trabajo se analizan y discuten las metodologías empleadas actualmente para el cálculo del factor ambiental y, además, se propone un nuevo procedimiento implementable fácilmente en los actuales sistemas de monitorización.

Palabras clave: factor ambiental, fatiga, sistemas de monitorización, pares de carga, picos, valles.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se hace necesario centrar esfuerzos en la búsqueda de métodos precisos para la evaluación de la influencia del medio ambiente en el daño a fatiga de los componentes de centrales nucleares. Estos métodos han de tener en cuenta las variaciones que suceden en las condiciones del medio a lo largo de los transitorios (temperatura, concentración de oxígeno...), la composición de los materiales, el proceso de carga,...

La implantación de un sistema de monitorización (SM) que registre e implemente las condiciones reales del medio y el tipo de sollicitación en todo momento, y que aplique estos datos en tiempo real para el cálculo del daño por fatiga, puede ser la solución idónea para la evaluación del daño por fatiga, dado que de este modo se podría (por ejemplo) establecer un criterio fiable para la toma de decisiones sobre extensiones de vida de las centrales nucleares (ej., 60 años), en lo que a este mecanismo de degradación se refiere.

Por este motivo, en este artículo se analizan y discuten las principales metodologías empleadas actualmente para el cálculo del factor ambiental y, además, se propone un nuevo procedimiento implementable de forma sencilla en los actuales sistemas de monitorización.

2. CONCEPTO DE FACTOR AMBIENTAL

El factor F_{en} , que puede ser entendido como un factor de corrección ambiental en los ciclos térmicos, tiene la forma siguiente [1]:

$$F_{en} = \frac{N_{25A}}{N_{25W}} (\dot{\epsilon}_T)^{-P} \quad (1)$$

siendo:

- N_{25} : número de ciclos que producen un descenso del 25% en la tensión respecto al valor máximo de la curva cíclica de un ensayo de tracción.
- N_{25A} : vida a fatiga (en ciclos) en aire a temperatura ambiente
- N_{25W} : vida a fatiga (en ciclos) en agua a la temperatura de interés
- P : constante dependiente de la temperatura y de la cantidad de oxígeno disuelto
- $\dot{\epsilon}_T$: velocidad de deformación en la fase de crecimiento (%·s⁻¹)

El factor F_{en} , tiene su efecto en el daño acumulado (CUF, Cumulative Usage Factor) de la siguiente forma:

$$CUF = F_{en,1} \frac{n_1}{N_1} + F_{en,2} \frac{n_2}{N_2} + \dots + F_{en,m} \frac{n_m}{N_m} \quad (2)$$

siendo (n_i) el número de ciclos aplicado de un cierto transitorio, (N_i) el número de ciclos admisible a la amplitud producida por el suceso y (m) los tipos de transitorios considerados.

3. EXPRESIONES PARA EL CALCULO DEL FACTOR AMBIENTAL

Se han realizado numerosos estudios con el fin de determinar el valor del factor ambiental, obteniéndose una serie de expresiones a partir de modelos estadísticos [2]. A continuación se expone la expresión aprobada [3]

para el acero al carbono, al tratarse del material del componente que se va a evaluar en este trabajo.

$$Fen = \exp(0.632 - 0.101 \cdot S^* \cdot T^* \cdot O^* \cdot \epsilon^*) \quad (3)$$

siendo:

· T^* , O^* , S^* y ϵ^* : valores según la temperatura, el oxígeno disuelto (OD), contenido de azufre del acero y la velocidad de deformación, definidos de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} - T^* &= T - 150 & (T \geq 150 \text{ }^\circ\text{C}) \\ - T^* &= 0 & (T < 150 \text{ }^\circ\text{C}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} - O^* &= 0 & (OD < 0.05 \text{ ppm}) \\ - O^* &= \ln(12.5) & (OD \geq 0.5 \text{ ppm}) \\ - O^* &= \ln(25 \cdot OD) & (0.05 \leq OD \leq 0.5) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} - S^* &= S & (DO \leq 1.0 \text{ ppm y } S \leq 0.015 \text{ \% peso}) \\ - S^* &= 0.015 & (DO > 1 \text{ ppm}) \\ - S^* &= 0.015 & (DO \leq 1.0 \text{ ppm y } S > 0.015 \text{ \% peso}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} - \epsilon^* &= 0 & (\epsilon^* > 1 \text{ \% s}^{-1}) \\ - \epsilon^* &= \ln(\epsilon^*) & (0.001 \leq \epsilon^* \leq 1 \text{ \% s}^{-1}) \\ - \epsilon^* &= \ln(0.001) & (\epsilon^* < 0.001 \text{ \% s}^{-1}) \end{aligned} \quad (7)$$

En el análisis del efecto del medio se determinaron [4, 5] unos umbrales de actuación para los diferentes parámetros, que justifican las condiciones en las cuales el efecto del medio ambiente es aplicable, los cuales, para el caso del acero al carbono, se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Umbrales de los parámetros ambientales[4, 5]

Velocidad de deformación	$\geq 1\% \text{ s}^{-1}$
OD	$< 0.04 \text{ ppm}$
Temperatura	$\leq 150 \text{ }^\circ\text{C}$
Contenido de azufre	$< 0.002 \text{ \%}$
Amplitud de deformación	$< 0.07\%$

4. EVALUACIÓN DEL FACTOR AMBIENTAL

Actualmente no se ha definido un procedimiento claro y concluyente para evaluar el factor ambiental, si bien existen guías al respecto, siendo la más extendida la referenciada en [6]. En la misma se establecen una serie de pautas para llevar a cabo la evaluación del factor ambiental en transitorios. Sin embargo, y tal como se muestra más adelante, la evaluación del factor ambiental en los transitorios reales que tienen lugar en planta es muy difícil de realizar con las indicaciones descritas en [6], las cuales sí pueden tener una aplicación menos compleja en transitorios de diseño.

4.1. Principal metodología de evaluación (MRP-47)

El documento MRP-47 [6] se ha convertido en los últimos tiempos en la guía principal para la evaluación del factor ambiental en los transitorios que tienen lugar en planta. A lo largo de la vida de una central se suceden una serie de transitorios que introducen cargas variables en los componentes, generando en ellos

tensiones variables. El análisis a fatiga se realiza empleando los puntos más representativos del historial de tensiones, los cuales se denominan picos y valles. Los picos y valles de tensión se ordenan y se unen formando “pares de carga”, cuyas amplitudes de tensión son introducidas en la curva S-N para obtener el daño a fatiga del material debido a cada par de carga. Como se puede intuir, los pares de carga se forman por un valle y un pico separados en el tiempo (pertenecientes a diferentes transitorios) y entre los que existen otros picos y valles, los cuales también serán parte de pares de carga diferentes. En este documento [6] una serie de indicaciones para unir estos picos y valles, que (generalmente) pertenecen a diferentes transitorios y que forman un par de carga, y que tal como se indica en la Figura 1 presentan una doble discontinuidad, tanto en el tiempo como en el nivel de tensión. El modo de unión de estos dos transitorios (de sus respectivos valle y pico) mostrados en la Figura 1 puede tener una influencia importante en el resultado del cálculo de la velocidad de deformación. La discontinuidad de los transitorios se elimina siguiendo las siguientes indicaciones [6]:

► *Discontinuidad en el tiempo.* Se ha establecido que el punto final (b) del primer transitorio se produce cuando se alcanza el 90% del valor del estado de tensión final (90% del *steady state*).

► *Discontinuidad en el valor de tensión.* Se ha determinado que la unión se realiza mediante una línea vertical, sin que transcurra ningún instante de tiempo.

El factor ambiental se evalúa empleando las expresiones características [5] de cada material (acero al carbono, Ec.(3)), y solamente en los periodos de tiempo en el que la velocidad de deformación es positiva, esto es, la deformación (tensión) es creciente.

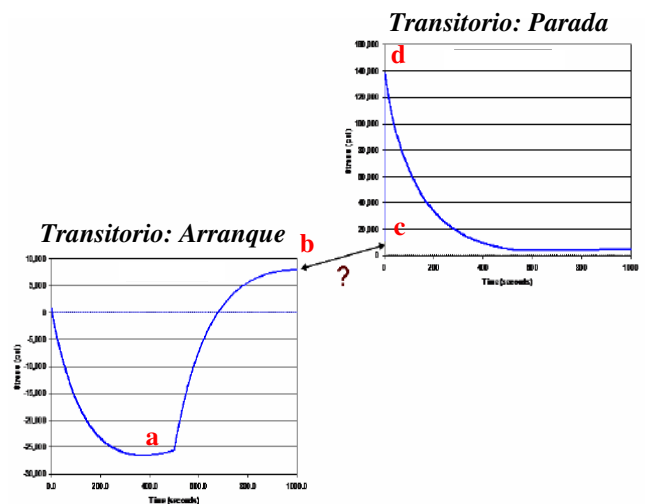


Figura.1 Discontinuidad al crear un par de carga con un valle y un pico [4]

Existen tres propuestas de evaluación planteadas para el cómputo del factor ambiental, según las cuales el cálculo de la velocidad de deformación en el periodo de análisis, y por consiguiente, del factor ambiental, será

más o menos exacto, y por ende, más o menos conservador. Las tres propuestas de evaluación del factor ambiental [4] en función de la exactitud requerida en el análisis son las siguientes:

- Propuesta #1 (VDM): Velocidad de Deformación Media (*Average Strain Rate*)
- Propuesta #2 (VDD): Velocidad de Deformación Detallada (*Detailed Strain Rate*)
- Propuesta #3 (VDI): Velocidad de Deformación Integrada (*Integrated Strain Rate*)

La propuesta VDI proporciona resultados más exactos [6], y por tanto, será la elegida para los análisis de este trabajo y la que se explica a continuación.

4.2. Propuesta de evaluación VDI

La propuesta de la velocidad de deformación integrada evalúa el factor ambiental F_{en} en cada uno de los intervalos de tiempo en que se divide el periodo entre el valle y el pico de análisis, pero con deformación creciente. El valor global del factor ambiental en este tramo creciente se calcula según la siguiente expresión:

$$F_{en} = \frac{\sum F_{en_i} \cdot \Delta \varepsilon_i}{\sum \Delta \varepsilon_i} \quad (3)$$

siendo:

- F_{en_i} =factor ambiental evaluado en el instante i , considerando:
 - Velocidad de deformación: $\varepsilon' = 100 \cdot (\Delta \varepsilon_i / \Delta T)$
 - Temperatura: $T = \text{máximo}(T_i - T_{i-1})$
 - Concentración de oxígeno:
 - $O = \text{máximo}(O_i - O_{i-1})$ para aceros al carbono y de baja aleación
 - $O = \text{mínimo}(O_i - O_{i-1})$ para aceros inoxidables
 - Contenido de azufre: $S = \text{constante}$ según las especificaciones del material
- ε' = velocidad de deformación detallada (%/seg)
- $\Delta \varepsilon_i$ = variación de deformación en el punto i , $[(S_i - S_{i-1})/E]$
- S_i = valor de tensión en el instante i (psi)
- S_{i-1} = valor de tensión en el instante $i-1$ (psi)
- Δt = intervalo de tiempo en el instante i (seg), $[t_i - t_{i-1}]$
- E = módulo de elasticidad (psi)

4.3. Análisis de la metodología MRP-47

Esta metodología evalúa el factor ambiental en los pares de carga una vez se ha procedido a la unión de los transitorios (Figura 1), esto es, de los valles y picos. Por lo tanto, la metodología MRP-47 se fundamenta en unas bases teóricas correctas, y en las que las evaluaciones del daño a fatiga y del factor ambiental se ajustan o acoplan entre sí. En la Figura 2 se mostró el procedimiento de unión de dos transitorios cuyos puntos significativos (pico y valle) formaban un par de carga. Este ejemplo, así como los pasos a realizar para la evaluación del efecto ambiental, parecen claros y no

excesivamente complicados de ejecutar. Sin embargo, las tensiones de los transitorios reales que suceden en planta y que son evaluadas mediante los sistemas de monitorización, difieren notablemente en la forma y aspecto de la que se han presentado en la Figura 2.

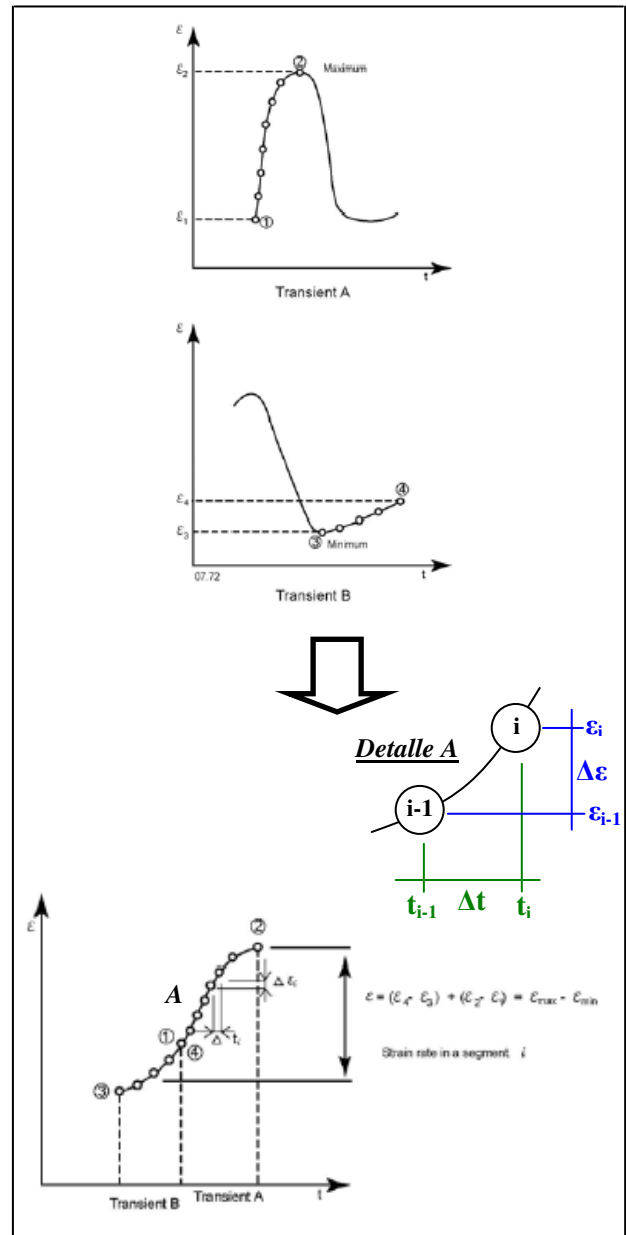


Figura 2. División del transitorio para el cálculo preciso de la velocidad de deformación [4]

En la Figura 3 se muestra un ejemplo de las tensiones reales obtenidas en un el blend radius de la tobera de agua de alimentación del lazo A de una central nuclear. Como se puede observar, las tensiones no evolucionan generalmente de una forma suave y continua, sino que existen variaciones bruscas asociadas a las condiciones variables del reactor. Esta situación dificulta notablemente las indicaciones detalladas en [4] para la unión de los transitorios, y especialmente para la localización del valor de tensión del 90% de su estado tensional estable (*steady state*). En consecuencia, la

aplicación de la metodología de referencia MRP-47 es posible en la evaluación de transitorios de diseño, y muy difícil de aplicar con datos reales de transitorios que han tenido lugar en planta.

Existe otra característica del método que dificulta aún más la aplicación de esta metodología, y es la constante variación que se produce en la unión de picos y valles para la formación de pares de carga. A medida que se suceden los transitorios y aparecen nuevos puntos significativos, esto es, nuevos picos y valles, éstos se reordenan continuamente, de tal modo que los pares de carga están constantemente variando. La metodología MRP-47 analiza el factor ambiental en pares de carga una vez realizado la unión del valle y el pico (Figura 1). Por lo tanto, la aplicación de esta metodología implica una modificación de los cálculos según ocurren nuevos transitorios, tanto en la unión de los nuevos pares de carga como en el cálculo del factor ambiental asociado a ellos. Esta situación hace inviable el empleo de esta metodología, y prácticamente imposible su implantación en los sistemas de monitorización actuales.

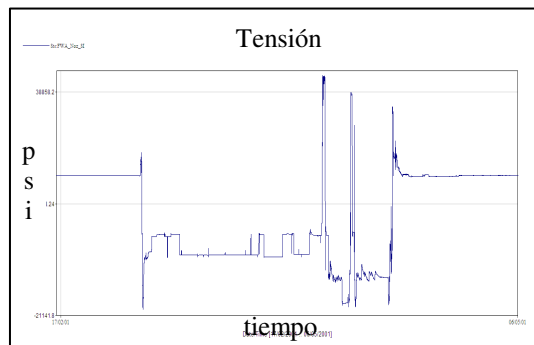


Figura 3. Tensiones reales en un componente

Por lo tanto, la metodología MRP-47 se enfrenta de forma directa al procedimiento de evaluación del daño a fatiga basado en la ordenación continua de los picos y valles para formar pares de carga.

5. METODOLOGÍA PROPUESTA: P&V

Las metodologías hasta ahora desarrolladas presentan incompatibilidades con los actuales sistemas de monitorización, dificultades de aplicación en transitorios reales o inexactitudes inaceptables en la ingeniería nuclear.

Esta situación ha propiciado el estudio y desarrollo de una nueva metodología de evaluación que aquí se propone y se define como “Metodología pico y valle (P&V)”. El fundamento de esta metodología se basa en el principio de que el medio en el que se encuentran inmersos los componentes de las centrales produce un aumento del daño a fatiga de estos. Además el medio actúa o tiene efecto cuando la velocidad de deformación es positiva. El ambiente, por tanto, reduce la vida a fatiga de los componentes, y su efecto puede ser comparado con una situación de mayor tensión sobre estos componentes pero ante un ambiente no agresivo,

esto es, al aire. Por lo tanto, el objetivo de esta metodología es establecer una equivalencia entre una variación tensional en un medio agresivo y una variación tensional mayor en un medio no agresivo (aire). Además, el procedimiento ha de tener en cuenta la morfología que presentan los transitorios reales (Figura 3), e igualmente ha de posibilitar de forma sencilla su implementación en los actuales sistemas de monitorización. Bajo estas condiciones se plantea la “Metodología P&V” como nuevo procedimiento de evaluación del daño a fatiga considerando el efecto del medio.

En primer lugar, se propone realizar la evaluación del factor ambiental ($F_{enP\&V}$) entre valles y picos consecutivos, esto es, periodos con velocidad de deformación positiva, al contrario que la metodología MRP-47, que plantea su evaluación entre los valles y picos que forman los pares de carga. En segundo lugar, el factor ambiental ($F_{enP\&V}$) calculado entre un valle y pico consecutivo se aplicará sobre el rango de tensión existente entre dicho valle y pico consecutivo, de tal modo que esta variación de tensión se verá aumentada proporcionalmente a dicho factor ambiental ($F_{enP\&V}$). El aumento de la diferencia de tensión entre el valle y el pico se realizará aumentando únicamente el valor de tensión del pico, de tal modo, que el valor de tensión de los valles nunca se verá modificado.

En la Figura 4 se muestra el modo de proceder para calcular la variación de tensión equivalente, que se ha de ser mayor que el rango de tensión inicial entre el valle y pico original. Se supone un valor de rango de tensión (ΔS_{PV}) entre el valle (V) y pico (P) iniciales. Con la amplitud de tensión $S_a = 0.5 \cdot \Delta S_{PV}$, y empleando la curva S-N del material, se puede calcular el número de ciclos (N) admisibles para ese nivel de tensión, y por consiguiente el daño a fatiga (U_{PV}) originado. Por otro lado, y aplicando la propuesta VDI (apartado 4.1), se evalúa el factor ambiental (F_{enPV}) en el periodo entre el valle y pico, con el cual se puede obtener el daño a fatiga causado por la variación tensional entre el valle y el pico considerando los efectos del ambiente (U_{PVenv}). Procediendo de modo inverso, con este valor de daño a fatiga ambiental, se puede obtener fácilmente el número de ciclos admisibles teniendo en cuenta el efecto del medio (N_{env}), y empleando la curva de fatiga S-N, se calcula la nueva amplitud de tensión (S_a').

La amplitud de tensión (S_a') produce un daño a fatiga en el aire equivalente a la amplitud de tensión inicial (S_a) considerando los efectos del medio. De igual forma, la amplitud de tensión (S_a') nos permite calcular el rango o diferencia tensional ($\Delta S_{P\&V}$) que ha de existir entre el valle y el nuevo pico, y ya que el valor de tensión del valle es fijo, el valor de tensión del nuevo pico se obtiene de forma directa. Por lo tanto, la aplicación de esta metodología, supone una modificación del valor de los picos. Una vez se hayan calculado éstos, se procederá a aplicar un análisis a fatiga convencional, esto es, reordenación de los nuevos picos y los valles, posterior formación de pares de carga

y aplicación de la curva de fatiga para evaluar el daño que produce cada par de carga.

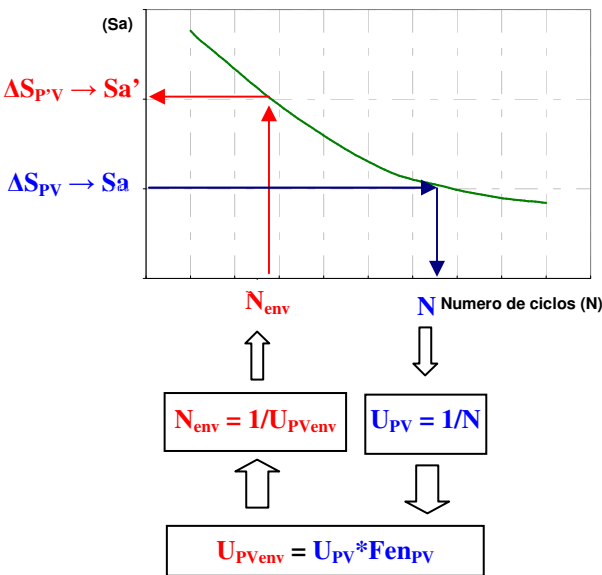


Figura 4. Procedimiento para la obtención del valor de los nuevos picos

En la Figura 5 se muestra un ejemplo práctico que permite entender mejor la metodología en su conjunto. Se han supuesto cuatro transitorios, en cada uno de los cuales se han producido dos puntos significativos de tensión, esto es, un pico y un valle. En la Tabla 2 se puede seguir el procedimiento aplicado paso a paso, y explicado anteriormente. En ella, además, se puede observar como el valor de tensión de los valles no varía, y solo se aumenta la tensión de los picos. El tercer pico (P3) permanece invariable, ya que el factor ambiental en el periodo asociado a este punto significativo es la unidad, es decir, el ambiente no tiene efecto alguno en el daño a fatiga durante ese periodo de tiempo.

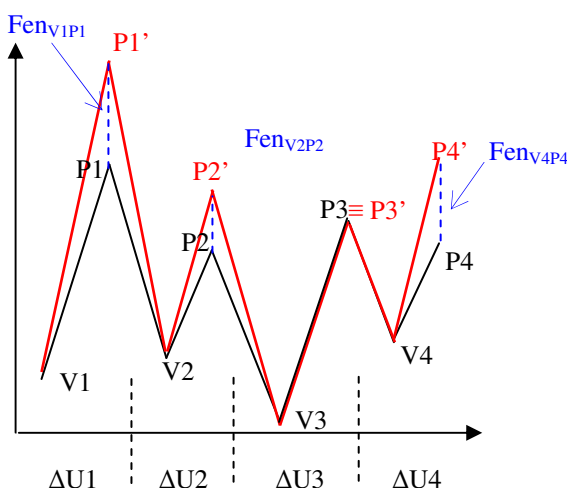


Figura 5. Metodología P&V en secuencia transitorios

En la Figura 5 se puede apreciar como se modifica el perfil de tensiones una vez aplicado el efecto del medio. Con los valles y los nuevos picos se procede a realizar un análisis a fatiga convencional, esto es, ordenación de

estos nuevos puntos significativos, formación de nuevos pares de carga y evaluación del daño empleando la curva de fatiga S-N que corresponda. La metodología P&V aquí propuesta elimina los inconvenientes y dificultades presentadas por la metodología MRP-47 anteriormente explicada. El cálculo del factor ambiental entre valles y picos consecutivos aplicando la propuesta VDI no presenta ninguna dificultad, ya que son periodos de tiempo totalmente definidos y delimitados. Además no se precisa de ninguna unión previa de transitorios, ni tampoco una definición de cómo y dónde éstos se conectan, con lo que se elimina la dificultad planteada por la forma y aspecto que presentaban las tensiones en los transitorios reales.

Tabla 1. Ejemplo de proceder de la metodología P&V

P&V consecutivos	Pico (P) (psi)	Valle (V) (psi)	U_{PV}	Fen_{PV}	$U_{PVenv} = Fen_{PV} \cdot U_{PV}$
V1P1	42819	8143	1.099E-5	3.54	3.889E-5
V2P2	26994	8203	1.994E-7	18.16	3.621E-6
V3P3	31843	5269	4.684E-6	1.00	4.684E-6
V4P4	28582	11156	8.617E-8	16.20	1.396E-6

P&V consecutivos	Nenv (ciclos)	Sa' (psi)	ΔS_{P-V} (psi)	Pico modificado (P') (psi)	Valle (V) (psi)
V1P1	25711	29070	51452	59595	8143
V2P2	276169	13855	24522	32725	8203
V3P3	213487	15014	26574	31843	5269
V4P4	716323	12647	22384	33540	11156

Otras de las ventajas que presenta esta metodología es que la aparición de nuevos transitorios, y por tanto nuevos picos y valles, no supone ningún problema, ya que el factor ambiental es calculado entre valles y picos consecutivos, y la posición de estos en el tiempo es invariable. Por lo tanto, en este sentido, su implementación en los sistemas de monitorización es sencilla. Por último, y tal como se ha observado, esta metodología se basa en la aplicación “instantánea” del efecto ambiental sobre el daño a fatiga de los componentes a medida que estos se ven sometidos a estados de deformación creciente.

6. CASO PRÁCTICO.

Se analizan seis transitorios reales ocurridos en una central nuclear en el periodo 2003-2005. Los transitorios, en orden de ocurrencia son: 1. Prueba hidrostática; 2. Arranque; 3. Scram; 4. Reducción de potencia; 5. Scram; 6. Parada.

La localización de análisis es de acero al carbono, y por tanto la expresión utilizada se muestra en la expresión (3). En la Figura 6 se muestra la tensión (línea verde) y los puntos significativos (puntos rojos), esto es, picos y valles, durante los transitorios mencionados.

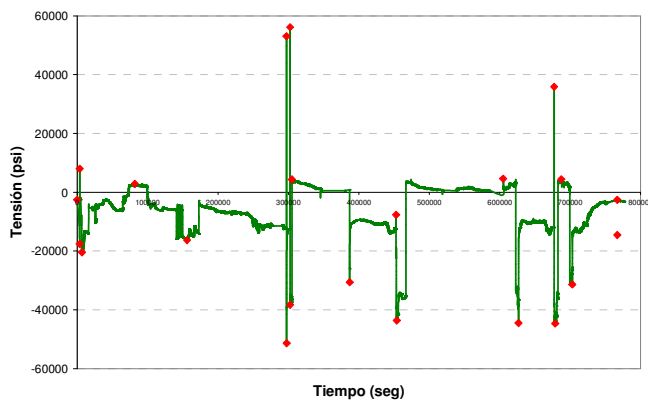


Figura 6. Tensión y P&V

Se calcula el factor ambiental (F_{en}) según la propuesta VDI, y se aplica en función de las particularidades de las metodologías de evaluación empleadas: metodología MRP-47 y metodología P&V propuesta. En la Tabla 3 y Tabla 4 se muestran los resultados del factor ambiental obtenidos al aplicar las dos metodologías de evaluación. Como puede observarse, en el caso estudiado, la metodología P&V proporciona mayores valores tanto para el factor ambiental como para el daño acumulado en fatiga

Tabla 3. Metodología MRP-47

P&V (Par de carga)	Valle $F_{en}(v-ss)$	Pico $F_{en}(ss-p)$	F_{en}	$U_{ENVTOTAL}$
V4-P5	6.77	6.77	6.77	0.00475
V9-P4	1.00	5.29	5.29	
V8-P9	3.44	3.66	3.56	
V7-P2	1.25	1.00	1.15	
V5-P8	1.00	2.69	1.13	
V10-P10	2.47	1.00	1.54	
V6-P6	3.68	1.00	1.88	
V2-P3	1.00	1.00	1.00	
V1-P1	1.00	1.00	1.00	
V3-P11	1.00	2.47	2.11	
V11-P7	--	3.39	3.39	
			Fen	4.51

Tabla 4. Metodología P&V

P&V	Pico	Valle	U_{TOTAL}	F_{en}	Pico'	Valle	$U_{ENVTOTAL}$
V2P3	7995	-17567	0.00105	1.00	7995	-17567	0.00588
V3P4	2896	-20444		1.00	2896	-20444	
V4P5	53079	-16262		4.38	93695	-16262	
V5P6	56182	-51384		6.76	175420	-51384	
V6P7	4362	-38256		1.00	4362	-38256	
V7P8	-7678	-30577		3.51	3310	-30577	
V8P9	4636	-43603		1.63	12583	-43603	
V9P10	35899	-44474		3.57	75097	-44474	
V7P8	4447	-44644		1.00	4447	-44644	
V8P9	-2521	-31383		2.47	6891	-31383	
			Fen				5.58

7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.

La metodología MRP-47 se considera que proporciona resultados muy ajustados a la realidad en el cálculo del efecto ambiental en el daño a fatiga. Uno de los inconvenientes de esta metodología, y que posiblemente impide su aprobación definitiva, es la dificultad enorme

de adaptación al cálculo de transitorios reales, y las continuas re-evaluaciones que implica la aparición de nuevos transitorios.

La metodología P&V propuesta, en el caso estudiado, ofrece un valor del factor ambiental ligeramente superior al obtenido con la metodología de referencia MRP-47, y por tanto, un valor del daño a fatiga ambiental levemente superior al real.

La metodología P&V, basada en el efecto del ambiente en los periodos en los que la velocidad de deformación es positiva muestra resultados muy buenos y ajustados al procediendo MRP-47, o expresado de otro modo, a la realidad.

La facilidad de implementar la metodología P&V, unido a su perfecta flexibilidad de cálculo ante la aparición de nuevos transitorios (reales o de diseño) y, como se ha podido comprobar, la exactitud y ligero conservadurismo de los resultados, sugiere la utilización de dicha metodología en la evaluación del daño a fatiga considerando los efectos ambientales en componentes de centrales nucleares.

La aprobación de esta nueva metodología implica sin duda, la realización de más evaluaciones de componentes y transitorios, así como ensayos de fatiga que puedan confirmar los resultados obtenidos teóricamente.

8. RERERENCIAS

- [1] H.S. Mehta, and S.R. Gosselin "Environmental Factor Approach to Account for Water Effects in Pressure Vessel and Piping Fatigue Evaluations".
- [2] Omesh K. Chopra and William J. Shack. "The Effect of LWR Coolant Environments on the Fatigue Life of Reactor Materials", 2006 ASME Pressure Vessel and Piping Division Conference, July 2006.
- [3] "Guidelines For Evaluating Fatigue Analyses Incorporating the Life Reduction of Metal Components due to the Effects of The Light-Water Reactor Environment for New Reactors" REGULATORY GUIDE 1.207, March 2007
- [4] NUREG/CR-5704 (ANL-97/31), "Effects of LWR Coolant Environments on Fatigue Design Curves of Austenitic Stainless Steel" ", U.S.Nuclear Regulatory Commission, April 1999.
- [5] NUREG/CR-6583 (ANL-97/18), "Effects of LWR Coolant Environments on Fatigue Design Curves of Carbon and Low-Alloy Steel" , U.S.Nuclear Regulatory Commission, March 1998.
- [6] "Guidelines for Addressing Fatigue Environmental Effects in a License Renewal Application" Code Case, MRP-47-Revision1, EPRI. September 2005.