

Estudio teórico de la erosión mecánica en un álabe rotor del último paso de la sección de baja presión de una turbina de vapor de 300 MW

F. Rueda-Martínez
M. Toledo-Velázquez
I. Carvajal-Mariscal
J. Abugaber-Francis
G. Tolentino-Eslava

Secretaría de Investigación y Posgrado,
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
(Zacatenco), Instituto Politécnico Nacional, México, DF.
MÉXICO.

e-mail: iaasa_frm@hotmail.com

Recibido el 4 de septiembre de 2006; aceptado el 26 de marzo de 2007.

1. Resumen

Se presenta un estudio teórico que permite evaluar la influencia que ejercen diferentes parámetros físicos, estructurales y de régimen (presión de impulso, frecuencia de impactos, dimensión media de las gotas, etc.), sobre la erosión mecánica que se presenta en los álabes rotores en el último paso de la sección de baja presión de una turbina de vapor con generación eléctrica de 300 MW.

Los álabes, cuando trabajan con vapor húmedo, sufren la acción constante del choque de partículas de líquido, a consecuencia de lo cual se genera un desgaste (erosión) en su superficie y en otros elementos de la turbina. La humedad del vapor, en combinación con las velocidades de los álabes, en especial de los últimos, es un factor que influye en la manifestación de problemas de erosión. Al ser las turbinas de vapor de 300 MW muy utilizadas en la generación de energía eléctrica, el fenómeno de erosión está siempre presente causando en ellas problemas en su funcionamiento. Los deterioros por este fenómeno empeoran bruscamente las características aerodinámicas en la sección de paso de la turbina, lo que naturalmente se refleja en el rendimiento, siendo la erosión considerable cuando se abarca gran parte del álabe.

Palabras clave: álabe rotor, erosión, humedad de vapor.

2. Abstract (Theoretical Analysis of the Mechanical erosion on a Mobile Blade in the Last Stage of the Low-Pressure section of a 300 MW Steam Turbine)

It is presented a theoretical study that allows to evaluate the influence that exercise different physical, structural and of regime parameters (as impulse pressure, impact frequency, modal dimension drops, etc.), on the mechanical erosion that is presented on working blades in the last stage of the pressure low section of a steam turbine with electric generation of 300 MW.

The blades, when working with wet steam, suffer the constant action of the crash of the particles of liquid, as a consequence of that which is created a wear (erosion) on the surface and other elements of the turbine. The wet steam, in combination with the speeds of the blades, especially of the last ones, is a factor that influences in the manifestation of erosion problems. The steam turbines of 300 MW are much more used for the electric power generation, and the erosion phenomenon is always present causing in them problems in their operation. The deteriorations for this phenomenon worsen abruptly the aerodynamic characteristics in the stages of the turbine, that it naturally is reflected in the efficiency, being the considerable erosion when it includes great part of the blade.

Key words: worker blade, erosion, wet steam.

3. Introducción

La determinación de parámetros que influyen en la erosión mecánica en turbinas de vapor se efectúa para conocer más a fondo las causas que la originan y tener más información acerca de los problemas resultantes. Es complicada la dependencia de la erosión de los álabes respecto a las variables del vapor debido a las micropartículas de líquido y a las distintas condiciones de operación que se mantienen, por lo que se toman diferentes parámetros que han sido calculados por experimentación, experiencia y análisis matemáticos. La tur-

bina analizada es de una potencia de 300 MW, comparándose en el caso ideal-real y diseño-real.

4. Desarrollo

En esta sección se ofrece primero la base teórica para una mejor comprensión del fenómeno de surgimiento de humedad durante el proceso de expansión de vapor en la turbina. Se procede después al análisis de los modelos matemáticos involucrados y de las características de la turbomáquina en la sección de baja presión; posteriormente, en el apartado III se muestran los resultados y su evaluación.

4.1 Formación de humedad

Una singular característica de la expansión del vapor en algunos elementos de las turbinas es el hecho de que durante la transición de la región de estado de una fase a la de dos fases en los flujos que se aceleran con grandes velocidades y grandes gradientes de presión, la variación de los parámetros termodinámicos sucede con tanta rapidez, que no se realiza el proceso de equilibrio de condensación. La temperatura del vapor resulta estar por debajo de la temperatura correspondiente de saturación (sobreenfriamiento ΔT). Al alcanzar un sobreenfriamiento local máximo, el vapor pasa espontáneamente al estado que es próximo al de equilibrio. Aquí existen desviaciones de gotas muy pequeñas (compuestas de varias moléculas) que son inestables, y sólo los gérmenes, cuya dimensión supera la crítica, son viables. La fase nueva surge sobre estas formaciones estables llamados núcleos de condensación. En el proceso de expansión sobre estos núcleos, el número que surge comienza a ser considerable, que sobre los mismos empieza una condensación impetuosa del vapor circundante.

La magnitud del radio del germen crítico r^* [1], apto para el crecimiento posterior, se determina de la condición de equilibrio del medio bifásico: vapor y gotas de agua. La humedad a la entrada de la corona de álabes tiene diferente concentración y distinto grado de dispersión, mientras que las velocidades de las gotas de humedad difieren de la velocidad del vapor, tanto por su magnitud como por su dirección. Las trayectorias de las gotas de humedad pueden ser diferentes, perdiendo su estabilidad y fraccionándose. Las gotas pequeñas siguen las líneas de corriente del flujo principal; su velocidad por la magnitud y la dirección poco difiere de la del vapor.

Una característica importante del medio bifásico es el coeficiente de deslizamiento $v = c'/c''$ [2], es decir, la relación entre las velocidades de la fase líquida c' (partículas de humedad) y la de la fase vapor c'' . Si las gotas son mayores, menor es el coeficiente de deslizamiento v . Debido a este deslizamiento

entre las fases, tiene mucha importancia la acción mecánica de las gotas grandes en el flujo de vapor.

En la sección de baja presión ocurre una disminución de la calidad, comenzando con valores sin mayor riesgo ($x=98\%$), hasta llegar a alcanzar calidades bajas ($x=90\%$) en el último paso [3], lo cual indica una presencia clara de humedad. Los álabes, al trabajar con este vapor húmedo, sufren la acción constante del impacto de las partículas de líquido, a consecuencia de lo cual se genera un desgaste (erosión) en su superficie y también en otros elementos de la turbina. La cantidad considerable de humedad del vapor, aunada con las velocidades de los álabes, especialmente los últimos, es un factor que influye en la aparición de la erosión, así como también los parámetros geométricos de la turbina, ya que el diseño de los álabes (altura, cuerda, espaciado axial, número de etapa, cuello, ángulos de entrada y salida del perfil, ángulo del alabeado, etc.) incide directamente sobre las velocidades en juego.

Por esto se debe poner especial cuidado en las turbinas de condensación, ya que los álabes que se encuentran en las secciones de humedad creciente se ven en condiciones desfavorables de contenido de agua, velocidad periférica y configuración geométrica [4]; las gotitas de agua que se forman erosionan los álabes rotores, desgastando el metal de los bordes de ataque.

Cuando en la entrada de la etapa el vapor es húmedo (3-5%) en la corona de álabes estatores, en las paredes del perfil se forma una película de agua. Deslizándose por los bordes de escape de los álabes estatores, esta película se rompe y se arrastra con el vapor hacia los álabes rotores con una velocidad relativa considerablemente mayor w'_{pel} , cuya magnitud es próxima a la velocidad circunferencial $u = \pi Dn$ en esta sección, habiendo la particularidad de que en el flujo turbulento una parte de la humedad tiende a la periferia. Aquí el diámetro D de la corona rotora, en la sección que se analiza, está en metros, y la frecuencia de rotación n en Hz. Estas gotas caen sobre la superficie de los álabes rotores, debido a la fuerza centrífuga, en el lado de succión del perfil en la zona de los bordes de ataque, designando al desgaste resultante en la figura 1 como $\delta_{b\ pel}$, siendo éste muy pequeño comparado con el resto del desgaste observado.

Las gotas de dimensiones menores, por ejemplo las formadas a consecuencia de la reflexión (gotas que cambiaron de dirección) y la separación desde la superficie de los álabes estatores, tienen velocidades absolutas c'_{desp} y ángulos α'_{desp} distintos, diferentes valores de las velocidades w_{desp} y de los ángulos de admisión β'_{desp} . El vapor entra en los canales de las coronas de álabes rotores con la velocidad relativa w'_{desp} . Como se obser-

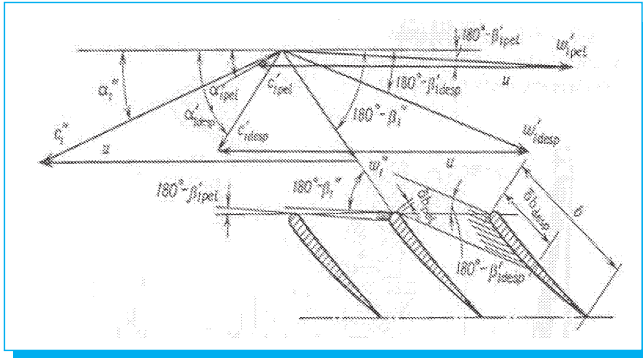


Fig. 1. Triángulos de velocidades de entrada de las fases vapor y líquido en la zona periférica de la etapa de álabes muy contorneados. «...» significa los parámetros de la fase líquida; «...» de la fase vapor; el subíndice "pel" corresponde al flujo de gotas grandes formadas al fraccionarse la película que sale de los bordes de escape de los álabes estatores; el subíndice "desp", a las partículas que se han formado como resultado de reflexión y desprendimiento de las gotas [1].

va en la figura 1, el mayor grado de desgaste $\delta_{b, desp}$ sobre el perfil del álabe se denota como resultado de la reflexión y el desprendimiento de las gotas. Los álabes rotores chocan contra las micropartículas de líquido y el impacto resultante desprende material de aquéllos.

Un parámetro determinante que influye sobre la erosión de los álabes, es la parte de la humedad macrodispersa λ , necesaria para calcular los álabes estatores según las etapas. El concepto de humedad macrodispersa es convencional. A ésta se refiere como la humedad que se mueve con gran deslizamiento respecto a la fase vapor [1] y es relativa a la masa total de la erosión [5]; es decir, dentro de la humedad total, es la parte de humedad peligrosa que provoca erosión. La distribución de la humedad se explica por el hecho de que la humedad macrodispersa que cae sobre la superficie de los álabes rotores, se lanza por las fuerzas centrífugas hacia la periferia [2]. Si en la entrada de la corona de álabes a investigar hay humedad macrodispersa, entonces las pérdidas irreversibles de energía cinética con el aumento de la humedad crecen monótonamente, además, el nivel de las pérdidas es más alto que en presencia de la humedad inicialmente dispersa.

Se tienen muchas relaciones semiempíricas para determinar los factores que actúan sobre el desgaste por erosión de los bordes de ataque de álabes rotores, por lo que evaluar la influencia de los distintos parámetros estructurales, físicos y de régimen, puede ayudar más a entender las causas y a tener más información precisa de este problema tecnológico.

4.2 Análisis de modelos matemáticos semiempíricos

A continuación se indican relaciones en cálculo de los parámetros presentes en la erosión de tipo mecánico.

Como se mencionó anteriormente, el germen crítico es capaz de aumentar el crecimiento de la fase líquida en el flujo de vapor, únicamente siendo afectado por el sobreenfriamiento local ΔT . Y siendo el radio del germen crítico r^* en metros, puede calcularse a partir de la siguiente ecuación [1]:

$$r^* = \frac{2\sigma T_s}{L\Delta T\rho'} \quad (1)$$

donde σ es el coeficiente de tensión superficial en N/m, L es el calor latente de las transiciones de fase en J/kg, ρ_{liq} es la densidad de la fase líquida en kg/m³, T_s es la temperatura local de saturación en la 5a etapa y T es la temperatura en la 5a etapa en K. De (1), La humedad macrodispersa, λ , cuya ecuación aproximada es [1]:

$$\lambda = 0.07z_{hum} k_{aer} (0.5 - 0.094 \ln p_2) \quad (2)$$

como se mencionó más arriba, es la humedad que se mueve con gran deslizamiento respecto de la fase vapor. El diámetro de las gotas supera el diámetro crítico de las partículas que se mueven en el flujo acelerador con deslizamiento $v = c'/c \leq 0.8$. La magnitud límite de deslizamiento indicada se toma de las condiciones, según han mostrado las investigaciones, de la precipitación posible de las gotas de semejante dimensión sobre las superficies de los álabes estatores y de la formación de las películas, de la influencia máxima ejercida sobre las características del álabe estator, en primer lugar, en su rendimiento, así como la erosión. A partir de la presión $p_{sal rot}$ en Mpa, delante de la 5a etapa, del valor adimensional de la constante de perfeccionamiento de la parte fija k_{aer} , y de z_{hum} , número de la etapa contando a partir de aquella en que se formó la humedad, se puede determinar λ .

El coeficiente de deslizamiento v lo obtenemos a través de los datos de diseño de la geometría del álabe, como se muestra a continuación [1]:

$$v = 15 \cdot 10^{-5} p_{sal rot} \frac{u_{per}}{x_{per}} \sqrt{\frac{(\delta_{ax}^{per} + 0.05)}{\text{sen } \alpha_{desp per}} (1 - \rho_{per})} \quad (3)$$

donde $x_{per} = u_{per} / c_{per}$ es la relación de las velocidades, ρ_{per} es el grado de reacción cerca de la periferia de la etapa, φ es el coeficiente de velocidad, δ_{ax}^{per} es el juego axial en metros entre los álabes estatores y rotores, $p_{ent rot}$ es la presión en el

juego en kPa, μ_{per} , es la velocidad circular en m/s, ρ_{per} es el grado de reacción en la periferia, x_{per} es la relación de velocidades, α_{per} es el ángulo resultado de la reflexión y desprendimiento de las gotas, donde el índice "per" se refiere a la sección periférica a tratar.

La velocidad $w_{desp\ per}$ es la velocidad relativa de las gotas de humedad, como se ve en la figura 1, la cual se vuelve la velocidad de impacto al contacto de la gota contra la zona periférica a tratar de los álabes rotores, siendo ésta:

$$(w_{desp\ per})^2 = u_{per}^2 \left[1 + \frac{v^2 \varphi^2 (1 - \rho_{per})}{x_{per}^2} - \frac{2v\varphi \cos \alpha_{desp\ per}}{x_{per}} \sqrt{1 - \rho_{per}} \right] \quad (4)$$

La presión de impulso es el crecimiento local de la presión durante el choque de una gota (aislada) contra la superficie dura del álabe, y según la siguiente ecuación, la presión de impulso será igual a la ecuación de Zhukovski [1]:

$$\Delta p = a' w \rho_{liq} \quad (5)$$

donde a' es la velocidad de propagación de la onda de choque en el líquido en m/s, w es la velocidad de impacto de la gota contra la superficie y ρ_{liq} es la densidad del líquido en kg/m³.

El radio medio r_{got} en m [1], de las gotas de humedad macrodispersa se puede calcular por medio del número crítico de Weber en calidad de característica de estabilidad:

$$We = d_{got} (c'')^2 / \sigma v_{spf}$$

y siendo $We=15$ crítico [1], tenemos:

$$r_{got} = \frac{15 \sigma v_{spf}}{2c^2} = \frac{15 \sigma v_{spf} x_{per}^2}{2\varphi^2 (1 - \rho_{per}) u_{per}^2} \quad (6)$$

donde v_{spf} es el volumen específico en la entrada del álabe rotor en m³/kg, d_{got} es el diámetro de las micropartículas de líquido en mm, c'' es la velocidad de la fase vapor en m/s.

Ahora, para el cálculo de las velocidades de la mancha de contacto de la gota contra la superficie, el radio máximo y el comienzo y duración de la extensión de la gota deformada contra la superficie se puede obtener a través de un pequeño análisis [2]. En el primer momento de tiempo τ_1 , cuando la gota entra en contacto con la superficie (fig. 2), sólo en el punto A_1 surge una onda de choque que se propaga en la gota

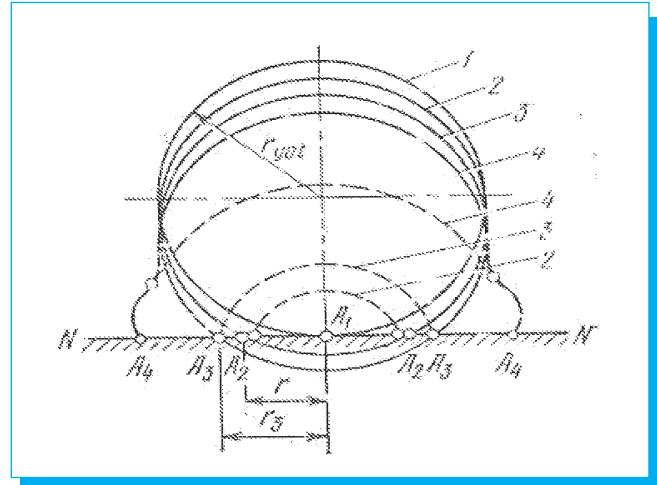


Fig. 2. Esquema del impacto de la gota contra una superficie dura plana NN. — contornos de la gota; ---- fronteras de la onda de choque; A_1, A_2, A_3, A_4 ; fronteras de la mancha de contacto con la superficie de contacto respectivamente en los momentos de tiempo $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$; r_{got} radio de la gota; r radio corriente de la mancha de contacto; r_3 radio máximo de la mancha de contacto que corresponde al momento τ_3 del comienzo de la extensión [2].

con una velocidad a' . Simultáneamente tiene lugar la expansión de la mancha (en el plano) de contacto de la gota en región del punto A_1 . La velocidad c_B con que los puntos en la circunferencia de la mancha de contacto se desplazan por la superficie del impacto a partir del punto A_1 [2], es igual a:

$$c_B = w \frac{r_{got}}{r} \quad (7)$$

donde w es la velocidad de impacto de la gota, en m/s; r_{got} es el radio de la gota y r es el radio de la corriente en μm . En el periodo inicial, siendo pequeños los valores del radio r , la velocidad c_B supera la velocidad de propagación de la onda de choque a . En este caso las partículas en la superficie de la gota entran en contacto con el plano del impacto NN con más rapidez que la propagación de la perturbación en el interior de la gota. En la figura 3 el momento de tiempo τ_2 se muestra mediante los puntos A_2 que son fronteras de la mancha de contacto. Mientras tanto, la onda de choque mostrada por la línea de trazos 2, no sale de los límites de esta mancha. Y solamente en el tiempo τ_3 , cuando la velocidad $c_B = a$, comienza la extensión de la gota a lo largo de la superficie de impacto. Las fronteras de la mancha de contacto en este instante se designan con los puntos A_3 , y la onda de choque, con la línea de trazos 3. La extensión posterior de la gota ($\tau_4 > \tau_3$) se muestra con ayuda de los puntos A_4 . El radio máximo de la

mancha de contacto r_3 corresponde al momento τ_3 del comienzo de la extensión [3], y se determina con:

$$r_3 = r_{m\acute{a}x} = r \frac{W}{a} \quad (8)$$

La duraci3n del intervalo de tiempo en el periodo de acci3n en que tiene lugar la deformaci3n elástica de la gota [2], puede calcularse por medio de la ecuaci3n:

$$\tau = \tau_3 - \tau_1 = \frac{Wr_{got}}{2(a^2)2} \quad (9)$$

El tiempo en que actúa el impulso ($\tau_3 - \tau_1$) en segundos es proporcional a la c_B y la dimensi3n de la gota.

La frecuencia de impactos de la gota contra la superficie del álabe viene determinada por la ecuaci3n [1]:

$$n_y = 0.1 \frac{O_{est\ per} z_{est} y \lambda \phi^2 (1 - \rho_{per})^{3/2} v}{b_{rot\ per} z_{rot} \sigma x^3 v_{spf\ per}^2} u^3 \quad (10)$$

donde O_{est} es el cuello del álabe estator en μm , z_{est} y z_{rot} es el número de álabes estatores y rotores, respectivamente; b_{rot} es la cuerda del álabe rotor en metros.

Aunque la velocidad con que se reduce la masa del álabe no permanece constante en el tiempo, se tiene la velocidad relativa media de la destrucci3n por erosi3n en m^3/s que es igual a la disminuci3n del volumen que sufre el material del álabe en una unidad de tiempo, con respecto al volumen inicial, siendo la destrucci3n del metal por fatiga, a consecuencia de la acci3n del choque de las gotas y de dependencia de tipo cuadrático entre la deformaci3n y la presi3n de impulso durante el choque de las gotas. Se determina como [1]:

$$\dot{m} = k(\Delta p)^2 n_y \quad (11)$$

donde k es la constante que determina el valor de la ecuaci3n, y está en funci3n con todas las propiedades del metal de los álabes o de la capa protectora en la superficie de estas últimas, siendo, por lo tanto, diferente para cada material, y depende también de la secci3n de la turbina que se esté tratando.

4.3. Características particulares

La turbina de vapor que sirve de estudio en este trabajo entrega una potencia de 300 MW y su secci3n de baja presi3n consta de cinco etapas, analizado un álabe rotor en el último paso. La turbina está operando en una planta termoeléctrica (CTE) con ciclo híbrido. Con valores reales de operaci3n, ideales y de diseño [6], se obtiene una gráfica de expansi3n

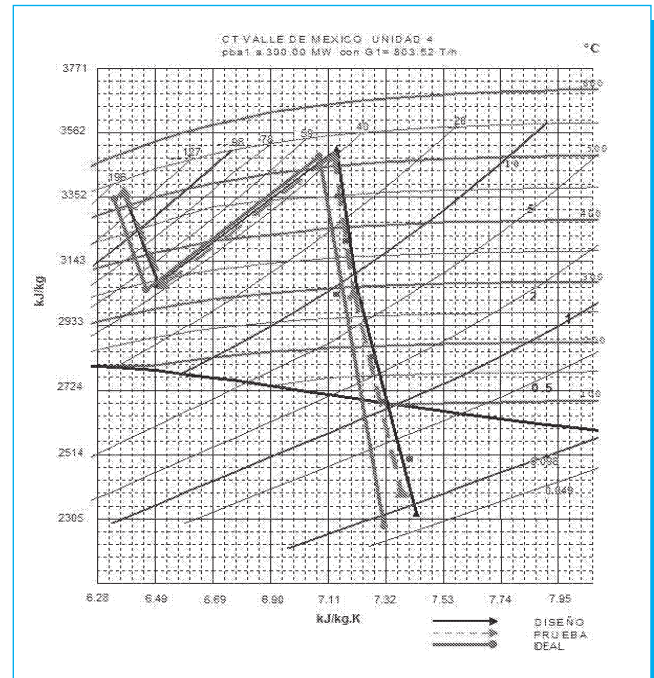


Fig. 3. Gráfica de expansi3n del vapor del ciclo que opera en la CTE [6].

de vapor sobre el diagrama de Mollier (fig. 3) para efectuar los cálculos de todas las ecuaciones presentadas antes. El perfil del álabe rotor a tratar es 1182SGAx. La temperatura es de 72° C y 32.7 kPa a la entrada del álabe rotor. δ_b se mide directamente del álabe afectado y se encuentra referido en la figura 1.

Los datos básicos (c_i , c_d , c_r , u , x , ρ , etc.) se hallan de las relaciones de velocidades a partir de las diferencias de entalpías en la última etapa, dependiendo si es expansi3n isoentrópica o tomando en cuenta pérdidas desde diseño. La humedad a la entrada del álabe rotor de 5.5% se encuentra en la informaci3n contenida en el diagrama. El peso original del álabe es de 5.294 kg y el peso actual es de 5.108 kg.

4.5 Resultados

Como se observa en la tabla 1, se muestran los datos numéricos arrojados por el cálculo ideal-real y diseño-real. Se observa que la velocidad relativa de impacto tiene muy poca diferencia entre los casos comparativos, y que a pesar de que no es muy grande, influirá en las diferentes etapas de las velocidades de contacto de la gota contra la superficie del álabe. El valor del radio crítico es de $r^* = 7.04 \times 10^{-4} \mu\text{m}$, a partir del cual, por lo tanto, comienza el crecimiento posterior de la fase.

Tabla 1. Resultados a partir del diagrama ideal-real y diseño-real.

VARIABLE	IDEAL-REAL/DISEÑO-REAL		
	$\delta_b = 30$ mm	$\delta_b = 23$ mm	$\delta_b = 18$ mm
BASE	MERID	PER	
w'_{desp} (m/s)	255 / 260	330 / 350	515 / 513
v	0.52 / 0.57	0.41 / 0.447	0.28 / 0.315
Δp (MPa)	95.46 / 97.33	123.55 / 131.03	192.8 / 92.06
r^* (μ m)	7.04 x 10 ⁻⁴		
r_{got} (μ m)	2.18 / 2.32	4.52 / 4.57	7.53 / 7.52
c_B (m/s) ⇒ r_p (μ m)	400 ⇒ 1.3 / 1.5	600 ⇒ 2.48 / 2.77	900 ⇒ 4.3 / 4.28
r_{max} (μ m)	1.4 / 1.61	3.98 / 4.44	10.3 / 10.3
τ (s)	0.18 / 0.21 x 10 ⁻⁸	0.53 / 0.59 x 10 ⁻⁸	1.38 / 1.37 x 10 ⁻⁸
y	0.055		
λ	0.1886		
n_y (got/s)	11.52 / 12.9 x 10 ³	8.57 / 9.72 x 10 ³	5.6 / 7.08 x 10 ³
\dot{m} (m ³ /s)	1.35 / 0.044 x 10 ⁻¹⁴	1.68 / 2.15 x 10 ⁻¹⁴	2.7 / 3.36 x 10 ⁻¹⁴
Δm (kg)	0.038 / 0.044	0.047 / 0.060	0.07 / 0.09

Las velocidades de deslizamiento v se encuentran a valores muy cercanos para los distintos casos, de acuerdo a la tabla 1, y el que disminuya el valor de v significa que la velocidad de la fase líquida es menor, ya que las gotas son más grandes y la interacción mecánica genera fricción, ocasionando la disminución en la velocidad. Se observa entonces que la fase líquida aumenta de la base a la punta del álabe.

Para las velocidades considerables de impacto, la presión de impulso ΔP de la gota puede superar el límite de fluencia del metal y producir en la superficie una deformación residual. Sin embargo, se ha determinado [1] experimentalmente que incluso a menores velocidades (300 m/s) de impacto tiene lugar el desgaste por erosión debido a la rotura por fatiga de las capas superficiales por la acción de los choques múltiples de las gotas.

Bajo acción de los golpes asestados, en la capa superficial tiene lugar una acumulación de deterioros que se transforman en grietas de fatiga, los cuales sirven de concentradores de tensiones y conducen posteriormente a la destrucción de zonas aisladas y al deterioro del metal de los álabes. Esta presión de impulso aumenta poco más del doble de la base a la punta, como se puede observar en la tabla 1, y a pesar de haber una disminución en el número de choques por segundo n_y , estos choques son más fuertes ya que las gotas aumentan en dimensión, hasta casi 3.5 veces. La frecuencia de impactos dependerá, además de las variables físicas y de diseño, de la calidad del vapor en la etapa, siendo la humedad de la última etapa de aproximadamente 5%, provocando una disminución en el rendimiento de la turbomáquina. Falta indicar que la presión de impulso puede depender además de una serie de factores adicionales, como la elasticidad del metal, la forma de la gota, la superficie del metal, etcétera.

Dependiendo de las condiciones de flujo y el tipo de diseño, será el tamaño de las gotas y el coeficiente de deslizamiento que determinarán los parámetros que influyen en la erosión de tipo mecánico, y dando entrada a la investigación de la prevención de la erosión de los álabes en el cuerpo de baja presión o, por lo menos, para controlarla, ya que para el campo de la investigación y experimentación es necesario tener un mayor conocimiento del papel que juegan las variables a nivel micro, así como macroscópicas, que causan el origen de la humedad.

La humedad macrodispersa nos indica que λ va en aumento, ya que la presión disminuye, según la ecuación (2), por lo tanto su presencia peligrosa va en aumento, como ya se mencionó anteriormente.

La masa del álabe que disminuye según el peso obtenido en laboratorio es 0.186 kg, y podemos ver que para el caso ideal-real la pérdida de masa $\Delta m_{i-r} = 0.162$ kg, tomado de la expansión isoentrópica y para el caso diseño-real $\Delta m_{d-r} = 0.198$ kg, debido a que existe una menor diferencia entálpica, habiendo un mayor acercamiento con las ecuaciones para el caso diseño-real.

A partir de los valores de la tabla 1 se pueden evaluar otros parámetros [1] que describen el fenómeno de la erosión, como son: el número de Reynolds Re para las fases:

$$Re_{got} = \frac{d_{got} (c'' - c')}{v_{spf} \mu_{cin}} \quad (12)$$

donde μ_{cin} es la viscosidad cinemática del flujo a la temperatura de la etapa, y Re para el flujo currentilíneo:

$$Re_{flujo} = \frac{c_r d_{rot}}{v_{spf} \mu_{cin}} \quad (13)$$

El número de Mach, M :

$$M = \frac{w}{a'} \quad (14)$$

donde w es la velocidad del flujo. La fuerza resultante, en N , de interacción entre las fases la fuerza de interacción mecánica de las fases R por frotamiento de las fuerzas viscosas:

$$R = 6\pi\mu_{cin} r(c'' - c') \quad (15)$$

El tiempo de relajación de las fases τ_{relaj} (tiempo que caracteriza la igualación de las velocidades de las fases, por lo tanto, cuanto menor sean las dimensiones de las gotas, tanto más rápidamente se igualarán las velocidades de las fases c'' y c'):

$$\tau_{relaj} = \frac{2r^2\rho'}{9\mu_{cin}} \quad (16)$$

5. Conclusión

El estudio realizado en este trabajo no puede usarse unívocamente para calcular las etapas de las turbinas, puesto que la influencia de la humedad sobre el rendimiento y el grado de reacción dependen también de muchos otros parámetros geométricos y de régimen: de la configuración de los álabes, de los huelgos, de la relación entre las áreas de las coronas de álabes, de la etapa a tratar, etcétera.

Los cálculos presentados dan una aproximación del daño que puede causar la humedad a los álabes, en especial los de la última etapa, donde el grado de humedad es mayor. Se debe contar con procedimientos tecnológicos eficientes para evitar los daños no sólo en los álabes sino en toda la turbina, evitando así el mayor número de paros posibles durante el año y no incrementando los gastos en mantenimientos y pérdidas económicas generadas por ello.

Por otro lado, dependiendo de las condiciones de flujo y el tipo de diseño, será el tamaño de las gotas y el coeficiente de deslizamiento que determinarán los parámetros que influyen en la erosión de tipo mecánico, dando entrada a la investigación de la prevención de la erosión de los álabes en el cuerpo de baja presión o, por lo menos, para controlarla, ya que para el campo de la investigación y experimentación es necesario tener un mayor conocimiento del papel que juegan las variables a nivel micro, así como macroscópicas, que causan el origen de la humedad.

Nomenclatura

a' la velocidad del sonido en el líquido;
 $b_{rot.per}$ cuerda en el perfil del álabe rotor.

c_B	velocidad de los puntos en la mancha de contacto;
c'_{desp}	velocidad absoluta de la gota por desprendimiento;
c'	velocidad de la fase líquida.
c''	velocidad de la fase vapor.
d	diámetro medio de la gota
k_{aer}	coeficiente que caracteriza el perfeccionamiento aerodinámico de la parte fija.
L	calor latente de las transiciones de fase;
M	número de Mach;
m	velocidad relativa media de la destrucción por erosión;
n_y	frecuencia de impacto de las gotas;
$O_{est.per}$	cuello del álabe estator;
r	radio de corriente;
R	fuerza resultante de impacto;
Re_{flujo}	número de Reynolds para el flujo currentilíneo;
r_{got}	radio medio de las gotas;
Re_{got}	número de Reynolds para las fases;
$r_{máx}$	radio máximo de la mancha de contacto;
r^{*}	radio del germen crítico;
T	temperatura verdadera.
T_s	temperatura local de saturación;
v	coeficiente de deslizamiento del flujo bifásico;
v_{spf}	volumen específico;
V_{got}	volumen ocupado por las gotas de humedad con radio medio r_{got} ;
w	velocidad de impacto de la gota contra la superficie;
We	número de Weber;
w'_{pel}	velocidad relativa de las gotas provenientes de la película de humedad del álabe estator;
x	calidad del vapor;
$x_{fic.per}$	relación de las velocidades.
y	humedad;
z_{hum}	número de la etapa.
$z_{p.e.}$	número de álabes estatores;
$z_{p.r.}$	número de los álabes receptores.
z_0	complejo que depende de la temperatura T_s ;
z_1	complejo que depende de la temperatura T_s ;
α'_{desp}	ángulo de impacto de la gota por desprendimiento;
Δp	golpe de ariete de Zhukovski;
ΔT	temperatura de sobreenfriamiento;
δ_{ax}^{per}	juego axial entre los álabes rotores y estatores.
φ	coeficiente de velocidad.

λ	humedad macrodispersa;
μ_{cin}	viscosidad cinemática;
ρ_{per}	grado de reacción en la periferia;
ρ_{liq}	densidad de la fase líquida;
σ	coeficiente de tensión superficial;
τ_{relaj}	tiempo de relajación de las fases.

6. Referencias

- [1] B. M. Troyanovski, G. A. Filippov y A. E. Bulkin, *Turbinas de Vapor y de Gas de las Centrales Nucleoeléctricas*, Editorial Mir Moscú., 1987.
- [2] A.V. Schegliáiev, *Turbinas de Vapor. La Teoría del Proceso Térmico y las Construcciones de Turbinas*. Parte I, Editorial Mir Moscú. 1985.
- [3] L. Brito, *Repotenciación de la Central Termoeléctrica Valle de México*, Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, México, D.F., Octubre 2002.
- [4] Heinz P. Bloch, *Guía Práctica para la Tecnología de las Turbinas de Vapor*, Mc Graw Hill, 1996.
- [5] N. V. Averkina, E. P. Dolgoplosk, Yu. Ya. Kachuriner, and V. G. Orlik, "The Specifics of Erosion Wear of the Working Blades in the Last Stages of Turbines with a Capacity of 300 MW and Higher," TsKTI (Central Boiler and Turbine Institute). *Thermal Engineering*, Vol. 48, No. 11, 2001.
- [6] "Informe Final de Pruebas de Evaluación," Subdirección Técnica, Departamento de Evaluaciones de Procesos, Oficina de Sistemas Térmicos, Octubre 2003.

MAGNO CONGRESO INTERNACIONAL DE COMPUTACIÓN CIC IPN 2007

del 6 al 8 de noviembre

<http://magno-congreso.cic.ipn.mx>
magno@cic.ipn.mx , relpub@cic.ipn.mx