

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de la Energía

Estudio sobre Daños en Turbinas de Vapor: Causas, Mecanismos y Prevención

Autor: Antonio Martin Muñoz

Tutor: Prof. Dr. D. Antonio Muñoz Blanco

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



iii
Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de la Energía

Estudio sobre Daños en Turbinas de Vapor: Causas, Mecanismos y Prevencion

Autor:
Antonio Martin Muñoz

Tutor:
Antonio Muñoz Blanco
Catedrático de Universidad

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2021

Trabajo Fin de Grado: Estudio sobre Daños en Turbinas de Vapor: Causas, Mecanismos y Prevencion

Autor: Antonio Martin Muñoz

Tutor: Prof. Dr. D. Antonio Muñoz Blanco

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Agradecer la oportunidad de realizar este interesante proyecto a mi tutor, Antonio Muñoz, por su motivación y dedicación como profesor, su ayuda, comprensión y paciencia, además de todos los conocimientos que ha compartido conmigo.

Asimismo, a todos mis profesores, porque gracias a ellos, en estos años, me han ayudado a mejorar tanto académica como personalmente, despertando en mí aún más interés por la ingeniería.

Antonio Martín Muñoz
ETSI Universidad de Sevilla
Sevilla, 2021

Resumen

En este documento se van a tratar consideraciones importantes sobre el mantenimiento de las turbinas de vapor, enfocándose en el paso del vapor de éstas. Asimismo, se van a analizar las causas y mecanismos de daño que ocurren con desafortunadas consecuencias (en algunas unidades, con monótona regularidad) dentro de la trayectoria del vapor de la turbina.

Estas diversas formas de degradación pueden desembocar en fallo catastrófico para la unidad, siendo, a menudo, el resultado de una serie de factores relacionados con condiciones que podrían ser mitigables o evitables por el personal de operación y mantenimiento.

Los mecanismos de daño como la fatiga de ciclo alto, la fluencia, la erosión por partículas sólidas, la corrosión o los daños derivados por la humedad se comentarán con bastante detenimiento por su gran interés para cualquier ingeniero de planta.

Abstract

This document will discuss important considerations on the maintenance of steam turbines, focusing on the turbine steam path. It will also analyze the causes and mechanisms of damage deterioration that occur with unfortunate consequences (on some units, with extremely monotonous) within the turbine steam path.

These various forms of damage degradation can result in catastrophic failure of the unit and are usually the result of a number of factors related to conditions that could be mitigated or avoidable by operating and maintenance personnel.

Damage mechanisms such as high cycle fatigue, creep, solid particle erosion, corrosion, or moisture damage will be discussed at great length because of their great interest to any plant engineer.

Índice

Agradecimientos	IX
Resumen	XI
Abstract	XIII
Índice	1
Indice de Tablas	4
Indice de Figuras	5
1 Introducción	9
2 Consideraciones sobre la Estrategia de Mantenimiento del Paso de Vapor de una Turbina	10
2.1 <i>Consideraciones Fundamentales.</i>	10
2.2 <i>Parada de la Turbina.</i>	12
2.2.1 Mantenimiento o parada planificada	12
2.2.2 Interrupción forzada	12
2.2.3 Prolongación de una parada	12
2.3 <i>Indicios que Denotan Deterioro o Daño</i>	12
2.3.1 Niveles de vibración.	13
2.3.2 Ruido.	13
2.3.3 Reducción en la producción de la unidad para una entrada de vapor dada.	14
2.3.4 Aumento del flujo de salida de la unidad para una apertura constante de la válvula.	14
2.3.5 Disminución de la eficiencia debido a caídas de entalpía.	15
2.3.6 Cambios en las presiones de extracción de vapor.	15
2.4 <i>Requerimientos para la fiabilidad del sistema</i>	15
2.5 <i>La Programación de Paradas</i>	16
2.6 <i>Los Intervalos Entre las Paradas de Mantenimiento</i>	16
2.6.1 Horas equivalentes de funcionamiento	17
2.7 <i>La Inspección / Parada de Mantenimiento</i>	18

2.8	<i>Las Opciones Correctivas Disponibles</i>	19
2.8.1	Al encontrar una disconformidad	19
2.9	<i>Distinción entre causas y mecanismos de fallo</i>	22
2.10	<i>Las causas de fallo</i>	23
2.10.1	Diseño deficiente o inadecuado.	23
2.10.2	Fabricación de baja calidad	25
2.10.3	Instalación de calidad deficiente	26
2.10.4	Prácticas operativas deficientes o incorrectas	27
2.10.5	Procedimientos de mantenimiento ineficaces	28
3	Mecanismos de Daños en el Paso del Vapor por deterioro en las propiedades de los materiales	30
3.1	<i>Fatiga de Ciclo Alto (“High-cycle fatigue”, HCF)</i>	30
3.1.1	El fenómeno de alto ciclo	32
3.1.2	Tensiones vibratorias de los álabes rotativos (Rotor)	34
3.1.3	Las propiedades de los materiales	42
3.2	<i>Fatiga de Ciclo Bajo (“Low-cycle fatigue”, LCF)</i>	45
3.2.1	Los transitorios térmicos	46
3.3	<i>Fluencia</i>	50
3.3.1	Deformación por fluencia	52
3.3.2	Fluencia en los componentes del paso del vapor	55
3.4	<i>Condiciones de funcionamiento transitorias.</i>	63
3.5	<i>Corrosión por fricción</i>	63
4	Mecanismos de Daños en el Paso del Vapor por Erosión por Partículas Sólidas (“Solid-particle erosion” SPE)	65
4.1	<i>La formación de escamas</i>	65
4.2	<i>Mecanismos de erosión</i>	66
4.2.1	La fila de álabes estacionarios (estatores)	66
4.2.2	La fila de álabes giratorios (rotores)	67
4.3	<i>Las pérdidas de material</i>	71
4.4	<i>Medidas de protección</i>	74
4.5	<i>Influencia de SPE en el rendimiento de los escalonamientos</i>	75
4.5.1	Efectos de cambio de área	75
4.5.2	Efectos en ángulos de descarga de vapor	75
4.5.3	Efectos en la presión local	75
5	Mecanismos de Daños en el Paso del Vapor por Efectos Corrosivos	76
5.1	<i>Fuentes que introducen corrosión</i>	76
5.1.1	Fuentes externas: se infiltran por fugas del sistema	76
5.1.2	Sistema interno: generado por sistemas de tratamiento de agua	76

5.2	<i>La composición de los depósitos</i>	80
5.3	<i>Modificando el ambiente corrosivo del vapor</i>	81
5.3.1	Cambios en las condiciones operativas del paso del vapor	82
5.3.2	Apagado de la unidad	85
5.4	<i>La eliminación de depósitos del paso del vapor</i>	85
5.5	<i>Métodos de limpieza del paso del vapor</i>	86
5.5.1	Limpieza con chorro del paso del vapor	86
5.5.2	Limpieza a mano los componentes del paso del vapor	88
5.5.3	Lavado con agua	88
5.6	<i>Patrones de deposición</i>	88
5.7	<i>Corrosión del paso del vapor</i>	92
5.7.1	Los recovecos (“Hideouts”)	93
5.8	<i>Tipos de mecanismos de corrosión</i>	94
5.8.1	Agrietamiento por corrosión bajo tensión (“Stress corrosion cracking”, SCC)	94
5.8.2	Corrosión por picadura	94
5.8.3	Corrosión por fatiga	95
6	Mecanismos de Daños debidos a la Humedad en el Paso del Vapor	96
6.1	<i>La formación del agua</i>	96
6.2	<i>Daños provocados por la humedad</i>	97
6.3	<i>Erosión por impacto de humedad</i>	98
6.3.1	Mecanismo de daño por impacto de humedad	98
6.3.2	Métodos de protección	101
6.3.3	Eliminación de humedad	102
6.3.4	El tiempo y la erosión	107
6.3.5	La severidad de la erosión	108
6.4	<i>Erosión del borde de estela</i>	109
6.4.1	Recirculación hacia la raíz	112
6.4.2	Espráis de agua en el escape. (Hood sprays)	113
6.4.3	Mecanismo de daño	113
6.5	<i>Erosión por estrangulamiento</i>	114
6.5.1	Localizaciones típicas de aberturas de fuga	117
6.6	<i>Erosión por lavado</i>	118
7	Conclusiones	120
	Referencias	121

INDICE DE TABLAS

Tabla 4-1. Fuerzas de excitación en el paso de vapor

40

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Los resultados de tres aperturas repercuten en cada parada	11
Figura 2-2. Indicadores de deterioro o daño en la unidad.	13
Figura 2-3. Daños provocados por partículas sólidas en las toberas	14
Figura 2-4. El "Proceso de Revisión Lógica" cuando se encuentra una condición disconforme	20
Figura 2-5. Las principales causas de fallo en el paso del vapor	23
Figura 2-6. Causa de Fallos derivadas del proceso de diseño.	24
Figura 2-7. Causa de Fallos derivadas del proceso de Fabricación	26
Figura 2-8. Causa de Fallos derivadas del proceso de Instalación	27
Figura 2-9. Causa de Fallos derivadas del proceso de Operación	28
Figura 2-10. Causa de Fallos derivadas del proceso de Mantenimiento.	29
Figura 3-1. Las estrías o marcas de playa en la paleta de una pala L-1	32
Figura 3-2 - Gráfica de una carga cíclica de " $2\sigma_a$ " aplicada a una carga constante de " σ_m ".	33
Figura 3-4. Esquema y gráfico de la variación de la fuerza del vapor "F" ejercida sobre el álabe estacionario	37
Figura 3-5. Un diagrama simplificado de las fuerzas del vapor para una revolución "A" de un álabe giratorio	38
Figura 3-6. Modificación de la representación simple de fuerzas de vapor	39
Figura 3-7. Los efectos de la entrada a un arco de admisión	40
Figura 3-8. El efecto de entrar a una banda muerta	40
Figura 3-9. Diagrama de Campbell	41
Figura 3-10. El diagrama de Campbell para un álabe	42
Figura 3-11. La tensión "S" frente al número de ciclos "N" hasta el fallo.	44
Figura 3-12. Una grieta por fatiga de bajo ciclo en una carcasa de alta presión.	45
Figura 3-13. Demanda de energía eléctrica peninsular de varias semanas completas diferentes.	47
Figura 3-14. Demanda de energía eléctrica peninsular de un día de enero.	47
Figura 3-15. Demanda de energía eléctrica peninsular de un día de julio.	48
Figura 3-16. Esquema con la disposición de las distintas válvulas.	49
Figura 3-17. El bloque del tambor de una etapa de alta presión que se ha deslizado	52
Figura 3-18. Fases de la deformación por fluencia hasta la rotura mecánica.	53
Figura 3-19. El efecto de la temperatura en las curvas características de deformación	54
Figura 3-20. Raíz del álabe de la etapa de control que ha sufrido daños por fluencia.	55
Figura 3-21. Deformación por fluencia en una raíz	56
Figura 3-22. Acoplamiento de la raíz con error de manufactura	57

Figura 3-23. Deflexión del diafragma	58
Figure 3-24. Las etapas de desviación de un diafragma	59
Figura 3-25. Álabes de rotor de longitud axial extendida	60
Figura 3-26. El efecto de los álabes extendidos axialmente en la distribución del flujo	60
Figura 3-27. Deformación de fluencia radial del diafragma.	61
Figura 3-28. Hueco en la junta horizontal del diafragma	62
Figura 3-29. Superficie interior de una carcasa	63
Figura 4-1. Vástago de una válvula de corte que ha sido sometido a la erosión	66
Figura 4-2. Flujo de vapor con partículas de escama a su paso por los álabes de estator,	67
Figura 4-3. Los triángulos de velocidad para el vapor y la escama	68
Figura 4-4. Influencia del flujo radial en las partículas de escama	70
Figura. 4-5. El rebote de las escamas de la superficie interior de la carcasa	70
Figura. 4-6. El rebote de las escamas entre los elementos de álabes estacionarios y giratorios	71
Figura 4-7. Erosión por partículas sólidas	71
Figura 4-8. Material desprendido del borde de ataque de una fila de álabes estacionarios	72
Figura 4-9. Material eliminado del borde de ataque y superficies	72
Figura 4-10. Pérdida de material en el borde de estela de una hilera de álabes giratorios	73
Figura 4-11. El efecto del "caving" en la superficie de presión de un álabe giratorio.	73
Figura 4-12. Escamas que fluyen con el vapor hacia el primer arco de admisión	75
Figura 5-1. Daños por corrosión provocados en elementos de álabe nuevos	78
Figura 5-2- Los depósitos en una hilera de álabes estacionarios de una unidad geotérmica.	79
Figura 5-3. El resultado de una entrada de una cantidad considerable de agua de mar en el condensador, y la deposición de sal (NaCl) en una hilera de álabes giratorios.	80
Figura 5-4. Efecto en la expansión en la sección de baja presión de un cambio de carga de la unidad.	82
Figura 5-5. Se muestra el efecto de la reducción de la presión de vapor de admisión manteniendo el flujo del arco del escalonamiento de control completo.	83
Figura 5-6. El efecto en las condiciones del vapor en el escape de no mantener la temperatura del vapor de recalentamiento.	84
Figura 5-7. El efecto de la reducción de la eficiencia en la sección "E-D	85
Figura 5-8. Daños en los bordes de estela de álabes	87
Figura 5-9. Una álabe de reacción de alta presión con depósitos en la cara de succión.	89
Figura 5-10. Álabes de acción de alta presión con depósitos en la cara de succión.	90
Figura 5-11. Depósitos masivos en el borde de ataque de álabes de una fila estacionaria.	91
Figura 5-12. Depósitos masivos en la cara de presión de una fila de álabes estacionarios.	91
Figura 5-13. Recovecos producidos por el proceso de remachado y fijación de la coverband de la superficie superior del álabe.	93
Figura 5-14. Alambre antivibración, mostrando posibles recovecos.	93
Figura 5-15. Picaduras corrosivas en el sellado del extremo del eje de un rotor.	95

Figura 5-16. Una grieta en un álabe que se inicia en el orificio del alambre antivibración.	95
Figura 6-1. Erosión por impacto de la humedad en el borde de ataque de álabes.	98
Figura 6-2. Flujo de humedad a lo largo de la zona de descarga y acumulación en la cara de succión de un álabe estacionario.	99
Figura 6-3. Los triángulos de velocidad para el vapor "s" y el agua "w" en la salida de un escalonamiento de estator de etapa húmeda.	99
Figura 6-4. Distribución del tamaño de las gotas de agua (a) y sus triángulos de velocidades (b).	100
Figura 6-5. Muestra el ángulo de sombra " ψ " y el grado de penetración en la fila de álabes giratorios.	100
Fogura 6-6. La tensión producida en una superficie como consecuencia de un impacto.	101
Figura 6-7. Cinturón colector interno de agua.	103
Figura 6-8. Cinturón colector de agua, utilizado con álabes de borde de ataque ranurados.	104
Figura 6-9. Los efectos de la separación de la humedad en la sección de alta presión de una unidad nuclear.	105
Figura 6-10. Varias formas de protector (para el borde de ataque de álabes de rotor) contra erosión por impacto de humedad.	106
Figura 6-11. La relación entre la penetración de la erosión y el tiempo.	107
Figura 6-12. El factor " ϵ " para pronosticar la erosión a lo largo de tiempo.	108
Figura 6-13. Niveles de penetración debido al impacto de la humedad.	109
Figura 6-14. Erosión del borde de estela en la superficie de succión de un álabe de rotor	110
Figura 6-15. Erosión del borde de estela en la cara de succión con raspados profundos.	111
Figura 6-16. Cara de presión del álabe que se muestra en la Figura 6-15.	111
Figura 6-17. Líneas de corriente del vapor cuando la sección de baja presión fluye "llena".	112
Figura 6-18. Patrón de flujo a cargas parciales.	113
Figura 6-19. Agua pulverizada para refrigeración en la campana de escape.	114
Figura 6-20. Diagrama P – h en el que se muestra el efecto del estrangulamiento	115
Figura 6-21. Estrangulamiento de la mezcla bifásica de "A" a "B" a entalpía constante.	116
Figura 6-22. El fenómeno del estrangulamiento y su efecto en la temperatura final del vapor.	117
Figura 6-24. Erosión por estrangulamiento en la junta horizontal de un diafragma	118
Figura 6-25. Erosión por estrangulamiento en la superficie de los sellos de vapor.	118
Figura 6-26. Marcas de flujo de agua en una fila de álabes giratorios.	119

1 INTRODUCCIÓN

Las turbinas de vapor representan una tecnología compleja. Son comúnmente diseñadas para operar algunos cientos de miles de horas mientras están sometidas a un ambiente severo y a una variedad de fenómenos operativos capaces de degradar su estado. Se requiere que estas unidades funcionen continuamente de forma fiable, segura y rentable. En tales circunstancias, estas unidades no pueden mantener indefinidamente el nivel de rendimiento especificado en el diseño original. Todas las unidades se deterioran con el tiempo. Los propietarios lo prevén y los diseñadores normalmente dejan un margen adecuado, sabiendo que un cierto nivel de deterioro es tolerable.

La tecnología de las turbinas de vapor, aunque es una tecnología con un grado de madurez elevado, sigue evolucionando. Cada vez se dispone de herramientas y técnicas de diagnóstico más precisas y que responden en menor tiempo para ayudar a predecir cuándo una unidad se ha deteriorado hasta el punto de requerir una acción correctiva. Del mismo modo, se dispone de herramientas para ayudar al operador a analizar los problemas y determinar la acción correctiva eficaz más adecuada para la causa y mecanismo de deterioro. La mejor comprensión del estado de la unidad y de los mecanismos de deterioro que se ha logrado, junto con los avances en los materiales, permitirá que las unidades se mantengan de una manera tal que sea posible minimizar los imprevistos y los costes de mantenimiento.

Por otro lado, el desempeño satisfactorio de una turbina de vapor está considerablemente influenciado por la forma y la experiencia con la que se mantiene, y los patrones de carga que sigue, por lo tanto, es de vital importancia seguir las pautas adecuadas a la hora de operar y realizar el mantenimiento de la unidad.

Por tanto, en el presente documento se examinarán los mecanismos de deterioro y fallo que se producen en el paso del vapor de las turbinas, así como las consideraciones más elementales que se deben tener en cuenta a la hora de mantener una unidad en buen estado; todo ello se hará acompañando el texto con fotografías y gráficos a los que hay que prestar especial atención para obtener un aprovechamiento máximo de lo que aquí se versa.

2 CONSIDERACIONES SOBRE LA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO DEL PASO DE VAPOR DE UNA TURBINA

2.1 Consideraciones Fundamentales.

Para operar las unidades de turbina de la manera más rentable, cada organización operadora debe definir una política específica que rijan el mantenimiento de las unidades T-G (turbina - generador). Normalmente, es ineficiente y muy costoso hacer funcionar las unidades hasta que se ven obligadas a parar el servicio y a realizar el mantenimiento con carácter de "emergencia". Una política eficaz tiene que reconocer que debe existir cierta capacidad de reserva en el sistema, y que debe poder comprarse o intercambiarse energía entre sistemas vecinos e interconectados para que las unidades puedan pararse durante periodos suficientes que permitan abrirlas, examinarlas y, en caso necesario, tomar medidas correctivas.

Una estrategia de mantenimiento eficaz para cualquier conjunto de unidades de turbinas de vapor que sean propiedad y estén operadas por una sola autoridad conlleva ciertos requisitos:

- Para cualquier condición evaluada, la estrategia y las acciones correctivas seleccionadas deben ser rentables.
- Las acciones correctivas seleccionadas (si se requieren acciones) deben poder llevarse a cabo en un plazo razonable.
- Las acciones correctivas seleccionadas no deben crear una situación que comprometa, de alguna manera, la disponibilidad de la unidad
- Las acciones correctivas seleccionadas no deben modificar las características físicas de los componentes del paso del vapor hasta el punto de causar un deterioro de la eficiencia de la unidad si esta pérdida de eficiencia va más allá de lo que se determine como aceptable
- La acción seleccionada debe poder ser realizada por el personal de mantenimiento disponible dentro de la planta o por trabajadores externos especializados. Todas las herramientas especializadas necesarias deben estar disponibles cuando sean necesarias.

A la hora de realizar una parada, la visión de tres paradas distintas influye (o son influidas por) el alcance del trabajo y las acciones correctivas en cada parada de mantenimiento, como se muestra en la Figura 2.1.

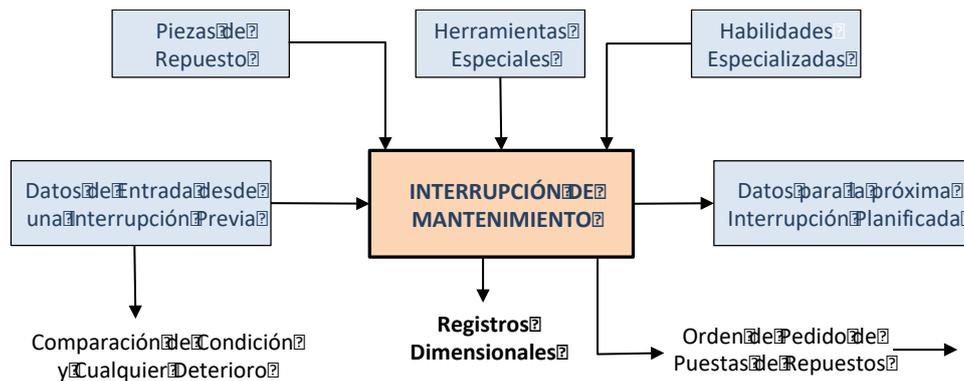


Figura 2-1. Los resultados de tres aperturas repercuten en cada parada, la anterior en cuanto a la preparación para el presente, la presente para las acciones correctivas identificadas para el futuro, y también para desarrollar planes y alcances de trabajo para la reparación o reacondicionamiento en la siguiente.

Es decir, hay que tener en cuenta la parada anterior, la que se está planeando y la siguiente prevista (presumiblemente dentro de cuatro o más años). Por lo tanto, los principales objetivos de la parada prevista y la correspondiente inspección pueden ser considerados:

- Llevar a cabo el mantenimiento normal (limpieza y sustitución de las piezas consumibles de la unidad, como las cintas de sellado (seal strips), que mejoran o restauran el nivel de eficiencia)
- Determinar el estado de la unidad y la posible necesidad de medidas correctivas en una futura parada.
- Tomar medidas correctivas sobre las condiciones observadas en la parada anterior. Estas condiciones anteriores pueden haberse considerado aceptables en ese momento y la unidad ha vuelto al servicio con una recomendación de acción pospuesta.
- Registrar las mediciones y otras condiciones que se estén controlando para determinar la tasa de deterioro de cualquier condición que pudiera requerir en algún momento futuro una acción correctiva.
- Adoptar medidas correctivas de emergencia en relación con las condiciones encontradas desde la última inspección y, además, las descubiertas al abrir la unidad. Se trata de condiciones que podrían impedir que la unidad vuelva a funcionar con una alta probabilidad de hacerlo a un nivel aceptable.

Si las condiciones descubiertas pueden impedir que la unidad vuelva a funcionar, hay tres posibles vías de actuación disponibles. Cada una debe ser evaluada por separado:

- Sustituir las piezas dañadas o deterioradas. Para ello, las piezas de repuesto deben estar disponibles en el inventario o previstas para una entrega a tiempo por parte de determinado proveedor. El propietario debe evaluar el coste de prolongar la parada debido a las piezas difíciles de conseguir.
- Reacondicionar los componentes según sea necesario. Esta acción sólo es posible en la medida en que los componentes puedan ser renovados. Hay circunstancias que permitirían reparaciones permanentes y otras que permitirían un reacondicionamiento suficiente para que la unidad vuelva a estar en servicio hasta la siguiente parada, cuando se podrían instalar las piezas de repuesto.
- Retirar las piezas afectadas. En ocasiones, esto puede permitir que la unidad funcione en un estado deficiente. Sin embargo, incluso para hacer esto suele ser necesario instalar componentes como discos reductores de presión (pressure reducing plates) para corregir la distribución de la presión a lo largo de la unidad y que se ajuste más a las condiciones de diseño, lo que permitirá que la unidad funcione sin un deterioro inaceptable adicional.

De estas tres posibilidades, la acción que elija el propietario depende de las consideraciones económicas de la situación global. Esto requiere una evaluación cuidadosa de las opciones disponibles dentro de los puntos de acción enumerados anteriormente. Esta evaluación debe determinar la solución más económica, compatible con el retorno de la unidad a una condición mecánica satisfactoria.

2.2 Parada de la Turbina.

2.2.1 Mantenimiento o parada planificada

La parada programada forma parte del plan establecido para mantener las turbinas en un estado aceptable, y puede requerir que se disponga de herramientas y habilidades específicas para llevar a cabo el trabajo requerido. Estas paradas también pueden ser una oportunidad para reemplazar piezas dañadas o muy desgastadas y señaladas como dañadas o deterioradas en una parada anterior. Las piezas de repuesto (no disponibles en stock) que fueran necesarias se habrían pedido especialmente para esta parada, y su realización podría depender del tiempo de su entrega.

2.2.2 Interrupción forzada

Se trata de una parada no planificada que se produce como consecuencia de algún fallo o daño inesperado en la unidad de turbina de vapor. El daño puede dar lugar a una situación inaceptable, como altas vibraciones, ruido o incluso una desconexión de la unidad. Si se produce un incidente de este tipo, los operadores deben decidir si continúan en el estado existente o apagan la unidad e investigan el incidente. En el caso de una desconexión de la unidad, los operadores pueden intentar volver a sincronizar la unidad y seguir funcionando.

Apagar la unidad e investigar puede ser una opción cara en términos de costes de material y mano de obra asociados a la apertura de la unidad, así como la capacidad de generación perdida durante el tiempo que la unidad no está produciendo energía. Sin embargo, no apagar la unidad puede ser aún más caro si dicha acción, seguir funcionando, desatiende un fallo que está en las primeras etapas de desarrollo, y que ha causado la interrupción puntual del sistema en primer lugar. Una anomalía no corregida podría generar daños más graves en otros componentes de la unidad y, en última instancia, podría causar grandes daños u obligar a desechar componentes importantes. La seguridad debe tenerse en cuenta en cualquier decisión que determine no parar una unidad. Puede existir una situación que indique que puede producirse un fallo importante y posiblemente catastrófico.

2.2.3 Prolongación de una parada

Una parada que es prolongada es el resultado de encontrar una situación durante una parada planificada que hace que se prolongue el plazo previsto para la inspección, limpieza y reacondicionamiento de la unidad. Normalmente, esto ocurre cuando se encuentran daños o deterioros que requieren el uso de herramientas o habilidades no habituales (o considerablemente específicas) para la evaluación, o no se dispone de las piezas de repuesto necesarias.

2.3 Indicios que Denotan Deterioro o Daño

Fuera del período normal durante el cual una unidad vuelve a estar en servicio y se espera que funcione a un nivel adecuado de rendimiento, hay ciertos indicios que denotan la necesidad de sopesar la situación, investigarla y posiblemente apagar la unidad para una interrupción no programada.

Los procedimientos operativos de las turbinas de vapor incluyen la necesidad de controlar las características de ciertos indicadores operativos que, cuando varían fuera de las pautas previstas, pueden indicar la necesidad de una acción correctiva de emergencia. Los indicadores operativos más

comunes se muestran en la Figura 2-2.

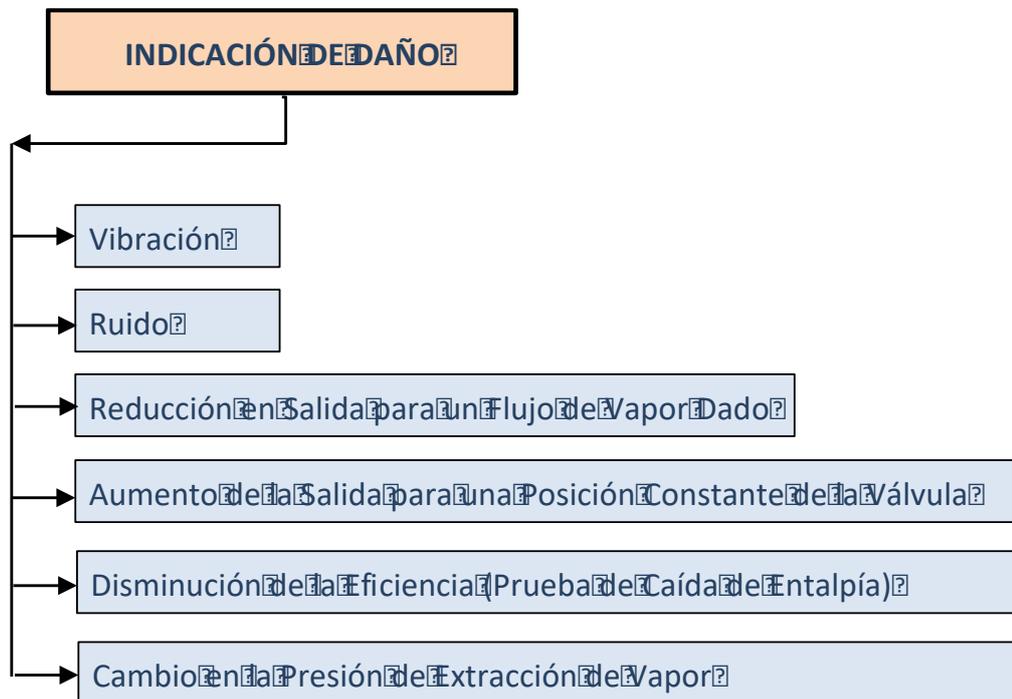


Figura 2-2. Indicadores de deterioro o daño en la unidad.

Tal y como se observa en la imagen, se comentan a continuación estos indicadores.

2.3.1 Niveles de vibración.

Un aumento de los niveles de vibración de los rotores de la unidad es una indicación de que existen problemas. Hay varias causas posibles para este aumento de la amplitud. Entre las más comunes están:

- Un cambio en la alineación de la unidad. Esta pérdida de alineación puede ser causada por varios fenómenos, y las posibles causas tendrán que ser investigadas por separado. Un desplazamiento vertical u horizontal de la posición de los cojinetes puede provocar esta situación. Si esto ha ocurrido, será necesario realinear el eje. El alcance de la apertura de la unidad y el desmontaje de los rotores y otros componentes dependerá de su configuración y del nivel de accesibilidad a los cojinetes.
- La rotura mecánica de un componente que haya alterado el equilibrio dinámico de la turbina. Este fallo mecánico no provocará necesariamente un desequilibrio. Los álabes más cortos, por ejemplo, pueden llegar a desprenderse sin afectar significativamente al equilibrio y, por tanto, al nivel de vibración.
- Fricciones severas que han causado una flexión del eje. Si se ha producido un fuerte roce causado por alguna condición transitoria o de otro tipo, es muy posible que el eje se doble hasta el punto de alterar el equilibrio. Si esto ocurre, es necesario abrir la unidad, retirar el rotor afectado y llevar a cabo una restauración importante.
- Falta de aceite en los rodamientos (axiales o de empuje). Si se produce esta situación, podría causar daños importantes y posiblemente irreparables. Esta situación debe ser rectificadas lo antes posible

2.3.2 Ruido.

Una de las indicaciones más significativas y útiles de daños o fallos inminentes es el ruido que produce la unidad. Debido a las altas velocidades de rotación, incluso los roces más ligeros pueden ser indicativos de potenciales averías. A menudo estos ruidos aparecen y luego desaparecen, por lo

que se debe tener en cuenta si los ruidos están asociados a condiciones transitorias, por ejemplo, cambios en las condiciones de vapor y/o en la carga. En cualquier caso, se deberá:

- Si es posible, determinar si el ruido es sensible a las condiciones transitorias, la velocidad y la temperatura.
- Identificar la ubicación del roce con la mayor precisión posible.
- Si el ruido es continuo, intentar determinar si tiene un nivel y una frecuencia constantes. Se trata de un juicio subjetivo, pero la observación cuidadosa puede ayudar.

Cuando se abra la unidad, se deberá examinar la región en la que parecía centrarse el ruido y se buscarán daños por rozamiento en forma de surcos en el material, bandas de cobertura (**coverbands**) levantadas, y cambios en la dureza del material. A menudo hay un cambio de dureza asociado a los roces que podría desencadenar en futuras fallas; esto es así debido a que la estructura del material en el acero habrá cambiado, haciéndolo más frágil.

2.3.3 Reducción en la producción de la unidad para una entrada de vapor dada.

Si se ha producido un cambio brusco en la producción para una entrada de vapor determinada, esto puede ser indicativo de un daño mecánico en el alabeado de la turbina, ya sea por un bloqueo en una de las primeras etapas del paso del vapor, o por algunos elementos rotos que están reduciendo la eficiencia de la conversión de energía. A menudo, la región en la que se producen estos daños puede identificarse con medios de diagnóstico y es posible determinar la necesidad de apagar y corregir.

Es necesario diferenciar entre una reducción gradual del rendimiento y el desgaste gradual de las bandas de sellado (seal strips). Los cambios graduales son difíciles de identificar, ya que los daños suelen producirse durante los transitorios y el cambio puede no notarse cuando se restablecen las mismas condiciones. El personal de operación, especialmente el que dispone de capacidades de supervisión en línea, es el que mejor realiza este tipo de supervisión.

2.3.4 Aumento del flujo de salida de la unidad para una apertura constante de la válvula.

Esta situación se produce normalmente debido a un daño en el escalonamiento de regulación (un escalonamiento Curtis por ejemplo). Esto provoca un cambio en el área de paso y en la presión a lo largo de la etapa en todo el recorrido del vapor. Las toberas de dicho escalonamiento habrán sufrido daños y, por tanto, admiten más vapor debido a un aumento del área de flujo (esto es lo que le ocurre a la etapa de la Figura 2-3). Si este aumento es gradual, se debe a algún tipo de daño erosivo que requiere una renovación en la próxima parada disponible. Sin embargo, si el cambio es un "cambio estructural del paso", entonces el daño es repentino y debe ser examinado inmediatamente.



Figura 2-3. Daños provocados por partículas sólidas en las toberas de una etapa de control de turbina de vapor.

2.3.5 Disminución de la eficiencia debido a caídas de entalpía.

Mediante la aplicación de test de caída de entalpía (enthalpy drop test, EDT) se puede detectar un cambio significativo en la eficiencia de los escalonamientos de la unidad, esto normalmente indica alguna condición que causa una interrupción del flujo y la eficiencia de conversión de energía cae. Los fallos mecánicos o la deformación de los álabes suelen causar el cambio de eficiencia y deben considerarse un indicador de problemas existentes.

De nuevo, sólo los cambios del paso son significativos. Dado que los EDTs suelen llevarse a cabo sólo de forma anual o semestral, puede pasar mucho tiempo antes de que se determine la existencia de estas caídas de entalpía no deseadas. La instrumentación de la planta utilizada para monitorear la eficiencia de la línea no suele ser lo suficientemente sensible como para notar los cambios con la suficiente fiabilidad. Se necesitarían otras formas de análisis para confirmar o negar la posibilidad de daños.

2.3.6 Cambios en las presiones de extracción de vapor.

Los mecanismos de daño en los álabes de la turbina provocarán una redistribución de la presión del vapor a lo largo del recorrido de este. Estos cambios pueden ser leves, pero si la unidad está en condiciones de funcionamiento estables y conocidas, se puede determinar que existen.

Estos indicios que denotan deterioro mencionados anteriormente no representan una lista exhaustiva, y en muchas unidades, los operadores y el personal de mantenimiento se familiarizan lo suficiente con las unidades individuales de su sistema como para conocer las peculiaridades de cada unidad. En estas condiciones, el personal puede a menudo actuar de forma anticipada y reconocer los cambios característicos de las unidades. Esta capacidad representa una valiosa habilidad para los propietarios, y sólo se obtiene a partir de una considerable experiencia con unidades concretas.

2.4 Requerimientos para la fiabilidad del sistema

Las interrupciones forzadas obligan a cubrir las necesidades del sistema obteniendo energía de unidades alternativas. Esta energía alternativa puede proceder de varias fuentes. Entre ellas se encuentran:

- Unidades en reserva giratoria o en espera. Estas unidades pueden estar en la instalación o cerca de ella, pero el hecho de que estén en reserva giratoria indica que su funcionamiento es menos rentable que el de las unidades base del servicio
- Unidades más antiguas y menos eficientes en el sistema. Esto puede causar un retraso, pero permitirá cumplir con los requisitos del sistema.
- Retrasar cualquier interrupción planificada o programada de otras unidades del sistema
- Adquirir energía de otra empresa conectada al sistema. Esto puede ser caro, pero puede ser necesario en ciertas circunstancias para cumplir con los requisitos. Las instalaciones industriales suelen estar conectadas a las empresas de servicios públicos locales, pero esto puede suponer una importante penalización económica, sobre todo si hay que mantener las calderas en funcionamiento para satisfacer la demanda de vapor del proceso.
- Ajuste de los factores de potencia y de la tensión de distribución. Hay un límite en cuanto a lo que se puede conseguir con este método. En un sistema grande, esto puede marcar la diferencia, pero existe la posibilidad de dañar ciertos aparatos eléctricos, especialmente por la reducción de la tensión.

En caso de corte forzado, el propietario debe decidir qué opción ofrece la mejor alternativa para satisfacer las demandas del sistema. Se puede tomar una decisión inicial con el fin de devolver el servicio a los clientes, pero una solución a medio largo plazo puede requerir un cambio de suministro a uno más rentable con el que satisfacer las demandas durante el período de la interrupción forzada.

2.5 La Programación de Paradas

Una unidad en servicio requiere inspecciones periódicas o paradas de mantenimiento preventivo para que pueda ser examinada y se tomen medidas correctivas que le permitan seguir en servicio en un estado aceptable. Existen dos enfoques básicos para programar las paradas que proporcionan el tiempo suficiente para realizar el examen, la corrección de los defectos conocidos y la detección de cualquier deterioro que requiera atención en la siguiente parada prevista. Estos dos enfoques son:

- Apagar la unidad y exponer las secciones y válvulas para realizar un examen y determinar las reparaciones necesarias. Este es probablemente el enfoque más común, y es utilizado por la mayoría de las grandes plantas. Esto requiere que toda la unidad no esté disponible para el sistema durante un período para que todas las secciones puedan ser trabajadas al mismo tiempo
- Apagar las secciones de forma selectiva, abriendo una o posiblemente dos durante una interrupción regular. La ventaja es que el "tiempo de indisponibilidad" es algo más corto y las capacidades técnicas se concentran en las secciones abiertas. También significa que las secciones propensas a sufrir daños o deterioros importantes pueden examinarse con más frecuencia.

Este segundo enfoque ha resultado eficaz en sistemas que tienen demandas de carga máxima tanto en verano como en invierno, además de periodos relativamente cortos entre esos periodos de carga máxima, en los que la unidad puede estar disponible para el mantenimiento. También se ha utilizado en grandes unidades nucleares que deben pararse durante seis o siete semanas para repostar combustible. En ese momento se abre una sección de la unidad y se pone a disposición para sustituirla o reparar los daños.

2.6 Los Intervalos Entre las Paradas de Mantenimiento

Los operadores de unidades generadoras de turbinas de vapor deben determinar el intervalo óptimo o aceptable entre las paradas de mantenimiento y las inspecciones. Este intervalo entre paradas debe determinarse para cada unidad del sistema y debe reflejar no sólo los costes de funcionamiento y reparación, sino también las consecuencias que tendría no realizar dichas inspecciones y detectar los fallos en sus primeras fases de desarrollo. Existen fabricantes que han determinado que, en determinadas condiciones y reconociendo las limitaciones, sus rotores de unidad pueden funcionar hasta 10 años entre inspecciones importantes.

Aparte de los factores técnicos, hay que tener en cuenta los siguientes aspectos a la hora de establecer el periodo entre las paradas de inspección:

- Los costes de combustible de la unidad que se retira del sistema para su inspección y el coste de combustible de la o las unidades que se ponen en marcha para satisfacer las necesidades de carga, o el coste de la energía de sustitución que se comprará.
- El factor de carga previsto de la unidad durante el periodo de interrupción y su potencia nominal.
- La diferencia de *Heat Rate* entre la unidad que se inspecciona y las unidades que se ponen en marcha para cumplir con los requisitos de carga.
- El índice genérico o histórico de paradas forzosas de la unidad.
- El periodo de mantenimiento previsto.
- Los costes de mano de obra previstos y el aumento que se prevé del coste de las piezas de recambio
- La mejora prevista en el *Heat Rate* de la unidad que se produce como consecuencia de la parada.
- La capacidad de reserva del sistema y el nivel de riesgo que el propietario está dispuesto a aceptar para seguir operando si se renuncia a la interrupción.
- Los problemas descubiertos en unidades similares de la empresa propietaria y de otras empresas de servicios públicos.

Estos factores influyen de forma muy importante en el coste de una interrupción y en el periodo de funcionamiento de una unidad entre inspecciones importantes.

La situación ideal para programar las paradas sería que una unidad se abriera con muy poca frecuencia; que no se encontrara ningún daño (o un mínimo de daño y deterioro) en la parada, y que la unidad volviera a funcionar con éxito. De hecho, las unidades se abren periódicamente sobre la base de un "ciclo de vida", normalmente entre cuatro y ocho años, con la posibilidad de que este periodo de funcionamiento se amplíe en el caso de que la reserva del sistema disminuya.

El tiempo real de apertura entre paradas importantes depende de varios factores, entre ellos

- Las recomendaciones de los fabricantes. La mayoría de las veces se basan en las observaciones de una gran población de unidades similares y en la experiencia establecida con estas unidades después de diferentes periodos de funcionamiento.
- Problemas conocidos en la unidad. Estos pueden estar relacionados tanto con situaciones ocasionadas por el proveedor como por el usuario. Las deficiencias de diseño requieren abrir las unidades con más frecuencia hasta que se identifique y resuelva por completo un problema concreto a partir de una solución permanente.
- La forma en que se ha operado la unidad desde la última interrupción. Este es un factor sobre el que el proveedor no tiene ningún control y, hasta cierto punto, el operador sólo tiene una influencia limitada.

Los factores que influyen en la determinación de cuándo debe abrirse la unidad incluyen:

- El número y el tipo de arranques desde la última parada (incluidos los arranques muy calientes, calientes, templados y fríos)
- Los transitorios de temperatura experimentados desde la última parada.
- Cualquier transitorio ocasionado por sobrevelocidad excesiva y su duración desde la última parada.

Una unidad nueva representa la última tecnología disponible en el sistema, y normalmente funciona a su máxima capacidad. Lamentablemente, a medida que la unidad envejece, pierde importancia para el sistema y las propiedades de los materiales de los componentes tienden a degradarse. La unidad se somete entonces normalmente a un funcionamiento más cíclico, que consume la vida útil de los componentes mucho más rápidamente.

En la actualidad no existe un método absoluto para definir cuándo debe retirarse una unidad del servicio para su mantenimiento. En las ocasiones en las que los operarios saben que debe apagarse, algunos no pueden hacerlo debido a las exigencias del sistema o del proceso. En estas circunstancias, la unidad funciona con riesgo. Si la operación no puede evitarse por completo, debe minimizarse y limitarse los transitorios a los que está expuesta.

2.6.1 Horas equivalentes de funcionamiento

Un método adecuado para ayudar a la hora de decidir cuándo se abre una unidad es acumular las horas de equivalentes de funcionamiento (Equivalent Operating Hours, EOH) para cualquier periodo de funcionamiento después de que la unidad vuelva a estar en servicio tras una interrupción importante. Al tener en cuenta este periodo de funcionamiento, los factores de las EOH afectan a los arranques y pueden incluir los efectos de algunas operaciones transitorias. Algunos fabricantes hacen uso de ecuaciones como la que se mostrará a continuación o muy similares.

Las horas equivalentes de funcionamiento (EOH) son la suma de las horas de normal funcionamiento (NOH) más las horas equivalentes de funcionamiento debido a arranques (EOH's). Los arranques pueden ser en frío, en templado o en caliente. Entonces:

$$EOH = \sum NOH + EOH's$$

Siendo:

$$EOH = \text{Equivalent Operating Hours}$$

NOH = Normal Operating Hours

EOH's = Equivalent operating hours due to starts

Las horas equivalentes de funcionamiento debido a arranques (EOH's) se definen de la siguiente manera:

$$\text{EOH's} = (\text{Nc} \times \text{TC}) + (\text{NW} \times \text{TW}) + (\text{NH} \times \text{TH})$$

Siendo:

Nc = The number of cold starts (número de arranques en frío)

Nw= The number of warm starts (número de arranques en templado)

Nh= The number of hot starts (número de arranques en caliente)

Tc= The weighing factor for cold starts (factor de influencia de los arranques en frío)

Tw= The weighing factor for warm starts (factor de influencia de los arranques en templado)

Th= The weighing factor for hot starts (factor de influencia de los arranques en caliente)

Por ejemplo, para una unidad que tenga una operación durante 4 años de 30.000 horas de funcionamiento normal (NOH) con los siguientes arranques:

$$\text{Nc} = 20$$

$$\text{Nw} = 160$$

$$\text{Nh} = 1460$$

Y los siguientes factores de influencia de arranques:

$$\text{Tc} = 64$$

$$\text{Tw} = 24$$

$$\text{Th} = 14$$

Resulta que las horas de equivalentes de funcionamiento (Equivalent Operating Hours, EOH) serían:

$$\text{EOH} = \sum \text{NOH} + \text{EOH's} = \text{NOH} + (\text{Nc} \times \text{TC}) + (\text{NW} \times \text{TW}) + (\text{NH} \times \text{TH}) = 30.000 + (20 \times 64) + (160 \times 24) + (1.460 \times 14) = \mathbf{55.560 \text{ horas}}$$

En definitiva, a la hora de tomar decisiones, no es lo mismo valorar las NOH que las EOH. Las EOH dan un reflejo más fiel de lo que es el desgaste por funcionamiento que sufre la unidad. Además, es importante seguir las recomendaciones del fabricante en estos casos para saber interpretar de mejor forma el valor que resulta como EOH.

2.7 La Inspección / Parada de Mantenimiento

Uno de los principales objetivos de la inspección de mantenimiento de la trayectoria del vapor es detectar problemas potenciales en una fase temprana. Si no se hace esto, un deterioro menor podría progresar hasta el punto de que se produjera una parada forzada o una pérdida excesiva de eficiencia de la unidad. Durante dicha inspección, las piezas pueden examinarse visualmente en busca de indicios de fallo, desgaste o distorsión. Los ensayos no destructivos pueden aplicarse a los componentes críticos para determinar si se ha deteriorado su capacidad de seguir funcionando satisfactoriamente.

El funcionamiento satisfactorio de una turbina de vapor dentro de una planta está influenciado en gran medida por la forma y la experiencia con la que se opera y se mantiene. Para que el mantenimiento sea rentable, debe ser planificado. Cuando se detectan signos de malestar, desgaste excesivo, desalineación o deterioro de los componentes, debe considerarse la necesidad de una acción correctiva. Esta acción correctiva debe garantizar que la situación no se deteriore aún más, o hasta el punto de que la unidad pase a un estado de parada forzosa, se vea gravemente limitada en su carga o sufra un grado inaceptablemente alto de degradación de su eficiencia.

El coste de las interrupciones forzadas puede ser muy elevado. En el caso de las grandes unidades de las empresas de servicios públicos, esto requiere a menudo que se pongan en marcha unidades más

antiguas y menos eficientes para satisfacer la demanda del sistema o que se utilicen unidades que emplean un combustible alternativo más caro. La situación más grave para los sistemas de las compañías eléctricas es cuando no existe capacidad de reserva y no se puede comprar energía de sustitución. En ese momento se produce un apagón o una caída de tensión.

Además de las actividades rutinarias de mantenimiento, supervisión y cuidado, hay acciones de vigilancia asociadas a una interrupción de mantenimiento planificada. En estos casos, se retiran la carcasa de la mitad superior para exponer el recorrido del vapor para su examen. Esta apertura de la unidad permite realizar reparaciones o instalar piezas de repuesto. En este momento, se puede disponer de las habilidades necesarias y de cualquier herramienta de propósito especial que se requiera.

Esta apertura de mantenimiento también permite pedir piezas de repuesto. Esto se hace cuando una evaluación de cualquier "inconformidad operativa encontrada" se considera que pone la unidad en riesgo. La evaluación de la inconformidad indicará normalmente si la unidad puede volver a funcionar con seguridad, o si se requiere alguna acción correctiva temporal para que la situación pueda ser corregida antes de volver a arrancar.

2.8 Las Opciones Correctivas Disponibles

El tipo de deterioro o daño al que está sometido un componente o zona varía de una unidad a otra. Depende de una serie de factores que son función de los detalles de diseño del componente y del modo en el que se opera la unidad. Estos diversos factores influyen en las diferentes medidas que se llevan a cabo en relación con las no conformidades.

En muchos casos de daños o fallos, rara vez hay una solución "mejor" o "perfecta". En su lugar, habrá que hacer "sacrificios" en función de la disponibilidad de piezas de repuesto, los costes globales, los requisitos de herramientas y habilidades especiales, y el tiempo disponible para tomar medidas correctivas. La decisión que se tome también se verá influida por el nivel de riesgo asociado a cada posible solución en cualquier situación. La acción seleccionada debe proporcionar el mejor equilibrio entre el coste, el riesgo y la rapidez con la que la unidad puede volver al servicio.

Para hacer más racional y efectivo el proceso de evaluación, hay que definir las condiciones y las decisiones de mantenimiento. Las más importantes son las siguientes:

2.8.1 Al encontrar una disconformidad

Se considera que existe una situación de no conformidad cuando los componentes de la unidad han cambiado o se han deteriorado hasta el punto de que ya no se cumplen los requisitos de diseño. Se considera que existe una situación de no conformidad en cualquier parte del recorrido del vapor cuando hay signos de fallo estructural, desgaste excesivo o cualquier forma de deterioro que pueda afectar negativamente al rendimiento de la unidad. Cuando se confirme una condición de no conformidad de este tipo, se deben examinar sus efectos tanto a corto como a largo plazo.

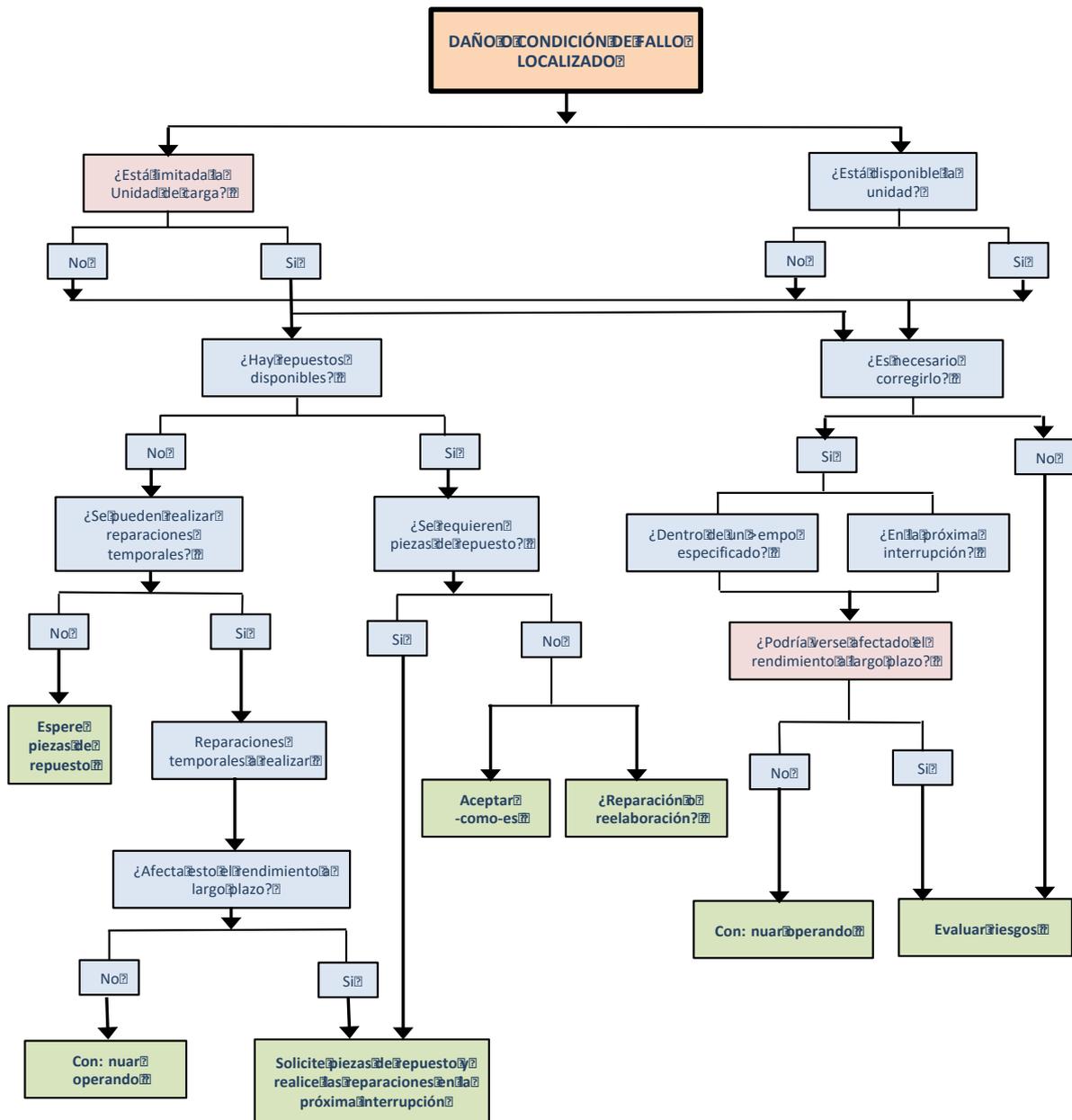


Figura 2-4. El "Proceso de Revisión Lógica" cuando se encuentra una condición disconforme en la unidad en una inspección de mantenimiento. La decisión final de la acción correctiva depende de muchos factores, incluyendo la disponibilidad y la entrega de piezas de repuesto. El ingeniero de mantenimiento debe evaluar las opciones y tomar una decisión teniendo muy cuenta cual es la mejor solución a largo plazo.

Cuando una inspección indica una condición no conforme, debe ser evaluada. El proceso lógico de evaluación del potencial de rendimiento se muestra en la figura 2-5. Esta figura describe las opciones que el operario o el ingeniero de mantenimiento exploran para decidir qué acción correctiva es la más apropiada. Una evaluación conduce a una de las cuatro decisiones alternativas. En determinadas circunstancias, la decisión es relativamente sencilla de tomar y, de hecho, es obvia. En otras, hay varias opciones disponibles y se toma una decisión basada en la probabilidad de fallo, el posible coste de la reparación y las consecuencias finales, incluida la corrección de los daños derivados de no tomar medidas correctivas.

A continuación, se detallan las cuatro decisiones básicas a las que se puede llegar:

- **Desechar y reemplazar**

Esta decisión se toma cuando la situación ha provocado deteriorado hasta el punto en que el componente debe ser reemplazado, ya sea porque ha fallado o porque su puesta en servicio pondrá en peligro la integridad estructural y la seguridad de la unidad. A menudo, esta es una decisión obvia con poca necesidad de evaluación. En otras ocasiones, esta decisión se toma solo después de una revisión exhaustiva de las diferentes opciones y las posibles consecuencias. Cuando es necesario reemplazar se considera que el riesgo asociado al uso continuado es demasiado grande, y la pieza debe desecharse y reemplazarse, incluso si esto requiere esperar la entrega de las piezas de repuesto.

En ciertas circunstancias, una unidad puede funcionar a carga parcial y/o con condiciones de vapor reducido, si el componente que sufre la no conformidad no afecta a otras partes de la unidad. Esta posibilidad debe evaluarse para cada condición no conforme.

- **Reparar**

Una reparación corrige una condición no conforme, pero no restablece las características de diseño originales dentro del elemento o unidad. A menudo es posible hacer reparaciones a los componentes, lo suficiente para permitir que vuelvan a estar en servicio. Dependiendo de la naturaleza de la no conformidad y de la reparación, el componente afectado puede o no necesitar ser reemplazado en última instancia.

A lo largo de las décadas se han producido avances significativos en muchas técnicas de reparación. Esto es particularmente cierto en los casos de soldadura, donde la tecnología ha puesto a disposición materiales y técnicas capaces de extender la vida útil de muchos componentes aparentemente obsoletos o muy deteriorados.

Los requisitos técnicos para realizar una reparación de este tipo suelen ser estrictos. Sin embargo, si permiten que una unidad vuelva a estar en servicio en un período corto (en lugar de requerir una parada prolongada), o hasta que las piezas de repuesto estén disponibles, entonces los costes y el cambio mínimo en los niveles de riesgo asociados a tales reparaciones pueden justificarse a menudo.

Una vez más, la decisión de reparación se toma normalmente después de una revisión de la no conformidad, una evaluación de los posibles procedimientos de reparación y el nivel de riesgo involucrado.

- **Reacondicionar**

Un componente reacondicionado se considera devuelto a su condición de diseño (o mejor). La decisión de restaurar un elemento no conforme es, en algunos aspectos, similar a la de reparación, pero implica una conformidad total con las condiciones de diseño originales.

En varias situaciones, el reacondicionamiento implica reformar el material existente y puede o no requerir la adición de calor. En muchos casos, esta es una decisión fácil de tomar, particularmente cuando se aplica a partes estacionarias del paso del vapor. Puede haber un tiempo prolongado asociado con decisiones importantes en la restauración, pero hoy día se pueden llevar a cabo muchas técnicas sin prolongar la parada.

Las recientes mejoras en el diseño y la tecnología de fabricación hacen que, en el caso de ciertas remodelaciones por daños, los componentes tengan el potencial de rendir a niveles superiores en comparación con el diseño original. Además, existe una tendencia creciente entre los propietarios y operadores a reparar o reacondicionar los componentes una vez que han sido retirados de la unidad y sustituidos. Los componentes reparados/reacondicionados pueden entonces llevarse como repuestos de inventario. Si se trata de un componente que se deteriora durante el funcionamiento, los dos elementos pueden alternarse en cada parada. Es una propuesta atractiva, sobre todo si hay varias unidades en una planta o sistema que utilizan estos mismos componentes.

- **Aceptar como está**

Esta decisión permite que un componente vuelva a ponerse en servicio sin realizar ningún esfuerzo para corregir la no conformidad. Hay tres criterios que intervienen a la hora de decidirse por esta opción.

- Hay poca necesidad de hacer correcciones. Hacerlo no agregará más que mejoras marginales al rendimiento de la unidad.
- El costo de reemplazo, reparación o reacondicionamiento no puede justificarse. Se debe tener en cuenta, además, el grado de deterioro y vida útil restante de la unidad.
- No hay tiempo suficiente para tomar medidas correctivas. La corrección, reparación o reacondicionamiento extenderían el período de interrupción más allá de un período de tiempo aceptable.

Esta decisión suele ser una decisión basada en la experiencia del ingeniero y sólo puede tomarse teniendo en cuenta los riesgos que conlleva. Esta decisión no debe tomarse como una medida desesperada. Los riesgos, si los hay, deben ser evaluados en su totalidad y las opciones consideradas, desde una interrupción prolongada hasta el funcionamiento y la probabilidad de falla.

A menudo se puede tomar una decisión de “aceptar como está” (de nuevo, siendo conscientes de los riesgos) mientras se obtienen las piezas de repuesto.

El proceso de decisión o evaluación puede ser complejo. En ocasiones, la solución es evidente, es decir, cuando se ha producido un fallo parcial o existen daños excesivos. Las decisiones más difíciles son las relacionadas con la "sospecha" de daño o deterioro, y aquellas en las que es difícil determinar la causa. En casos de incertidumbre, se requiere un juicio experimentado, junto con el conocimiento del historial operativo de la unidad. Este conocimiento puede ayudar a evaluar una situación existente y también puede brindar más confianza en la selección de la decisión final.

La disponibilidad de piezas de repuesto, herramientas y habilidades especiales a menudo influirán en la decisión que se tome. Se debe tener cuidado con el hecho de garantizar que la disponibilidad o no disponibilidad de piezas de repuesto no obligue al propietario/operador a tomar una decisión que, en última instancia, resultará más cara y aumentará el riesgo general a un nivel inaceptable. A menudo, existen soluciones alternativas que pueden degradar la capacidad de una unidad o imponer otras restricciones, pero en última instancia son más aceptables a corto plazo, mientras que el propietario/operador se encarga de encontrar y materializar una solución a largo plazo más aceptable.

Un enfoque común, lógico y recomendado para las decisiones de mantenimiento y las disposiciones de reparación es:

- Considerar las acciones alternativas en función de los requisitos de diseño de los componentes afectados
- Evaluar cada posible solución en términos de las desviaciones de los requisitos expresados en el diseño.

Muchas decisiones de reparación o de aceptación tal como está tendrán solo un efecto menor en el rendimiento de la unidad y pueden aceptarse fácilmente. Otras reparaciones pueden aceptarse si la unidad puede funcionar en condiciones comprometidas, como condiciones de vapor reducidas o cambios de carga limitados.

2.9 Distinción entre causas y mecanismos de fallo

Cuando se abre una unidad, ya sea en una parada planificada o en una situación de parada forzada, existe la posibilidad de que se encuentre una situación de fallo, daño o deterioro. Entonces es necesario que el propietario y el personal de mantenimiento y operación analicen la situación y seleccionen un plan de acción correctiva.

Un primer paso para descubrir la existencia de tal situación es identificar la causa. Esto es de particular importancia cuando se examina una unidad nueva o relativamente nueva, ya que esta situación puede ser sintomática de una falla de diseño que debe corregirse. Un segundo paso es identificar el mecanismo de falla.

Es importante reconocer al comienzo de tal investigación, que la “causa” y el “mecanismo” que causa el deterioro no son lo mismo. El mecanismo de falla es la forma de deterioro del material que se ha producido y, en última instancia, consume la vida útil del material o componente, lo que a menudo da como resultado la ruptura del material o una deformación grave. La causa es aquella característica del funcionamiento o de la estructura de la unidad que ha introducido el entorno en el que el mecanismo puede iniciarse y desarrollarse.

Los mecanismos de daño o fallo, por su extensión, se verán en los **capítulos 3, 4, 5 y 6**. Las causas se comentarán a continuación.

2.10 Las causas de fallo

Cuando falla un componente mecánico, obviamente hay una causa. Los fallos no ocurren si no son iniciadas por alguna circunstancia existente dentro de la unidad. Las posibles causas se muestran en la Figura 2-5 y se examinan a continuación.

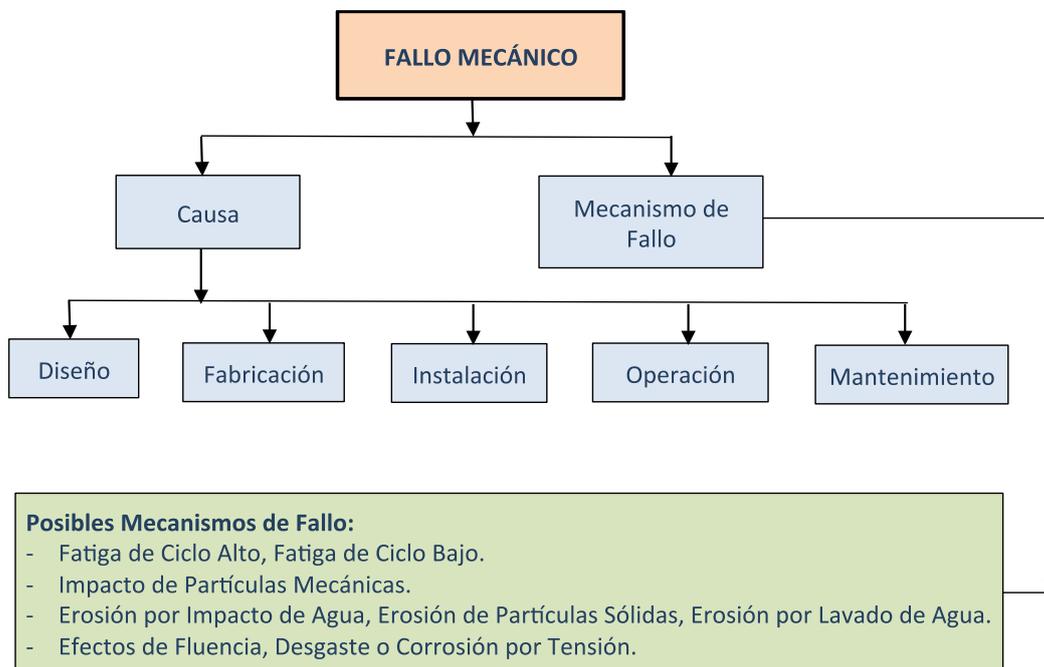


Figura 2-5. Las principales causas de fallo en el paso del vapor, junto con los principales mecanismos de fallo.

2.10.1 Diseño deficiente o inadecuado.

Algunas posibles causas de fallas originadas por el diseño se muestran en la Figura 2-6.

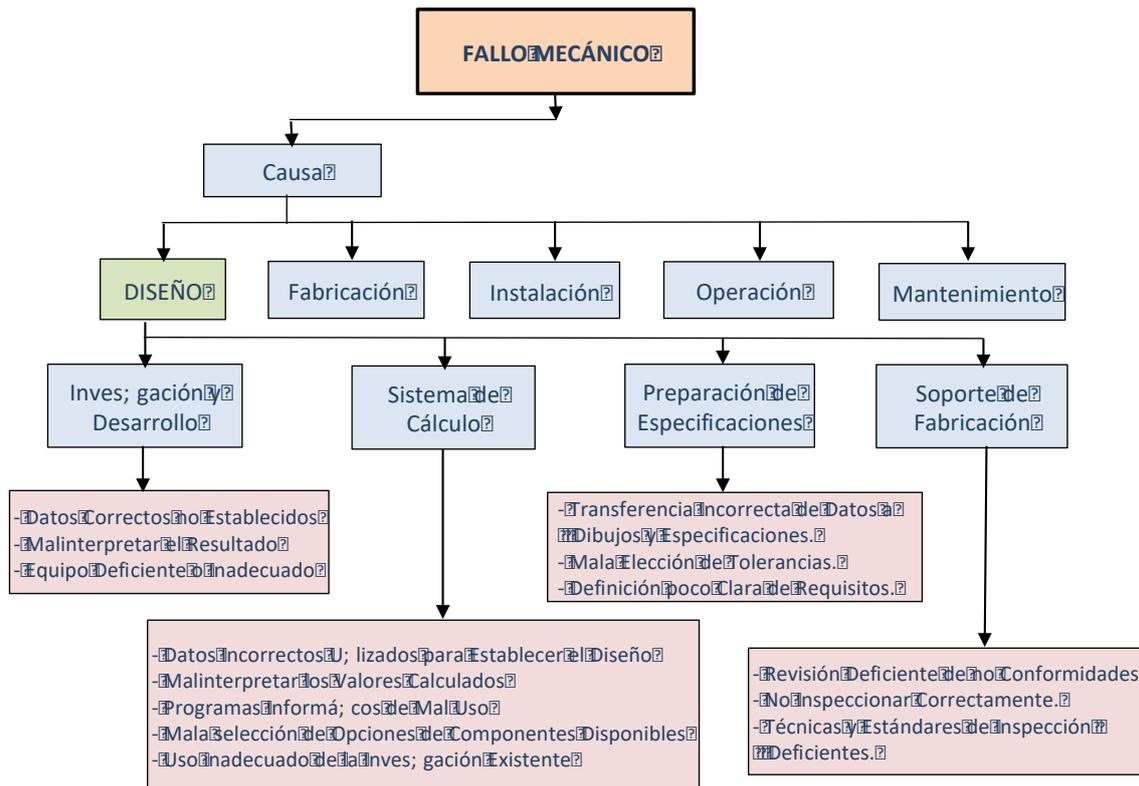


Figura 2-6. Causa de Fallos derivadas del proceso de diseño.

El proceso de diseño establece una especificación de fabricación que identifica los requisitos dimensionales, los materiales y los requisitos del proceso suficientes para hacer que la unidad sea adecuada para la aplicación prevista. Para lograr esta especificación, el proceso de diseño emplea los resultados de la investigación, el desarrollo y la experimentación, todos los cuales se inician por la necesidad de identificar y resolver los problemas potenciales que podrían surgir en el funcionamiento de la unidad.

En todas las grandes compañías de diseño, existen métodos reconocidos para los procedimientos de diseño termodinámico y mecánico. Estos son bien entendidos por la industria y aplicados por los ingenieros individuales que realizan las tareas de diseño. Sin embargo, hay situaciones en las que la extrapolación de diseños existentes, los errores de cálculo o la especificación incorrecta de los materiales provocarán el deterioro de una unidad antes de lo que normalmente se espera.

Los errores causados por el proceso de diseño pueden atribuirse correctamente a especificaciones de diseño defectuosas o aplicación e implementación de tecnología inadecuada. Con el uso de técnicas de diseño computarizado, se han reducido muchos de estos errores y la posibilidad de que se produzcan.

Una premisa básica del proceso de diseño es definir un componente que funcionará sin fallas durante un mínimo de 200.000 horas (unos 30 años de funcionamiento normal). Esta filosofía se aplica a los componentes principales. Se reconoce que otros componentes se consideran como "consumibles" y se reemplazarán periódicamente para mantener tanto la eficiencia como la disponibilidad en niveles aceptables. Para aquellos componentes diseñados para alcanzar 200,000 horas de vida operativa, se asume que sus unidades funcionan según lo previsto y que se mantienen los parámetros operativos definidos por el diseñador. Al definir estas limitaciones operativas, se pueden abordar algunas o todas las siguientes restricciones:

- Tasa de variación de la presión de vapor inicial y horas totales de funcionamiento con sobrepresión
- Tasa de variación de la temperatura inicial y de recalentamiento del vapor y horas de funcionamiento a sobret temperatura

- Contrapresión del condensador
- Limitaciones de velocidad de la unidad y de oscilación de velocidad
- Recomendaciones para las pruebas de sobrevelocidad
- La eliminación de los calentadores de agua de alimentación
- Las velocidades a las que la unidad debe iniciarse, conectarse a cargar y apagarse.

Normalmente, estas limitaciones se abordan en términos del número de horas de funcionamiento en condiciones "fuera de diseño", es decir, el número, la frecuencia y la gravedad con la que la unidad podría experimentar diversas condiciones transitorias (reconociendo que muchas de estas condiciones son difíciles o imposibles de controlar). Estas limitaciones varían de un fabricante a otro y reflejan hasta cierto punto la experiencia operativa de cada fabricante en tales condiciones. También pueden reflejar la filosofía del diseñador y, hasta cierto punto, el nivel de conservadurismo tanto en el diseño como en la filosofía de funcionamiento.

La unidad de ingeniería de diseño es responsable de la calidad de la unidad y los componentes, así como de la definición de las tolerancias a las que se fabricará y probará la unidad y sus componentes para lograr el nivel de rendimiento requerido. Por lo tanto, cuando se producen condiciones no conformes dentro de un departamento de fabricación, el ingeniero de diseño debe evaluarlas, dictaminar sobre su admisibilidad y decretar la acción correctiva requerida.

En el caso de que el ingeniero de diseño acepte una situación o condición que no esté dentro de sus tolerancias definidas, y la unidad se vea obligada a dejar de funcionar o se deba extender una interrupción planificada para corregir dicha situación, esto se considera una falla iniciada por el diseño. Es decir, la causa principal es un diseño deficiente.

2.10.2 Fabricación de baja calidad

Es responsabilidad del departamento de fabricación convertir una especificación de ingeniería en un producto terminado. El departamento de fabricación no tiene la responsabilidad de establecer el nivel de calidad de los componentes individuales, solo para garantizar que se cumpla con la calidad (según lo define el departamento de diseño). La "calidad" se define en una serie de documentos, desde dibujos hasta especificaciones de proceso y material. Normalmente, cada uno de estos documentos se suministra con tolerancias de producción y aplicación claramente definidas, ya sea como limitaciones impuestas a los documentos individuales o como normas establecidas y publicadas dentro del departamento de fabricación.

Por lo tanto, es obvio que existe una oportunidad considerable de que se produzcan errores de fabricación. Para ayudar a prevenirlos o minimizarlos, el departamento de ingeniería emplea una metodología de control de calidad y garantía de calidad. Estos programas de calidad son una disciplina impuesta por la administración. Sin embargo, la fabricación sigue siendo una operación humana y todavía hay una serie de operaciones manuales y situaciones críticas asociadas con la fabricación. Las fallas pueden ocurrir y ocurren y son sufridas por las unidades.

Las principales áreas de la manufacturera donde pueden ocurrir fallas se muestran en la Figura 2-7.

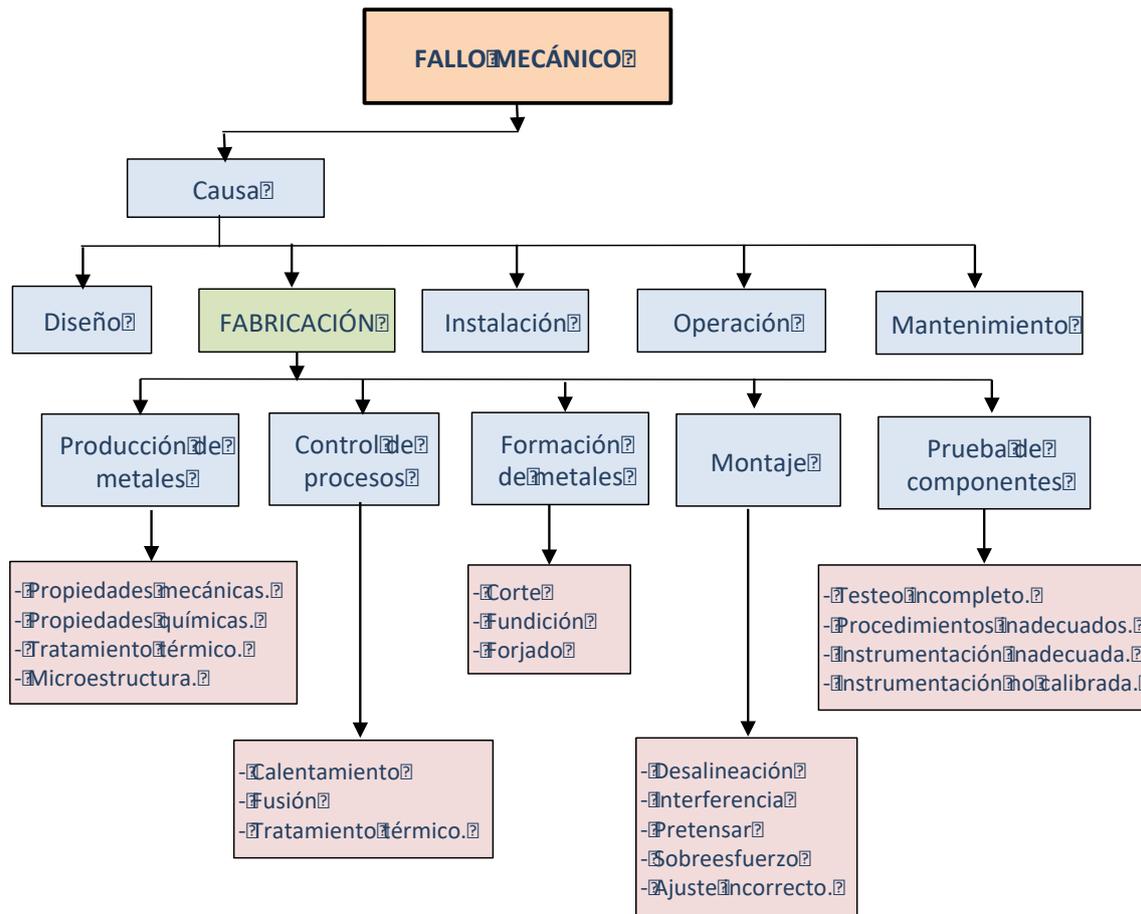


Figura 2-7. Causa de Fallos derivadas del proceso de Fabricación

El ensamblaje de componentes es una parte importante del proceso de fabricación. Lleva consigo la posibilidad de "tensiones residuales" que, sumadas a las tensiones de funcionamiento, pueden provocar una falla prematura de los componentes. Desafortunadamente, tales fallas son difíciles de rastrear y no se pueden anticipar, ya que el elemento deformado o sobrecargado, o la falta de inspección, a menudo queda oculto por el resto de los componentes ensamblados.

En la fabricación de turbinas, muchos procesos, al finalizar éstos, hay poca o ninguna oportunidad de verificar la conformidad sin pruebas destructivas o degradación significativa del producto final. Estos procesos a menudo se asocian con la fusión o el ensamblaje utilizando calor. En estos casos, el aseguramiento de la calidad implica calibrar el proceso para asegurar la conformidad con el proceso. En estos casos, la garantía de calidad consiste en verificar el proceso para garantizar su conformidad mediante el examen detallado de las muestras que se fabricaron (que no sobre el producto final), incluyendo pruebas destructivas y exámenes metalúrgicos.

2.10.3 Instalación de calidad deficiente

El montaje y la instalación in situ es una operación compleja que incluye la instalación de componentes y subconjuntos individuales. Esto también debe considerarse para incluir la puesta en servicio, que normalmente es una parte integral del proceso de suministro de turbinas. Si estas tareas no se realizan de manera correcta y controlada, a menudo darán como resultado características de funcionamiento deficientes y la imposición de tensiones indebidas en los componentes de la unidad. Estas tensiones adicionales pueden incluir tensiones residuales que conducen a fallas prematuras dentro de los componentes de la unidad si no se detectan y corrigen. En la Figura 2-8 se muestran algunas de las posibles causas de los fallos provocados por las características de la instalación y el montaje.

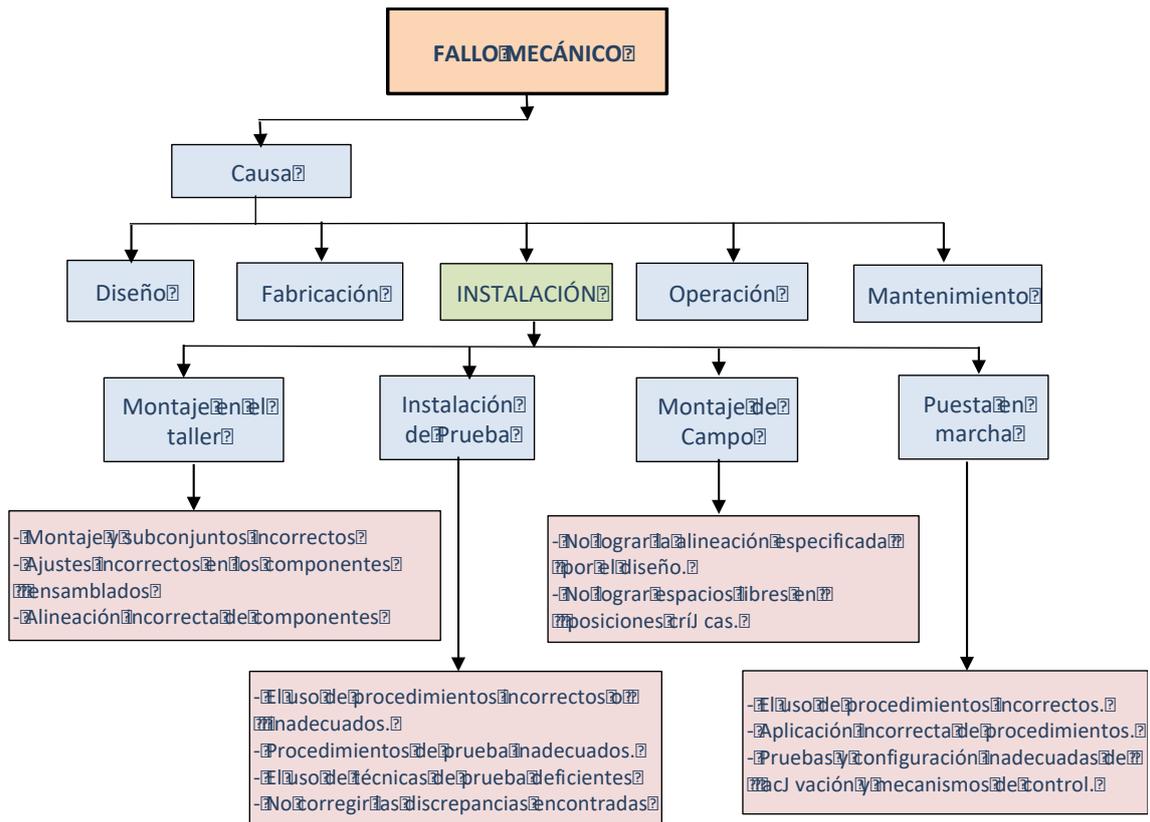


Figura 2-8. Causa de Fallos derivadas del proceso de Instalación

El montaje in situ requiere que las unidades de múltiples secciones estén alineadas en ubicaciones verticales y horizontales y que todos los espacios libres estén en los valores especificados por el diseño para lograr el ajuste y relación correctos entre los componentes giratorios y estacionarios durante la operación. No lograr la alineación correcta resultará en niveles de vibración más altos de lo esperado y posiblemente la imposición de tensiones cíclicas en los niveles operativos normales predichos por el diseño. Un control deficiente de la alineación también puede resultar en rozamientos durante la operación de la unidad que tienen el potencial de degradar la eficiencia y la fiabilidad.

Los equipos de control y la instrumentación también deben instalarse y calibrarse para garantizar los niveles requeridos de control y protección.

2.10.4 Prácticas operativas deficientes o incorrectas

Una causa común de deterioro o falla de los componentes es la aplicación de procedimientos operativos incorrectos o la violación de los parámetros operativos. Esto es particularmente relevante en variaciones de temperatura. En muchos casos, el operador de la unidad puede tener poco control sobre tales variaciones y puede tener que responder a los requisitos del sistema para que se puedan satisfacer las demandas del cliente. Sin embargo, dichas operaciones requeridas por el sistema deben considerarse en sí mismo procedimientos operativos defectuosos.

Es normal que el ingeniero de diseño imponga ciertas limitaciones o restricciones en la forma en que se opera la unidad. Estas limitaciones no son arbitrarias y están destinadas a minimizar las tensiones (en todas las formas) a las que están sujetos los componentes de la unidad. Operar fuera de estas limitaciones consumirá la vida útil de los elementos y puede reducir la vida útil prevista. La velocidad a la que se consume la vida útil de la unidad o del componente también influyen en la fiabilidad de la unidad.

La Figura 2-9 muestra algunas de las acciones operativas que pueden resultar en deterioro o fallas de

componentes y reducción de vida de la unidad.

Además, se debe tener en cuenta que el funcionamiento de otros componentes del conjunto también puede influir en la turbina de vapor. El operador, por lo tanto, tiene la responsabilidad de garantizar, en la medida de lo posible, que otros equipos no afecten negativamente a las prestaciones de la turbina de vapor.

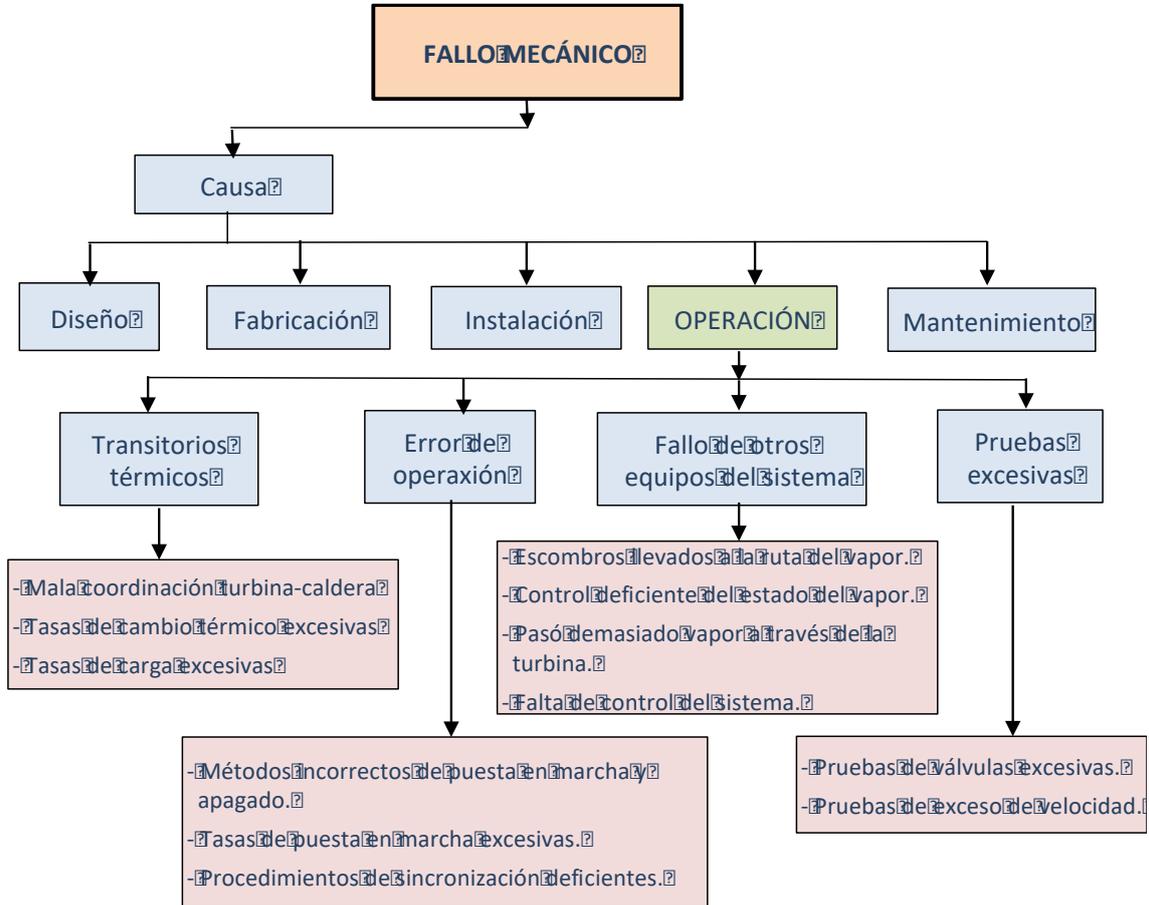


Figura 2-9. Causa de Fallos derivadas del proceso de Operación

2.10.5 Procedimientos de mantenimiento ineficaces

El mantenimiento de la turbina de vapor se divide en dos categorías:

- Actividades de mantenimiento rutinarias, es decir, prueba de válvulas, mantenimiento del nivel de aceite, engrasado de guías y soportes, etc.
- Mantenimiento realizado cuando se abre una unidad para corregir alguna situación precaria, o para mantener un estado correcta.

En términos de desempeño de la unidad, este segundo aspecto del mantenimiento está relacionado con la evaluación de componentes y la corrección de condiciones no conformes. Esto tiende a ser más crítico en lo que respecta al descubrimiento de fallas existentes y potenciales, pero el mantenimiento rutinario, si se descuida, también puede tener consecuencias graves y prolongadas para la unidad.

La Figura 2-10 enumera algunas actividades de mantenimiento que pueden influir en el rendimiento de la turbina de vapor.

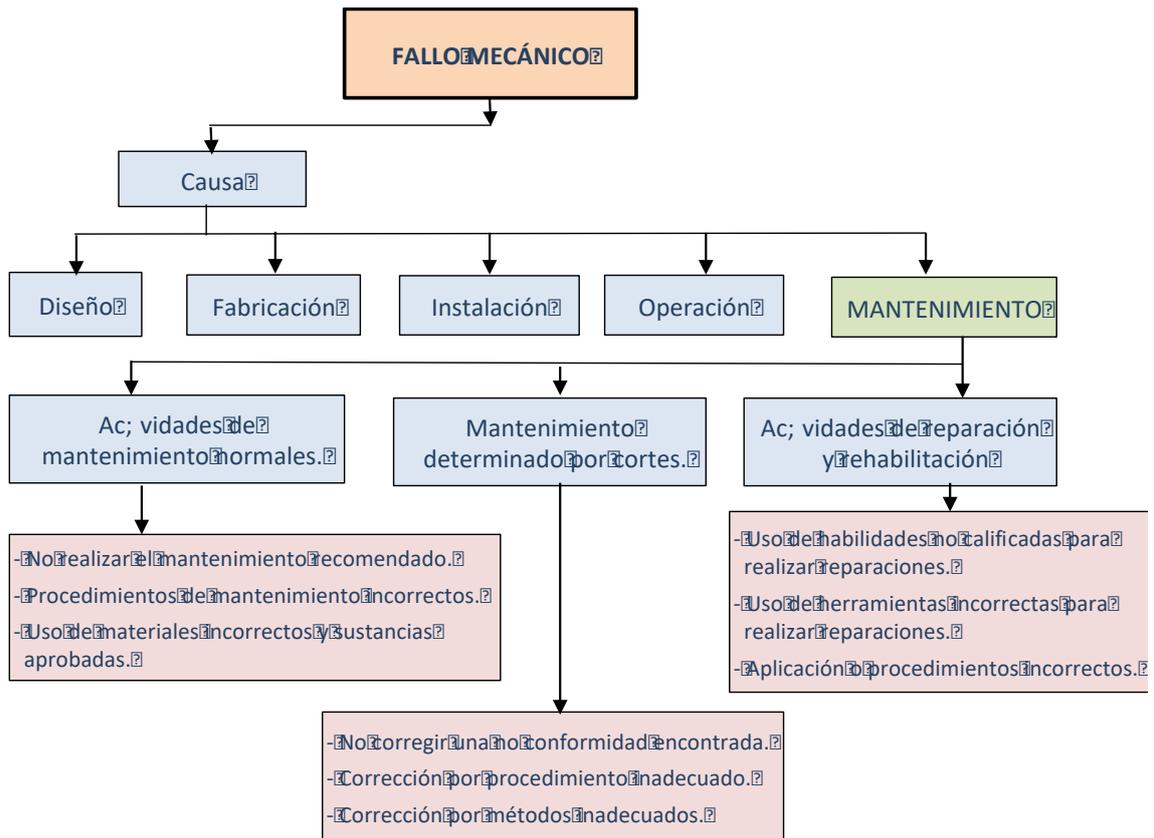


Figura 2-10. Causa de Fallos derivadas del proceso de Mantenimiento.

3 MECANISMOS DE DAÑOS EN EL PASO DEL VAPOR POR DETERIORO EN LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Dentro de la trayectoria del paso del vapor de la turbina muchas formas de carga, tanto estática como dinámica, introducen tensión mecánica en los componentes. Además, muchos componentes que operan a altos niveles de estrés lo hacen continuamente a temperaturas elevadas, que, aunque son sensiblemente constantes, bajo ciertas condiciones, cambiarán a velocidades capaces de causar cambios dentro del material.

En tales condiciones de carga, temperatura y variación de temperatura, estos componentes pueden estar sujetos a diversas formas de degradación de las propiedades del material y consumo de vida útil del material. El proceso de diseño evalúa estas condiciones e intenta definir los componentes individuales para que sean adecuados para la operación con las tensiones inducidas por las condiciones de operación, lo que les permitiría resistir durante la vida útil anticipada de la unidad.

Sin embargo, estos fenómenos pueden provocar daño en los componentes hasta el punto de que se produzcan fallas en éstos. Pueden ocurrir circunstancias durante el funcionamiento en las que la unidad se utilice más allá de sus límites de diseño. Estas circunstancias representan condiciones bajo las cuales se inducen tensiones superiores a las consideradas en el normal funcionamiento de la unidad. De manera similar, se puede disponerse de propiedades de material inferiores a las especificaciones de diseño. Si bien es posible que la falla no sea instantánea, existe una acumulación de daños que, en última instancia, obliga a la unidad a dejar de funcionar y requiere una acción correctiva, ya sea de inmediato o para una parada futura.

Los principales fenómenos de degradación del material que pueden afectar potencialmente los componentes de la trayectoria del vapor incluyen fluencia a alta temperatura, fatiga de alto ciclo y fatiga de bajo ciclo. Estos tres fenómenos se considerarán en este capítulo.

3.1 Fatiga de Ciclo Alto (“High-cycle fatigue”, HCF)

Posiblemente, los efectos más dañinos presentes en la trayectoria del vapor de la turbina son los asociados al HCF. El HCF es un mecanismo que es una causa primaria o iniciadora de fallos en muchos componentes, tanto rotativos como estacionarios. También es el principal mecanismo dañino que impulsará el deterioro iniciado por algún otro mecanismo, pudiendo elevar el nivel de daño hasta niveles destructivos.

La fatiga de alto ciclo es un mecanismo capaz de provocar la rotura mecánica de un componente como consecuencia de la aplicación de cargas cíclicas repetidas. Se trata de cargas cuyos valores máximos pueden ser considerablemente inferiores a los requeridos para provocar un fallo por una aplicación no cíclica, cuando se aplican sin choque, y en la misma dirección al mismo componente.

Este mecanismo de falla es quizás el más común observado en componentes defectuosos de la turbina de vapor. La alta frecuencia de este tipo de fallas es una consecuencia de las muchas fuentes de carga cíclica generadas dentro del flujo de vapor. Estas cargas cíclicas, aunque de baja magnitud, son de alta frecuencia en un componente que gira a alta velocidad y, por lo tanto, pueden acumular

muchos ciclos de tensión en un período relativamente corto. Además, pueden estar presentes muchas regiones de concentración de estrés como resultado del daño causado por algún otro mecanismo iniciador. Los componentes normalmente capaces de soportar la forma inicial de daño y no verse afectados fallarían como consecuencia de la aplicación de una carga cíclica de baja magnitud.

El proceso de diseño establece los requisitos dimensionales y materiales para cada componente de la ruta de vapor y los selecciona de manera que los niveles de tensión (directa y cíclica) inducidos por la operación no excedan los valores que pueden ser tolerados por los componentes. A menudo es un daño relativamente menor lo que iniciará el fallo, y luego una alta carga cíclica conducirá a los componentes a fallar.

La fatiga de ciclo alto es más destructiva en regiones donde existen altos niveles de estrés directo. El lugar más común para descubrir altos niveles de estrés es donde hay concentración de tensión. Hay tres causas básicas de concentración de tensión:

- **Cambios de sección.** Las consideraciones de diseño a menudo requieren cambios de sección o forma. Estos cambios pueden introducir regiones donde se requieren pequeños radios de empalme u otros cambios de forma, lo que tiene como consecuencia que la carga se aplique de manera no uniforme, lo que aumenta los niveles de tensión localmente.
- **Marcas de mecanizado o montaje.** Existen diversos procesos de fabricación y ensamblaje en los que se pueden introducir marcas en la superficie, rayones y hendiduras. Algunas de estas marcas pueden incluso estar ocultas al finalizar el proceso, lo que los hace más difíciles o imposibles de detectar. Pueden actuar como centros de concentración de estrés, siendo capaces de causar daños.
- **Insuficiencias en los materiales.** A medida que los materiales se producen para aplicaciones de turbinas, se examinan cuidadosamente para garantizar que no existan deficiencias en regiones donde representan un posible compromiso para la calidad del material. Sin embargo, es posible que tales deficiencias no se detecten. También es posible que se introduzcan fallos, en especial, durante cualquier proceso de fabricación que implique el uso de calor. Estas fallas pueden pasar desapercibidas a pesar de los mejores esfuerzos del fabricante para eliminarlas.

En la Figura 3-1 se muestra una superficie típica que refleja los efectos del HCF. Pueden verse claramente las marcas de "playa" ("beach" marks) características del HCF. De hecho, la verdadera superficie dañada por HCF muestra una estructura cristalina fina e ininterrumpida, y la ruptura final se produce en forma de fallo por sobrecarga de tracción o torsión, dependiendo de la forma y el tipo de esfuerzo que cause la separación final. Las marcas de playa están normalmente presentes y representan condiciones transitorias que causan una detención de la fractura o un cambio en la velocidad de propagación de la grieta. También puede deberse a una progresión masiva de la grieta.



Figura 3-1. Las estrías o marcas de playa en la paleta de una pala L-1

La verdadera superficie que falla por HCF no tiene ningún indicio de deformación mecánica, y si una superficie fallara completamente por HCF, las superficies de contacto "encajarían" perfectamente.

3.1.1 El fenómeno de alto ciclo

Las tensiones alternas aplicadas a un componente varían entre un máximo y un mínimo, y poseen un valor medio. Por lo tanto, si la tensión media se denota por " σ_m " y la tensión alterna tiene un rango de " $2\sigma_a$ ", entonces la tensión máxima a la que se somete el componente es " $\sigma_m + \sigma_a$ " y la mínima " $\sigma_m - \sigma_a$ ". Este efecto de tensión variable se muestra en la Figura 3-2. De hecho, en la práctica hay tres formas (o rangos de tensión) en las que se aplica esta tensión:

- La tensión cíclica cambia de un máximo a un mínimo alrededor de una tensión media cero. Esto se muestra en la Figura 3-3 (a). Por lo tanto, la dirección de la tensión resultante varía durante cada ciclo.
- La tensión cíclica varía alrededor de una tensión media. Es de menor magnitud que la tensión media y la tensión total está en todo momento en la misma dirección. Esto se muestra en la Figura 3-3 (b).
- La tensión alterna varía de un máximo a un mínimo, siendo el mínimo igual a cero. Esto se muestra en la Figura 3-3 (c).

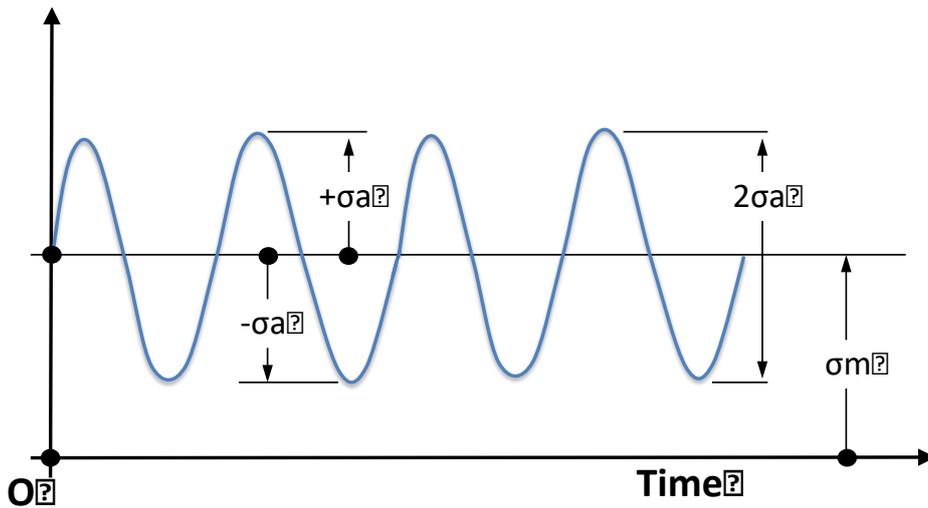


Figura 3-2 - Gráfica de una carga cíclica de "2σa" aplicada a una carga constante de "σm".

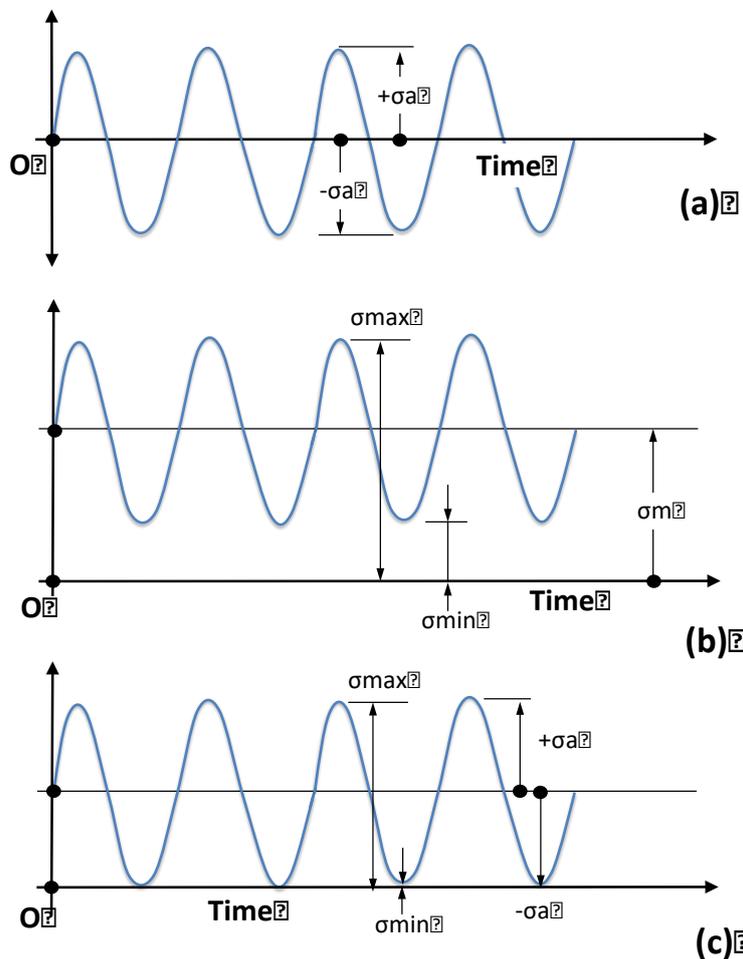


Figura 3-3 - Gráficas de las tres formas de aplicación de cargas cíclicas.

Al definir estas tres formas (dirección y magnitud del nivel de tensión cíclico y su variación, como se muestra en la Figura 3-3) se ha supuesto que la tensión se aplica de forma sinusoidal y que los valores máximo y mínimo de la tensión alternante aplicada son siempre de la misma magnitud. Estas suposiciones básicas no son necesariamente ciertas. Dentro de cualquier trayectoria de vapor, puede haber una variación considerable de los mismos.

La forma y frecuencia en que se aplican las cargas variables depende de una serie de factores

relacionados con la geometría de la trayectoria del vapor y su conformidad con los estándares establecidos por el diseñador. Los factores importantes para establecer la magnitud de la fuerza del vapor incluyen, entre otros, los siguientes aspectos:

- La fuerza de la estela al descargar en la hilera de álabes estacionarios.
- La conformidad de entrada de los pasos individuales en la fila estacionaria y las diferencias en su capacidad de ingesta (swallowing capacity) de vapor.
- El grosor de las gargantas individuales (gauging of the individual throats) dentro de la trayectoria del vapor, lo que modificará el ángulo de descarga de vapor.
- Cualquier inconsistencia que pueda existir en la morfología de la trayectoria del vapor debido a la junta horizontal de la fila de álabes estacionarios

La magnitud del impulso también se verá afectada por la cantidad de vapor que fluye en cualquier momento. Esto depende de la carga que se requiere que genere la turbina, que obviamente varía con la demanda del sistema para esa unidad.

En la Figura 4-3 se ha supuesto que la frecuencia de aplicación de la tensión permanece sin cambios. Dentro de la ruta de vapor de la turbina de una unidad diseñada para generar energía de frecuencia constante, esta es una suposición válida. Sin embargo, en otras turbinas diseñadas para funcionar a velocidades variables, esto no se puede suponer. Debido a que la acumulación de daño es sensible a la frecuencia, tales unidades pueden acumular diferentes cantidades de daño en diferentes momentos.

La situación más dañina que se presenta en la turbina de vapor es aquella en la que la frecuencia a la que se desarrollan los impulsos dentro de la trayectoria del vapor coincide con la frecuencia natural de los componentes con los que interactúan dichos impulsos. En estas circunstancias, el componente que sufre el impactado puede vibrar hasta fallar en un período de tiempo relativamente corto.

A partir de estas consideraciones, está claro que un análisis de los niveles de tensión cíclicos en el paso del vapor puede ser complejo. Un procedimiento normal en la fase de diseño es seleccionar y dimensionar los diversos componentes para funcionen dentro de ciertas limitaciones.

Además, en caso de que se produzcan daños durante funcionamiento por algún tipo de carga vibratoria, se deberá realizar un análisis detallado para identificar las circunstancias de la falla.

3.1.2 Tensiones vibratorias de los álabes rotativos (Rotor)

Los álabes de rotor de la turbina suelen ser los componentes más susceptibles a la fatiga de alto ciclo, y tienen inducidas tensiones generadas por los estímulos vibratorios desarrollados dentro del vapor que fluye a lo largo de ellos durante el funcionamiento. La magnitud de estas tensiones varía de una etapa a otra y está influenciada por la frecuencia y la magnitud de la carga vibratoria detectada. Las características físicas del propio álabe; tamaño, forma de este y el material del que está conformada (propiedades físicas y características de amortiguación); también influirán en el efecto total de los estímulos sobre el álabe. En la Tabla 3-1 se dan varias fuentes de estímulos vibratorios en la trayectoria del vapor.

Section	Harmonic	Typical Sources
High Pressure Section	<ul style="list-style-type: none"> • High per rev (40x) 	<ul style="list-style-type: none"> • Nozzle tolerance limits • Upstream wake degeneration • Structural turbulence
Intermediate Pressure Section	<ul style="list-style-type: none"> • Nozzle passing frequency (NPF) • 2 x NPF • 3 x NPF 	<ul style="list-style-type: none"> • Nozzle wakes • Diaphragm harmonics • Diaphragm harmonics
Low Pressure Section	<ul style="list-style-type: none"> • One per rev • 2 per rev • Multiple/rev • Medium/rev • High/rev 	<ul style="list-style-type: none"> • Relative displacement nozzles to blades • Diaphragm joints • Structural supports in flow path • Diaphragm harmonics • Aeroelastic disturbances • Nozzle turbulence harmonics • Upstream wake degeneration • Structural turbulence

Table 5.10.1—Steam Path Exciting Forces

ELIMINAR

Sección	Armónico	Fuentes de vibración
Alta Presión	Muchos por rev (40 x rev)	<ul style="list-style-type: none"> - Límites de tolerancia de la tobera - Efecto de la estela aguas arriba - Turbulencia estructural
Presión Intermedia	Frecuencia de paso de las toberas (FPT)	<ul style="list-style-type: none"> - Estelas de tobera
	2 x FPT 3 x FPT	<ul style="list-style-type: none"> - Armónicos del diagrama
Baja Presión	1 x rev	<ul style="list-style-type: none"> - Desplazamiento relativo de toberas a álabes de rotor
	2 x rev	<ul style="list-style-type: none"> - Juntas horizontales de diafragma
	Varios por rev	<ul style="list-style-type: none"> - Soportes estructurales del paso del vapor
		<ul style="list-style-type: none"> - Armónicos del diafragma por perturbaciones aeroelásticas
	Muchos por rev	<ul style="list-style-type: none"> - Armónicos por turbulencias de tobera
<ul style="list-style-type: none"> - Efectos de la estela aguas arriba - Turbulencia estructural 		

Tabla 3-1. Excitación en el paso de vapor y sus fuentes

Estos diversos modos de vibración pueden hacer que el álabe vibre de forma axial, tangencial y de torsión. Hay varios armónicos para cada forma de vibración, y la magnitud de cualquier esfuerzo inducido es un máximo cuando la frecuencia de la fuerza impresa, o estímulo, está en fase con una de las frecuencias naturales del propio álabe. Esta coincidencia provoca un aumento en la amplitud de vibración y la tensión, y un incremento del estrés que esto induce.

Las fuerzas que actúan sobre el álabe giratorio y contribuyen a la carga vibratoria son las fuerzas de flexión del vapor desarrolladas como resultado del paso del flujo de vapor a través de los álabes estacionarios. Muchas de estas cargas son predecibles y el proceso de diseño evita introducirlas en los álabes a un nivel en el que pueden causar fallas o daños. Si bien la magnitud de estas fuerzas de vapor puede ser baja, si su frecuencia de aplicación se acerca a la frecuencia natural del álabe, pueden desencadenar una falla temprana en los elementos de los álabes giratorios.

3.1.2.1 Efectos generados por los álabes de estator

Una causa común de daño o falla en el sistema de álabes giratorios de la turbina son los efectos de los impulsos de las toberas. Un impulso provocado por las distorsiones del flujo a su paso por los álabes estacionarios. La distorsión es el resultado de patrones de flujo desiguales entre un álabe estacionario y el siguiente. A medida que el álabe giratorio atraviesa el paso de la tobera, está sujeta a una variación de los impulsos de presión del vapor y, por lo tanto, las fuerzas se desarrollan a lo largo de su longitud tangencial y axial. Un diagrama típico de impulso/fuerza para tres pasos de tobera (cuatro álabes de estator) se muestra en la Figura 3-4, donde la fuerza del vapor "F" sobre el

álabe giratorio varía a lo largo del tiempo dependiendo de su posición en la dirección tangencial a través de la salida de las toberas.

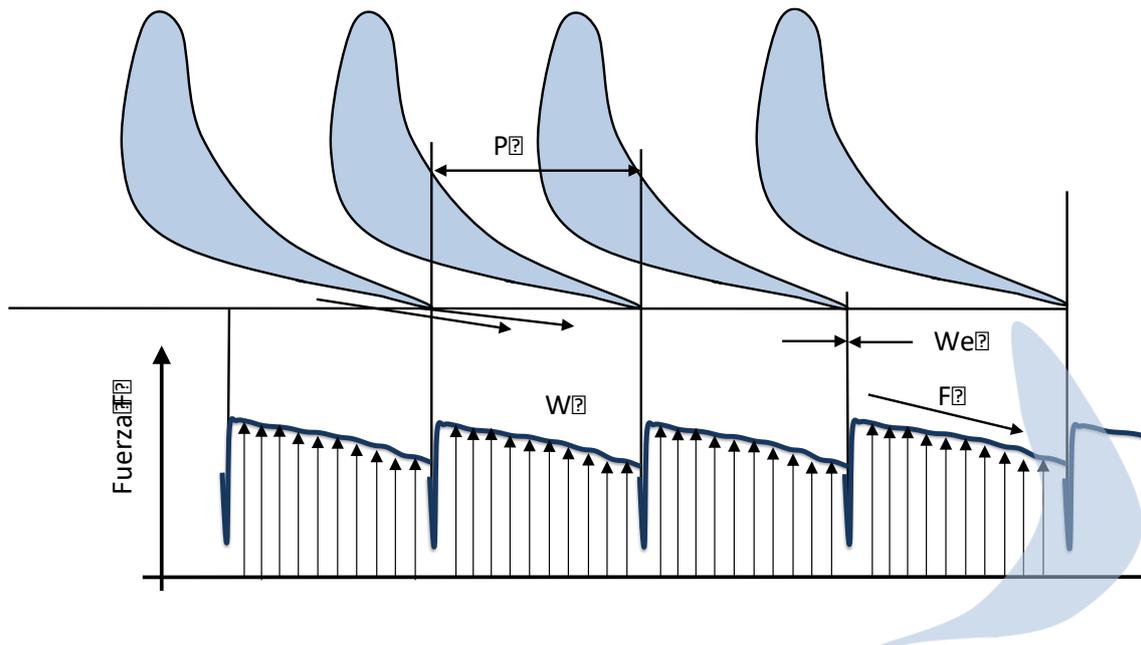


Figura 3-4. Esquema y gráfico de la variación de la fuerza del vapor "F" ejercida sobre el álabe estacionario a través del paso "P" de los álabes de estator.

Además, en la Figura 3-4 se muestra el efecto de una estela viscosa del borde de estela. La magnitud de la fuerza producida por este efecto de estela depende de varios factores, incluida la forma del paso de flujo y la medida en que la capa límite se separa del borde de estela del álabe de estator. En la parte inferior del diagrama se muestra un gráfico de la fuerza del vapor "F" en la descarga de la fila de álabes estacionarios. La presión de vapor real disminuye a través del paso el álabe estacionario, y en el borde de descarga, donde se forman las "perturbaciones" ("We"), se produce una pequeña reducción de la presión debido a este efecto. Se puede ver que esta fuerza del flujo de vapor actúa sobre el álabe de rotor. Debido a que es una fuerza variable, toda la hoja está sujeta a una fuerza cíclica, que induce una tensión cíclica de magnitud variable a través de cada paso de las toberas.

Para los álabes giratorios, este efecto de empuje de las toberas es posiblemente la causa más común de falla. Para la mayoría de los diseños, la magnitud normal de la tensión combinada de tracción y flexión no es lo suficientemente alta como para causar fallas. Sin embargo, los efectos de esta fuerza variable provocadas por las toberas pueden magnificarse para producir niveles peligrosos de tensión cíclica.

3.1.2.2 Efectos de la admisión parcial

En la figura 3-5 se muestra un diagrama simplificado de la fuerza del vapor, es un diagrama de carga para una sola revolución de rotor. Esta figura muestra la carga transitoria aplicada al álabe de rotor debido al efecto del flujo de vapor en admisión parcial.

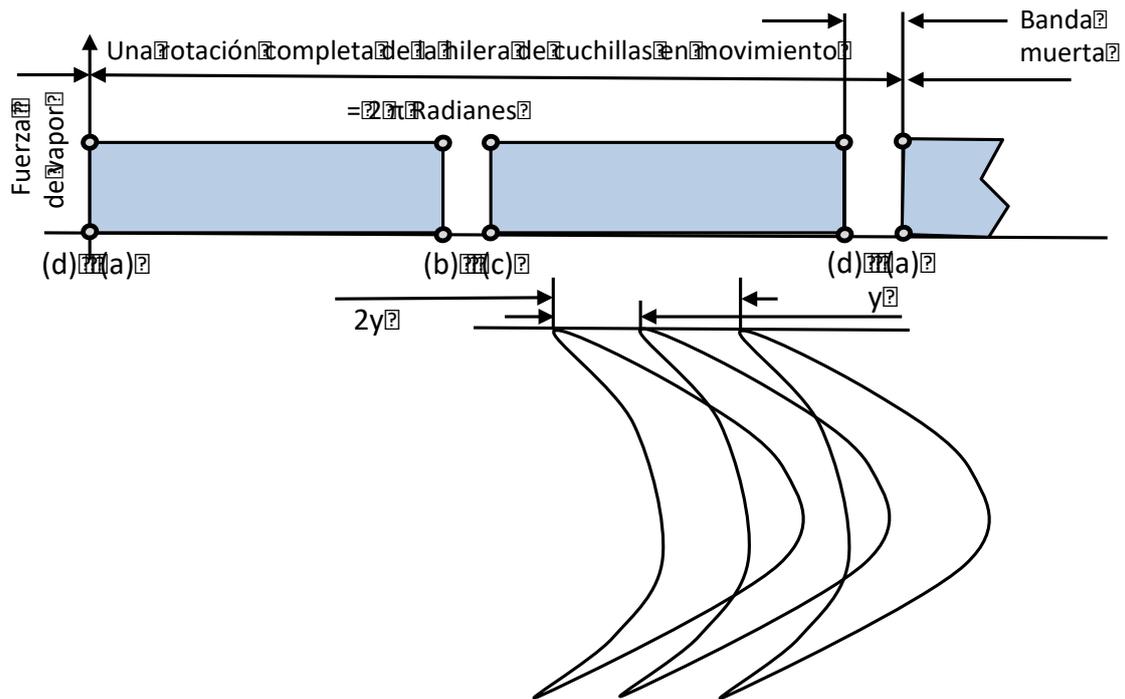


Figura 3-5. Un diagrama simplificado de las fuerzas del vapor para una revolución "A" de un álabe giratorio, mostrando los arcos de admisión y las "bandas muertas".

En esta figura, el vapor actúa sobre el álabe giratorio cuando entra en un **arco de admisión** ("active arc") (porción de la corona de control que descarga flujo) en "a". Aquí el chorro de vapor desvía al álabe, introduciendo una tensión en él proporcional a la desviación. En el instante en que se aplica la fuerza (posición "a"), la energía cinética del chorro de vapor hace que el álabe se desvíe, almacenando así energía de deformación por la tensión generada. Esta desviación del álabe continúa hasta que la energía de deformación almacenada es igual a la energía cinética del chorro de vapor. En esta condición, el álabe se habrá desviado una cantidad "y". Esta energía cinética se disipará en el álabe desviándolo en una cantidad adicional "y". Al completarse esta conversión de energía, la deflexión total de la hoja será "+ 2y", en cuya condición la tensión debida a esta deflexión "2y" es igual a " σ_m ". La tensión de flexión de la hoja será el doble que en la posición de equilibrio. (Esta explicación asume que no hay amortiguación molecular interna del material de la cuchilla).

También habrá una tensión de pequeña magnitud "+/- σ_a " debido al efecto de impulso de la tobera.

Si el álabe de rotor que se está considerando gira y se mueve fuera del arco activo o de admisión en "b", con el álabe en el extremo inferior de su movimiento, el álabe perderá la deflexión, convertirá su energía almacenada en cinética y se desviará de nuevo a una posición igual a "-2y". Por tanto, la hoja vibrará al doble de su amplitud normal. En tales condiciones, el rango de tensión en los bordes de entrada y descarga será cuatro veces el valor estático.

Si el álabe entra en un segundo arco de admisión activo "c-d", con su movimiento en la misma dirección que la fuerza del vapor, la amplitud aumentará aún más. Esta cadena de eventos puede continuar hasta que el álabe de rotor sea finalmente destruido. Es un requisito de diseño que el álabe de rotor esté dimensionado para que su deflexión no produzca tensiones capaces de destruirla.

En la actualidad, los niveles de tensión reales se pueden determinar con un grado considerable de precisión mediante métodos de elementos finitos.

3.1.2.3 La fuerza del vapor en admisión parcial

El diagrama teórico de la fuerza del vapor (Figura 3-5) representa las fuerzas aplicadas en una representación simple. De hecho, hay factores que modifican este diagrama.

Primeramente, no es posible que la fuerza se aplique instantáneamente, y se requiere un tiempo finito "dti" en la entrada para que el álabe de rotor detecte completamente el efecto axial del cambio en la presión del vapor. De manera similar, la fuerza no se puede eliminar de las palas instantáneamente y requiere un tiempo "dto" para eliminarse por completo. Por lo tanto, la fuerza axial del vapor en las posiciones "a", "b", "c" y "d", modificará de la manera en la que está representada.

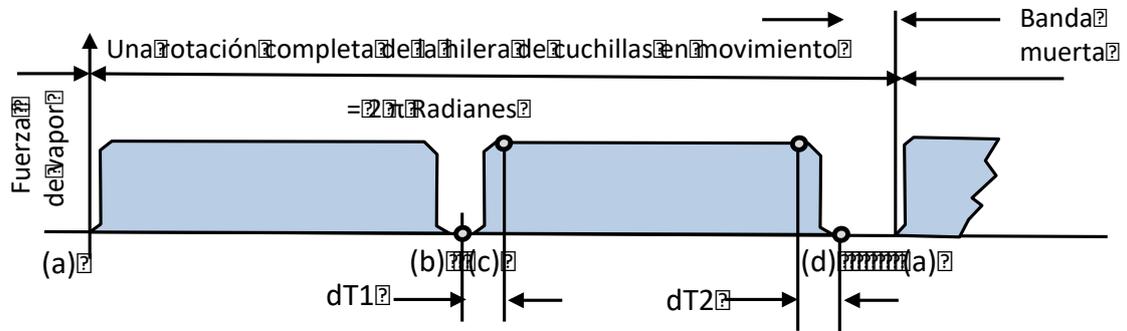


Figura 3-6. Modificación de la representación simple de fuerzas de vapor para reflejar el efecto de la "entrada" y "salida" de los arcos de admisión de la fila de álabes fijos.

En segundo lugar, otro factor que modifica el diagrama de fuerza al entrar en un arco de admisión (porción de la corona de control o estator que descarga flujo) es el efecto que el flujo de vapor produce sobre una sola superficie del paso de un álabe de rotor. Esto se denomina "dip effect". Bajo las circunstancias que se muestran en la Figura 3-7, el vapor comienza a entrar en el paso entre los álabes de rotor. Antes de que el álabe detecte la aplicación de la carga, hay un efecto venturi en la superficie de succión del álabe que tirará del álabe de rotor hacia la fila de álabes estacionarios, tendiendo el álabe de rotor a desplazarse hacia a descargarla del estacionario. Este efecto se muestra como una fuerza negativa "-dF1", que existe justo antes de la aplicación de carga completa sobre el álabe de rotor.

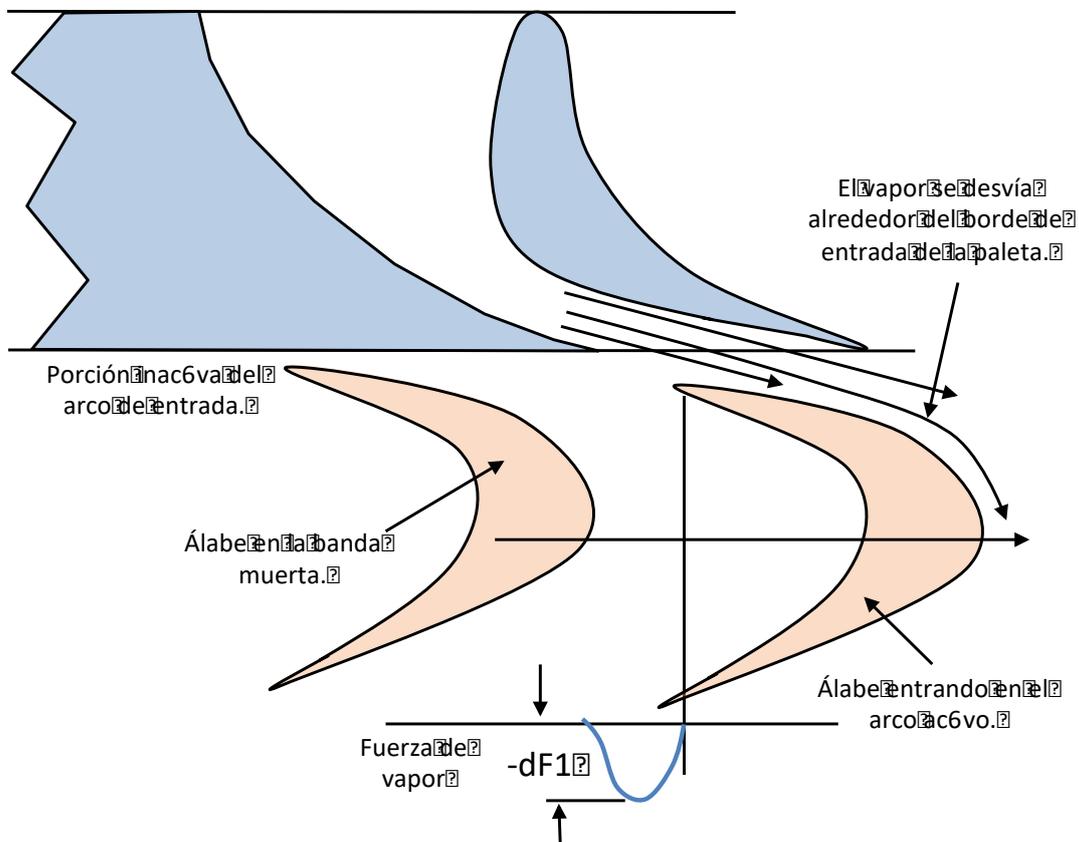


Figura 3-7. Los efectos de la entrada a un arco de admisión desde una "banda muerta", y las fuerzas resultantes en la cara de succión del álabe de rotor

De manera similar, a medida que el álabe se mueve hacia el arco inactivo (banda muerta) y el vapor entra en el paso de los álabes giratorios, por un instante se produce una fuerza sobre la superficie de presión del álabe al salir de un arco activo (Figura 3-8). No hay fuerza de compensatoria en la superficie de succión porque ese álabe está ahora en el arco inactivo y no tiene vapor circulante. Por lo tanto, hay una pequeña fuerza desequilibrante "+dF2" que actúa sobre la hoja. Esto se denomina "overshoot effect". Además, durante el siguiente breve intervalo de tiempo, hay una pequeña presión negativa sobre el álabe debido al flujo que atraviesa el paso. Este efecto se muestra como "-dF3" en la Figura 3-8.

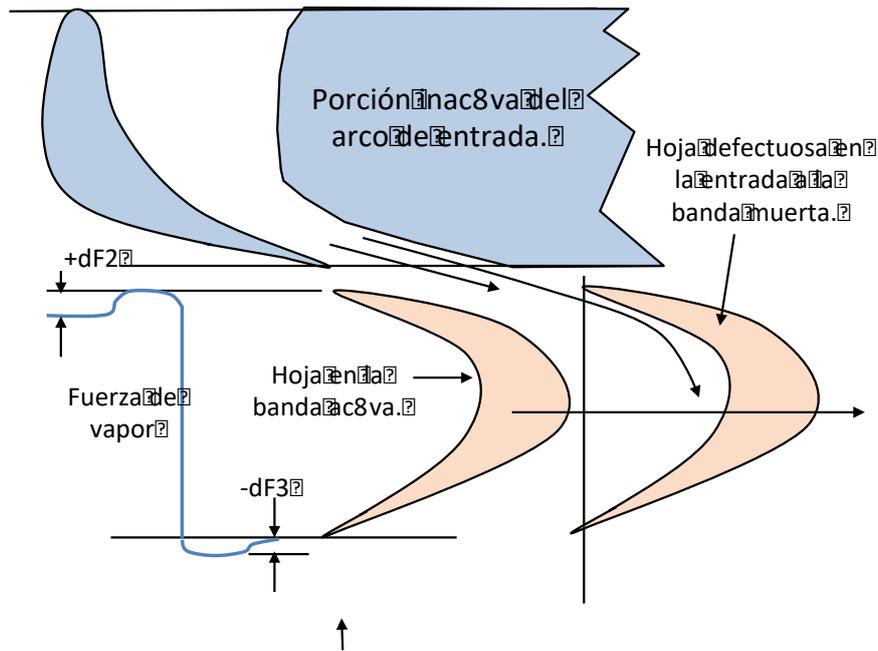


Figura 3-8. El efecto de entrar a una banda muerta desde el arco de admisión, y los efectos de la carga de vapor aplicada a los álabes giratorios.

3.1.2.4 El diagrama de Campbell

La variación de la frecuencia natural de álabes de rotor en función de la velocidad de rotación se muestra en la Figura 3-9. Esta curva se denomina "Diagrama de Campbell". Esta curva lleva el nombre de Wilfred Campbell, quien realizó gran parte de los primeros trabajos sobre vibración en turbinas. Fue el primero en trazar un diagrama que mostraba la variación de la frecuencia del álabe frente a la velocidad de rotación. Para que un álabe funcione correctamente, debe evitar la coincidencia con un estímulo que se repita (X veces) cada revolución, como se muestra en este diagrama.

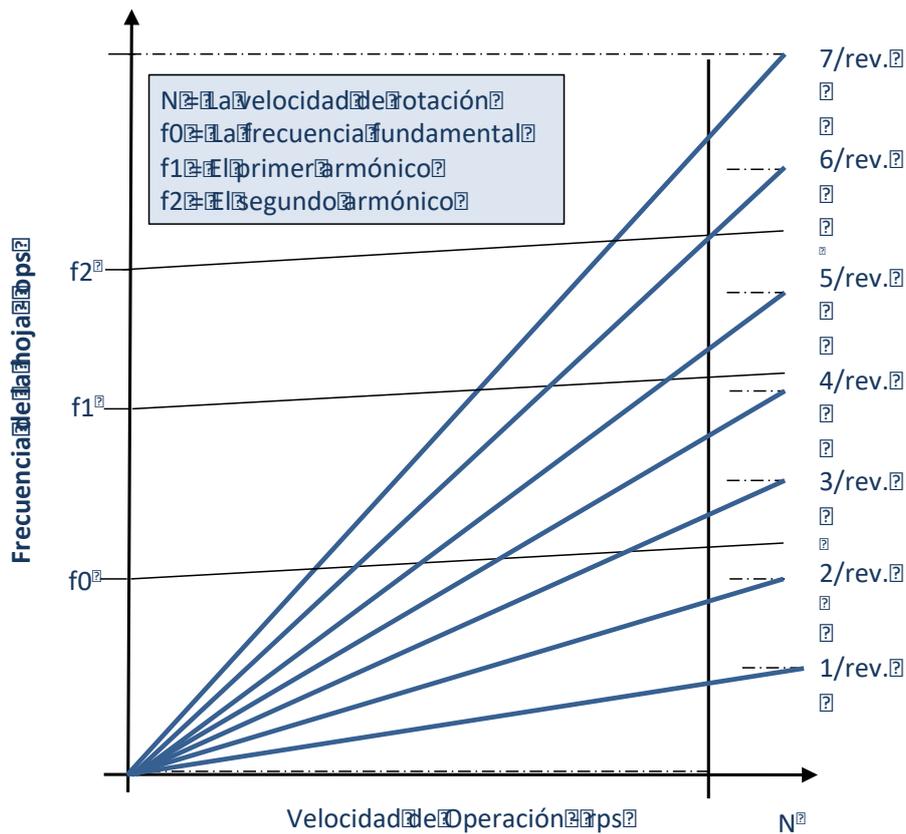


Figura 3-9. Diagrama de Campbell que muestra la relación entre las frecuencias naturales del álabe y la velocidad de rotación del rotor. El diagrama de Campbell indica la interferencia entre la frecuencia de las palas y los posibles estímulos excitantes.

El diagrama de Campbell, al ser una representación gráfica de la variación de las frecuencias naturales (armónicas y fundamental) de los álabes en función de la velocidad de rotación, es utilizado con gran utilidad para determinar la idoneidad de funcionamiento de un álabe para evitar la operación en diversas condiciones, donde podría estar operando en riesgo.

La figura 3-10 (a). muestra el aumento en la frecuencia de los álabes en función de la velocidad de rotación de "0" a " N_r " rps. Si este aumento de frecuencia se agrega a la frecuencia de reposo " f_0 ", entonces se puede ver una curva de Campbell típica para la frecuencia fundamental en la Figura 3-10 (b) para un álabe largo con un valor de 2-3/ rev en su modo tangencial fundamental. Un análisis similar para los armónicos demostrará aumentos en las frecuencias armónicas. El primer armónico (segunda frecuencia) es normalmente el primer modo tangencial, y el segundo armónico (tercer modo) es normalmente el primer torsional. En este diagrama se asume que el tercer armónico (probablemente el segundo modo tangencial) ocurre por encima de 7/rev y no se muestra en este diagrama. En el caso de este álabe, tiene una "frecuencia de parada" fundamental de " f_{o0} ". Esto ocurre a una velocidad de operación de " N_o ." A medida que aumenta la velocidad del rotor, aumenta la frecuencia fundamental del álabe, hasta que a la velocidad de funcionamiento " N_r ", el álabe tiene una frecuencia fundamental de " f_{r0} ". La primera frecuencia armónica se muestra como " f_{o1} " en reposo " N_o ." Esto aumenta a una frecuencia de " f_{r1} " a la velocidad de funcionamiento de " N_r ". De manera similar, el segundo armónico aumenta de " f_{o2} " a " f_{r2} " a la velocidad de operación. En la Figura 4-10 (b), la frecuencia a la velocidad de operación está entre 2 y 3/rev para la fundamental, entre 4 y 5/rev para el primer armónico, y entre 6 y 7/rev para el segundo armónico.

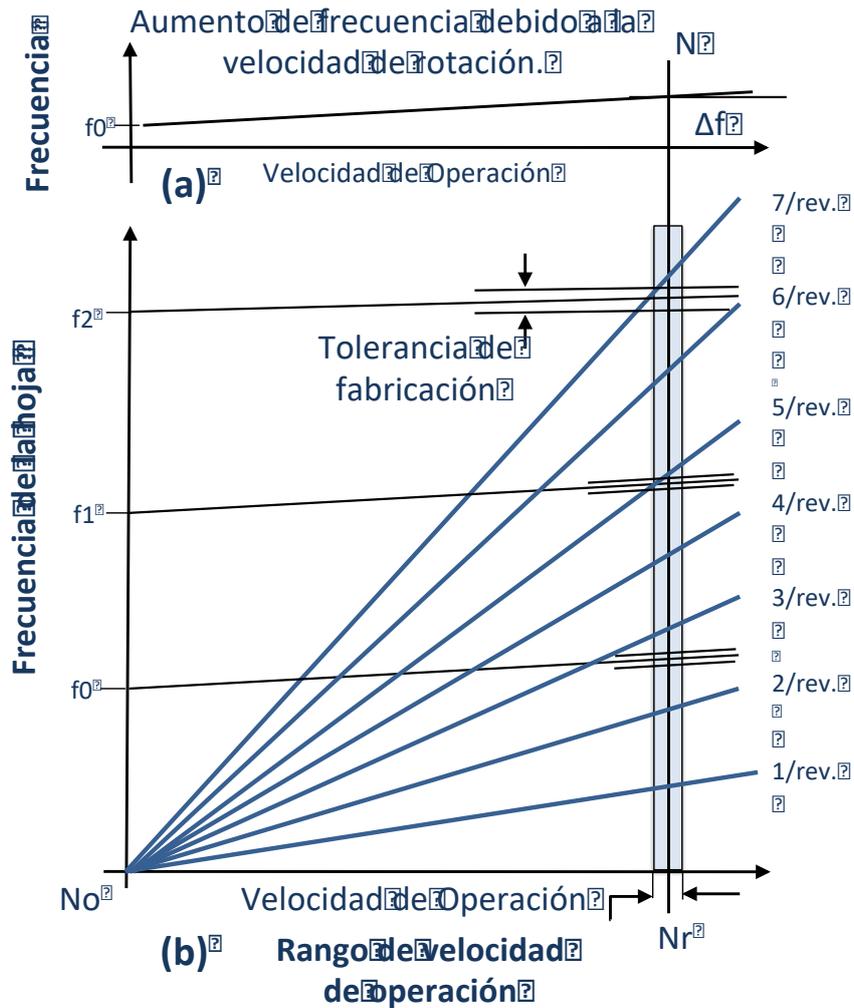


Figura 3-10. El diagrama de Campbell para un álabe con una frecuencia fundamental en 2-3/rev, un primer armónico en 4-5/rev y un segundo armónico en 6-7/rev.

El fabricante de álabes suele determinar las frecuencias naturales de las palas en condiciones de "parada" en los bancos de pruebas (es decir, cuando la velocidad de rotación es "cero"). Esta información se utiliza para predecir la frecuencia a la velocidad de funcionamiento. Además, existen métodos informáticos que permiten determinar la frecuencia de parada mediante métodos de elementos finitos y, a continuación, utilizar estas mismas técnicas para predecir el aumento de la frecuencia con la velocidad de rotación.

3.1.3 Las propiedades de los materiales

Los factores que definen la capacidad de los materiales para resistir cargas de fatiga de alto ciclo se determinan exactamente de la misma manera que todas las demás propiedades mecánicas del material, es decir, mediante ensayos mecánicos. Debido a la importancia de la resistencia del material a la fatiga en la práctica del diseño moderno, se ha acumulado una cantidad considerable de datos sobre los materiales más comúnmente utilizados. Esta acumulación de datos se aplica a los materiales de los componentes de las turbinas, y se considera propiedad de los fabricantes de turbinas que han desarrollado materiales específicos adecuados a su práctica de diseño y aplicación. Gran parte de esta información es de dominio público en lo que respecta a los materiales mecánica y químicamente similares, es decir, está a disposición del usuario de la turbina cuando considera la naturaleza de un fallo, la idoneidad o la sustitución de un material, o cuando realiza alguna otra evaluación o investigación.

Acompañando la fluencia en un material hay un ablandamiento general. Sin embargo, los cambios

son normalmente insuficientes para que esto sea un indicador de que se está produciendo fluencia en cualquier componente o región en particular.

Los componentes de la trayectoria del vapor que tienen más probabilidades de estar sujetos a altos niveles de carga de impulso o fatiga y, por lo tanto, susceptibles a fallas por fatiga de alto ciclo, son los componentes giratorios. Estos son los más susceptibles a daños, porque están sujetos a niveles de tensión directa y cíclica considerablemente más altos que los componentes estacionarios.

3.1.3.1 Datos de los materiales y la curva "S-N" (límite de fatiga)

Los datos básicos requeridos por el ingeniero de diseño incluyen las relaciones que existen entre los niveles de tensión cíclicos a los que está expuesto el componente y el número de ciclos necesarios para ocasionar la falla. Esta relación se ha desarrollado para los materiales más comunes utilizados para componentes de turbinas de vapor que están sujetos a cargas cíclicas de alta frecuencia. Sin embargo, al examinar y aplicar estos datos al análisis del diseño y las investigaciones de fallas, es fundamental reconocer que existen factores que modifican o influyen en estos valores.

Durante la fase de diseño, el diseñador establece los parámetros básicos requeridos de los componentes del paso del vapor. A continuación, el proceso de diseño examina las formas que pueden adoptar los distintos componentes para cumplirlos. Tras una selección preliminar entre las posibles opciones, el diseñador determina los niveles de tensión que se inducirán, y los selecciona y dimensiona para que funcionen con un factor de seguridad adecuado.

Existe una relación entre los parámetros de la tensión alternativa límite y el número de ciclos necesarios para inducir el fallo en cada material candidato para cada componente. Una relación típica se muestra en la Figura 3-11 para un material de acero aleado. Esta curva muestra el número de ciclos hasta el fallo en función del nivel de tensión aplicado. De esta curva se desprende que, a medida que se reducen los niveles de tensión, se alcanza una condición (y por debajo de ella) en la que no se producirá el fallo. Este nivel de tensión se conoce como "límite de fatiga o resistencia". Este nivel de tensión de resistencia dependerá de la temperatura a la que funcione el componente.

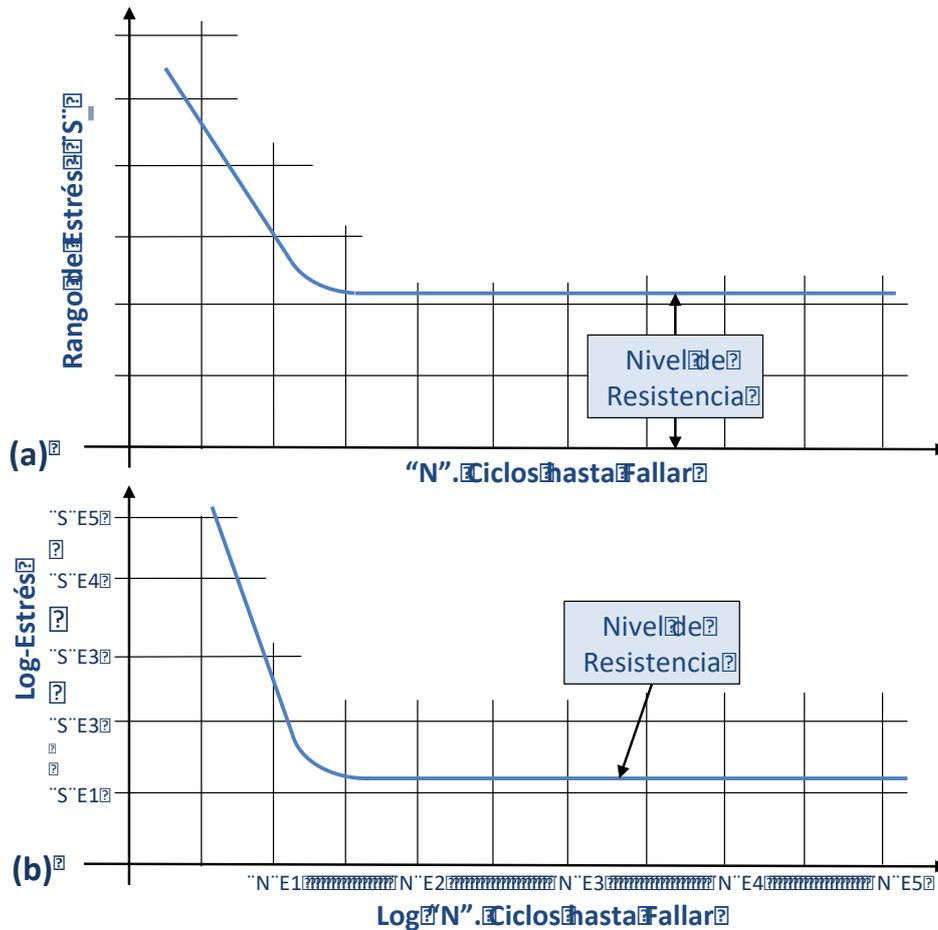


Figura 3-11. La tensión "S" frente al número de ciclos "N" hasta el fallo. La curva (a) representa los datos experimentales de un acero de turbina típico y (b) representa la forma más común de estos datos Log "S" -Log N".

La curva simple "S-N" (ciclos de tensión hasta la falla) de la Figura 3-11 (a) describe la relación básica entre la tensión media requerida para inducir la falla y el número de ciclos necesarios para que ocurra la falla. Sin embargo, una forma más conveniente de representar estos valores es graficar "log S" frente a "log N." Esta curva también define el límite de resistencia.

Si bien los fallos por fatiga pueden iniciarse a partir de una superficie lisa en la turbina de vapor debido a su modo de operación, el fallo por fatiga normalmente se inicia en alguna pequeña irregularidad de la superficie, donde existe una pequeña hendidura u otro defecto anormal de concentración de tensiones, y donde la tensión alterna se convierte en un máximo.

El punto de inicio se desarrollará como una microfisura superficial que, con ciclos de carga repetidos, crecerá en profundidad en función del tiempo. Esta grieta continuará creciendo hasta que la porción restante sin fisuras de la superficie no pueda soportar la carga cíclica impuesta (además de cualquier carga directa) y se produzca la ruptura final. La dirección del crecimiento de la grieta está influenciada por el patrón de tensión y puede haber un cambio aparente en la dirección de la grieta con el tiempo. Este cambio de dirección es causado por el cambio en el patrón de tensión a medida que la grieta modifica la tensión, en términos de magnitud y dirección a la que está sujeto el componente, ya que hay menos superficie de soporte de carga disponible para soportar la carga total.

Cuando las superficies expuestas por una fractura por fatiga de alto ciclo se colocan juntas, las superficies se unirán sin ningún espacio, es decir, no hay deformación plástica, y con el aumento, los cristales individuales del material serán claramente visibles.

Cuando las superficies internas quedan expuestas por una fractura debido a fatiga de alto ciclo se colocan juntas, las superficies se unirán sin ninguna separación, es decir, no hay deformación

plástica, y al ampliarlas se verán claramente los cristales individuales del material.

3.2 Fatiga de Ciclo Bajo (“Low-cycle fatigue”, LCF)

La fatiga de bajo ciclo se distingue del fenómeno del HCF en varios aspectos. La mejor manera de resumirlas es que:

- El número de ciclos necesarios para provocar el fallo es significativamente menor que en el caso del HCF, siendo el tiempo hasta el fallo una función de la magnitud de los niveles de tensión.
- El número de ciclos de tensión para provocar el fallo es significativamente menor que en el caso del HCF. Una orden de magnitud lógico se puede considerar en torno a 10.000 ciclos (límite superior de número de ciclos para ser considerado LCF y límite inferior para HCF). (Aquí se dicen **100.000 ciclos REF:PG 39, aunque yo diría 10.000 ciclos. REF: PG 584**). Sin embargo, esto es simplemente un valor de guía. El aspecto de la superficie y otras características proporcionan una mejor delimitación entre estos dos tipos de fatiga.
- Los niveles de tensión individuales desarrollados en cada ciclo suelen ser considerablemente más altos con los efectos de los ciclos bajos.
- Hay una deformación mecánica en la superficie de fallo, y las marcas de fallo muestran evidencia individual de ruptura, es decir, las tensiones son lo suficientemente grandes como para causar una deformación plástica en el borde de ataque de la grieta.

Otra diferencia importante entre los incidentes de fatiga de ciclo alto y bajo es que la mayor parte del tiempo de falla en el HCF se invierte en el inicio de la grieta, mientras que, en el LCF, la mayor parte del tiempo de falla transcurre en el fenómeno de propagación. Estas grietas (provocadas por LFC) se formarán harán visibles normalmente al principio de la vida de la acción cíclica de falla.

Las formas más comunes de fallo de LCF son las atribuidas a los ciclos térmicos, cuando se producen grandes cambios de temperatura que provocan una expansión o contracción térmica localizada de la superficie del material. Estas transiciones térmicas introducen grandes fuerzas restrictivas internas dentro del material, introduciendo tensiones de una magnitud suficiente para iniciar y conducir a la ruptura.

La Figura 3-12 muestra una grieta típica provocada por LCF que se originó en una esquina aguda dentro de una carcasa de alta presión. Estas grietas pueden repararse normalmente mediante soldadura o grapado (stitching).

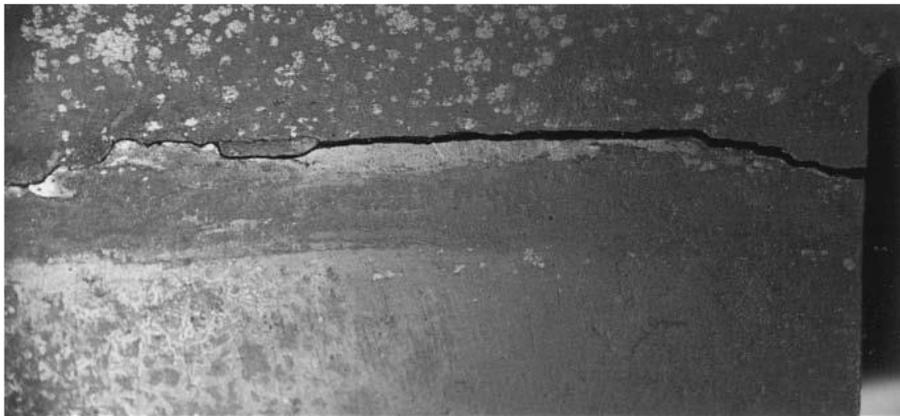


Figura 3-12. Una grieta por fatiga de bajo ciclo en una carcasa de alta presión. Esta grieta se origina en un punto de alta concentración de esfuerzos adyacente al escalonamiento de regulación (nozzle plate)

3.2.1 Los transitorios térmicos

Se produce un transitorio térmico cada vez que hay un cambio (aumento o disminución) en la temperatura del vapor que rodea a los diversos componentes dentro de la trayectoria del vapor. Dependiendo de la extensión o el grado de cambio, se pueden inducir varios niveles de tensión en los componentes debido a cambios internos requeridos en el material a la nueva temperatura, es decir, los componentes se expanden o contraen para cumplir con los cambios de temperatura.

El aumento o disminución de la temperatura del vapor producirá un ajuste de la temperatura de los componentes. La velocidad a la que el calor puede penetrar en ellos o ser rechazado influirá en su distribución interna de temperatura. Por esta razón, una característica importante de los materiales de las turbinas es su conductividad térmica, es decir, su capacidad para conducir el calor desde la superficie a las porciones interiores al calentarse y desde su interior a la superficie al enfriarse. También es importante que una vez que el calor haya alcanzado las superficies del material, pueda irradiarse al vapor o aceptar el calor de un vapor más caliente que rodea las superficies metálicas.

Esta característica del componente y su capacidad para aceptar o rechazar el calor está influenciada considerablemente por el estado de la superficie de los componentes. Esto incluye los depósitos que puedan haberse acumulado, su composición y su espesor. La capacidad de estos depósitos para transferir calor del vapor al metal, y viceversa, puede influir en las tensiones inducidas en los componentes.

Hay una serie de situaciones que dan lugar a transitorios de temperatura dentro de la unidad. Incluyen fenómenos tanto predecibles como impredecibles. Los fenómenos predecibles son una función de la operación, la demanda de carga y otros factores que están bajo el control de los ingenieros del sistema. Eso no garantiza que los transitorios se mantengan dentro de rangos aceptables. Naturalmente, se hará todo lo posible para limitar los cambios de temperatura a niveles y tasas que estén dentro de las especificaciones de diseño; Desafortunadamente, esto no siempre es posible y los requisitos del sistema pueden alejarse ocasionalmente de la prudencia, por lo que la unidad está sujeta a condiciones que contribuyen a la aparición de daños. Si bien estas situaciones no son habituales, debe reconocerse que pueden ocurrir y ocurren.

Los fenómenos más comunes asociados a los transitorios térmicos son aquellos en los que la temperatura del vapor cambia y produce cambios de estrés térmico en los diversos componentes. Estos fenómenos son:

Arranque de la unidad

El proceso de devolver una unidad al servicio después de un apagado depende del tiempo que la unidad ha estado fuera de servicio y de la cantidad de enfriamiento que ha experimentado durante este tiempo. El periodo de parada determinará la velocidad óptima o máxima a la que se pone en marcha la unidad y la velocidad a la que se aumenta la temperatura y la carga. Existen definiciones de arranques "calientes", "templados" y "fríos" que definen estos ritmos.

Apagado de la unidad

Cuando una unidad se retira de servicio por cualquier motivo, se debe controlar la velocidad a la que se reducen las temperaturas del vapor para mantener dentro de niveles aceptables la velocidad a la que se reduce la temperatura de los componentes. Esto está directamente relacionado con el período durante el cual la temperatura del vapor debe mantenerse en la unidad. Esto es particularmente importante si la unidad no se abrirá para inspección o mantenimiento, sino que se volverá a poner en servicio después de un período relativamente corto (por ejemplo, retirar una unidad de servicio durante un fin de semana).

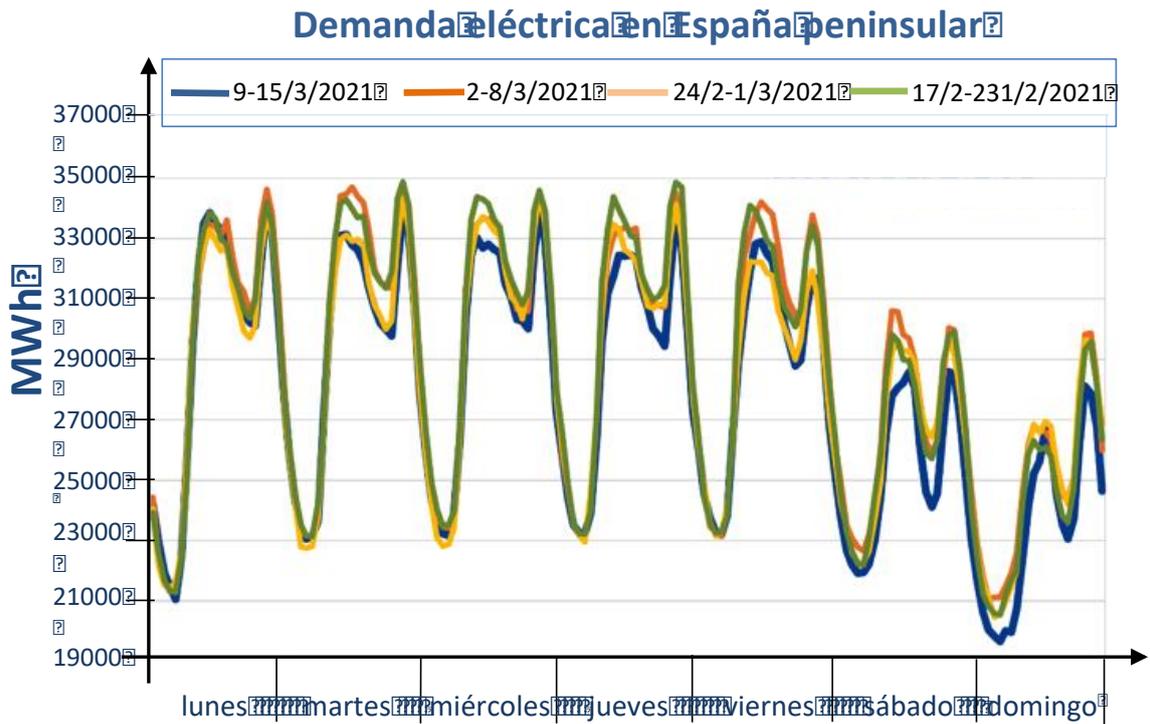


Figura 3-13. Demanda de energía eléctrica peninsular de varias semanas completas diferentes.

La medida en que se apaguen las unidades dependerá de la demanda de carga, que a su vez depende en gran parte de las condiciones ambientales de temperatura y humedad. La carga residencial es relativamente constante de un día a otro, pero hay variaciones definidas entre los fines de semana y los días entre semana (así ocurre en el sistema eléctrico de España peninsular, Figura 3-13). La carga industrial elevada está presente durante los días entre semana. Además, existen diferencias considerables entre los picos de verano e invierno, cuando las demandas de calefacción y refrigeración están presentes de distinta manera.

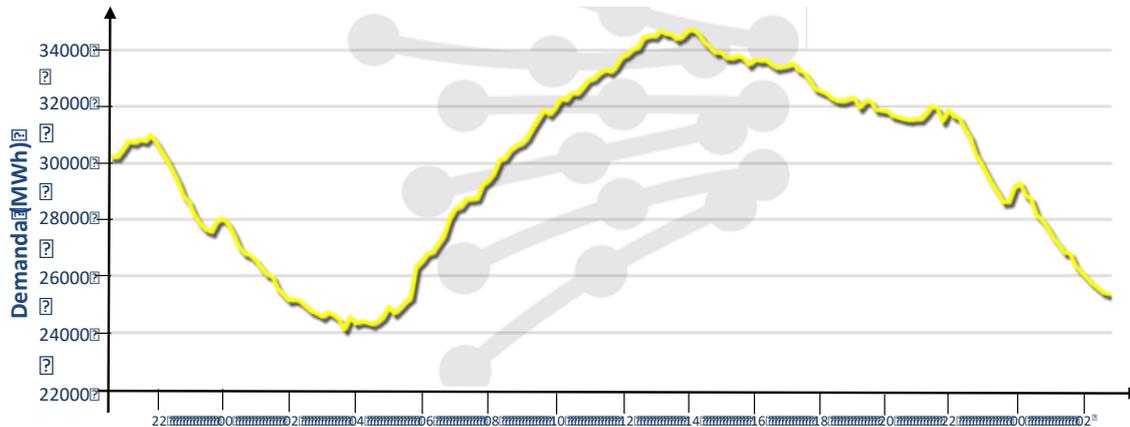


Figura 3-14. Demanda de energía eléctrica peninsular de un día de enero.

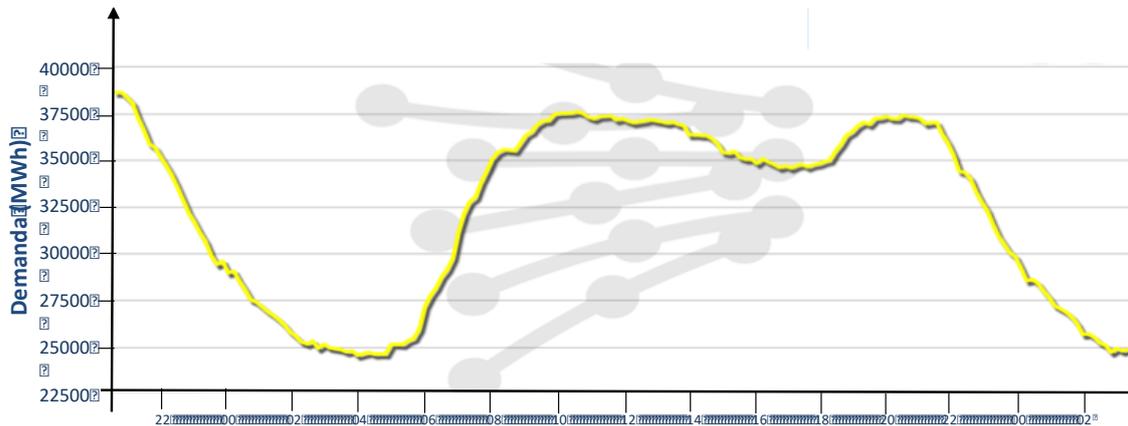


Figura 3-15. Demanda de energía eléctrica peninsular de un día de julio.

Cambios de carga impuestos por el sistema

La modificación de la potencia de una o varias unidades permite adaptarla a los cambios en la demanda de carga. Estos cambios dependen de la hora del día y del día de la semana. La Figura 3-15 muestra la variación en la demanda de España peninsular durante un día de invierno. En ella hay un aumento en la demanda correspondiente a los picos matutinos y vespertinos cuando los hogares utilizan la calefacción. En cambio, en verano (Figura 3-14), el pico corresponde al uso de la climatización en las horas de más calor del medio día y la tarde. Si bien no es práctico apagar una unidad para variaciones de un día, sí requiere que ciertas unidades se desconecten durante la noche y luego se reinicien todos los días de la semana para satisfacer los picos de demanda.

Ensayos de rechazo de cargas y ensayos de válvulas.

No es raro que las unidades se sometan a ciertos tipos de pruebas, suficientes para garantizar que los dispositivos de seguridad y protección estén operativos. Estas pruebas pueden incluir pruebas de válvulas, controles y ajustes de exceso de velocidad, pruebas de rechazo de carga y algunas otras pruebas específicas para una instalación en particular, todas ellas causarán una redistribución de temperaturas a lo largo de la ruta del vapor. Si se planifican estas pruebas y se conoce el alcance de la variación de temperatura (si ocurre), sus resultados pueden tenerse en cuenta en la recopilación de datos conocidos por el personal operador.

Por otro lado, las situaciones impredecibles pueden causar gradientes térmicos excesivos en una gran cantidad de componentes. Esto puede ocasionar daños importantes. Si bien es poco probable que un solo incidente cause fallas, puede contribuir a la generación de daños, que son acumulativos y pueden acortar la vida útil de la unidad. Las situaciones más comunes que pueden ocurrir en servicio (y producir variaciones de temperatura del vapor) incluyen las siguientes:

Desviaciones de la caldera

Los sistemas de atemperación de la caldera controlan las temperaturas de descarga de la caldera y del recalentador. Los problemas asociados al funcionamiento de estos sistemas pueden provocar fluctuaciones excesivas de temperatura dentro de la turbina. Estas situaciones pueden provocar un calentamiento y un enfriamiento más allá de los límites de diseño, y tienen el potencial de inducir altos niveles de estrés.

Exceso de batimiento por cierre de válvula defectuoso

En el caso de que se produzca un cierre de las válvulas de entrada a la turbina (corte) o de las válvulas interceptoras debido a algún tipo de fallo mecánico o eléctrico en el sistema de control, es posible que el vapor quede atrapado en la sección de alta presión de la unidad. En estas condiciones, cuando el rotor siga girando, se producirá un "calentamiento por batido del vapor" que provocará que la temperatura del vapor aumente. Esta situación puede ser muy grave y, en caso de producirse,

debe evaluarse el estado de todos los álabes de la sección.

Rechazos de carga

En el caso de una interrupción del sistema y un rechazo de carga, hay una secuencia de eventos que tiende a elevar la temperatura del vapor en la unidad de turbina. Hay que tener en cuenta dos conjuntos de circunstancias:

- La unidad no alcanza la sobrevelocidad. En esta circunstancia, las válvulas de control se cierran, pero las válvulas de cierre principales permanecerán abiertas. Las válvulas de control seguirán admitiendo vapor a la unidad, reduciéndola lentamente a la velocidad normal de funcionamiento cuando la unidad pueda volver a conectarse al sistema, suponiendo que éste esté operativo y pueda aceptar la carga. Aunque la unidad siga recibiendo vapor, habrá una mala distribución de la temperatura en todo el recorrido del vapor y algunos elementos estarán sometidos a gradientes de temperatura excesivos
- La unidad pasa a sobrevelocidad (embalamiento). Si la unidad pasa a la sobrevelocidad, las válvulas de control y de parada se cerrarán y habrá vapor en la unidad, lo que provocará cierto calentamiento por el efecto del batido del vapor. Los drenajes de vapor de la unidad liberarán la presión y descargarán el vapor fuera de las secciones, pero seguirá habiendo calentamiento causando transitorios térmicos en los componentes de la turbina.

Ante estas situaciones es de vital importancia la efectividad en el funcionamiento de la válvula de ventilación. Normalmente, la válvula de ventilación se sitúa en el conducto de vapor entre las válvulas de control y el cuerpo de alta presión. Esta válvula, en disparos de la unidad, posibilita el sangrado hacia el condensador del vapor que queda atrapado en el cuerpo de alta presión, evitando de esta manera el batido del vapor en el cuerpo de alta presión, así como el embalsamiento. Esto se puede observar en la Figura 3-16.

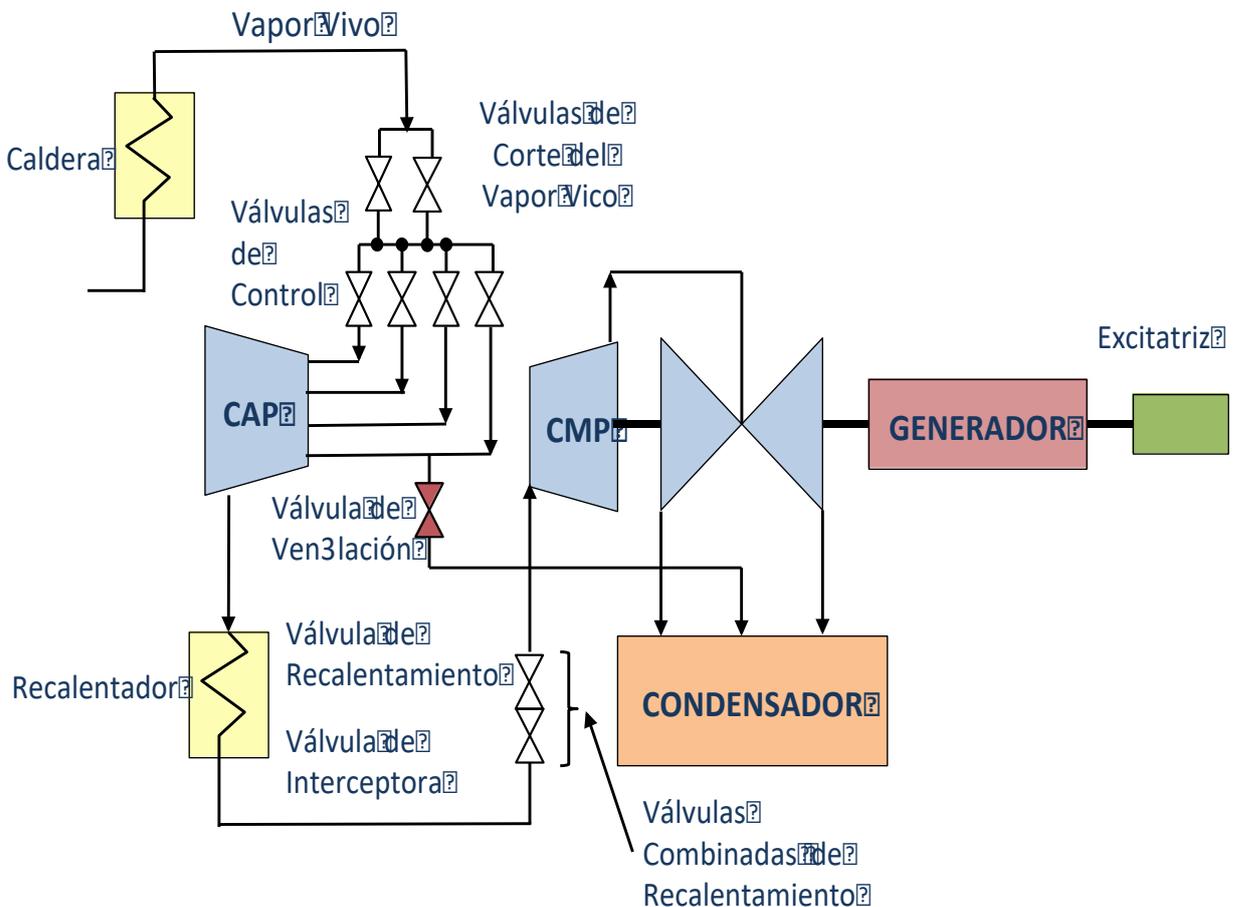


Figura 3-16. Esquema con la disposición de las distintas válvulas. Se puede observar (en rojo) el

lugar de la válvula de ventilación.

3.3 Fluencia

La fluencia es un fenómeno material que afecta las regiones de alta temperatura de la trayectoria del vapor y los componentes expuestos a un esfuerzo de tracción o cortante. Más exactamente, la fluencia se define como "fluencia a alta temperatura", ya que, aunque los materiales sometidos a tensión se deforman a todas las temperaturas, es solo a temperaturas más altas que estas deflexiones y, en última instancia, las rupturas del material debido a la tensión se vuelven significativas. Es necesario entender que cuanto mayor sea la temperatura del componente, más rápida será la deflexión por fluencia y más rápido ocurrirá la falla final.

Los aceros sometidos a temperaturas elevadas durante largos periodos de tiempo presentan cambios en su microestructura. Esto tiene un marcado efecto en las características de fluencia del material. En condiciones de alta tensión, los fallos son normalmente transgranulares. Sin embargo, a temperaturas elevadas y con la aplicación de esfuerzos de tracción, es habitual que se produzcan fallos intergranulares debido a los efectos de la fluencia. La fluencia es un mecanismo de "deslizamiento" granular dentro del material que se produce en los límites de grano. Este deslizamiento provoca una distorsión plástica de los componentes que no se elimina cuando se retira la tensión del componente.

El proceso de diseño conoce y permite la deformación por fluencia en aquellos componentes y regiones donde puede ocurrir. Si se dan las condiciones suficientes para que se produzca la fluencia en un componente, éste sufrirá los efectos de la deformación por fluencia. Lo que se hará en el proceso de diseño en tales situaciones es determinar el material, las dimensiones y otras características necesarias para que el componente se deforme en tal grado que pueda tolerarse durante la vida útil de la unidad. Sin embargo, es necesario considerar, una vez más, que la unidad puede operar más allá de sus tolerancias de diseño. Bajo esa situación, podrían ocurrir fenómenos de fluencia y deflexión de alto grado que estén más allá de un límite aceptable.

Para que un componente se vea afectado por la fluencia y para que la distorsión sea significativa, es necesario que haya presente una tensión, ya sea unidireccional o multidireccional, y que esta tensión se aplique de forma constante durante periodos extensos de funcionamiento. La deformación por fluencia que resulta puede ocurrir a diferentes velocidades y normalmente, por definición, se divide en fases o estadios. Estas son la primaria, la secundaria y la terciaria. Esto significa que las tasas de fluencia no son constantes, sino que varían con el tiempo. La fase primaria es rápida, pero a medida que la velocidad de fluencia entra en la fase secundaria, la deformación se ralentiza a un valor casi constante antes de acelerar hasta fallar en la fase terciaria.

Sin embargo, en la mayoría de los casos dentro de la turbina de vapor, la presencia de fluencia es identificable mucho antes de que el daño se extienda al grado de ruptura mecánica.

Para que la deformación por fluencia se considere significativa dentro de la trayectoria del vapor de la turbina, no es necesario que se haya producido una ruptura mecánica, o incluso que se hayan formado grietas. Esto se debe a que en muchos lugares dentro de la unidad hay espacios libres de funcionamiento relativamente pequeños entre las partes estacionarias y giratorias. Si hay rozamientos debido a la deformación por fluencia, pueden producirse daños importantes en los componentes principales involucrados. Si bien los rozamientos no deben ocurrir en la fase primaria de deformación por fluencia, y la deformación de un componente bien diseñado nunca debe ingresar a la fase terciaria, debe ser responsabilidad del ingeniero de diseño seleccionar la geometría del componente para que la deformación durante la fase secundaria no provoque dicho contacto por rozamiento.

La tasa de fluencia para cualquier componente, bajo un conjunto definido de condiciones operativas, depende de dos parámetros principales: el nivel de tensión y la temperatura operativas.

El nivel de estrés operativo. Los niveles de tensión experimentados por cualquier componente dependen de una serie de variables, incluidas las caídas de presión del vapor, las velocidades de

rotación y las tasas de flujo de vapor. Cada uno de estos parámetros puede modificarse durante el funcionamiento y, por lo tanto, puede modificar los niveles de tensión locales. La tensión desarrollada en cualquier componente o parte de la unidad también puede variar durante el funcionamiento.

Una consecuencia de la variación transitoria de estos parámetros operativos es que pueden causar una deformación (elástica) temporal local. Si bien no es permanente, puede, a su vez, desembocar en deflexión o distorsión instantánea severa durante el transitorio, de modo que podría iniciarse un daño mecánico. Esta falla puede no haber ocurrido si la deformación por fluencia (deformación plástica) existente posee una severidad baja en el momento del transitorio.

La temperatura de funcionamiento. La temperatura del componente a medida que se aplica la tensión influye en la capacidad de los materiales para resistir las tensiones aplicadas y, por lo tanto, la temperatura determina en gran medida la velocidad a la que se producen las deformaciones por fluencia. Conforme aumenta la temperatura del componente, aumenta la velocidad de fluencia. Por esta razón, es necesario controlar las temperaturas del sobrecalentador y recalentador de la caldera, y mantenerlas dentro de los niveles especificados por el diseño. Estas restricciones impuestas por el diseño, aunque parecen estrictas, están destinadas a extender la vida útil de los componentes individuales y, por consiguiente, la de la unidad.

Al igual que en el caso de los transitorios de tensión, las consideraciones de los transitorios de temperatura son importantes, ya que pueden representar una variación temporal pero posiblemente peligrosa con respecto al modo de funcionamiento especificado por el diseño.

Si bien el proceso de diseño reconoce, intenta anticipar y luego permite la posibilidad de transitorios durante la vida operativa normal de la unidad de turbina, sus efectos acumulados sí que pueden resultar en daños sufridos por los componentes o (en el caso más severo) fallas en la unidad, conllevando esto el tener que efectuar una parada forzada. El proceso de diseño debe tener en cuenta los efectos de los transitorios dentro de unos niveles de estrés y debe aplicar lo que la experiencia ha indicado como un rango de seguridad adecuado. Sin embargo, en última instancia, es responsabilidad del ingeniero operador limitar, en la medida de lo posible, la aparición de transitorios que pueden reducir la vida útil de la unidad.

No es habitual que los elementos funcionen durante periodos de tiempo relativamente elevados después de entrar en la región terciaria de fluencia y que fallen, ya que el daño es normalmente evidente antes de que se alcance este nivel de daño. La Figura 3-17 muestra el bloque de muescas en una etapa de alta presión en la que la carga centrífuga del álabe está provocando una deformación por fluencia del material del perno y la rueda en un rotor de tambor. Este daño presenta un aumento de la holgura entre el bloque de fijación y la propia rueda. Este tipo de holgura es habitual, pero no indica necesariamente que vaya a producirse un fallo. La anchura de la holgura debe controlarse hasta que se forme una holgura máxima estipulada.

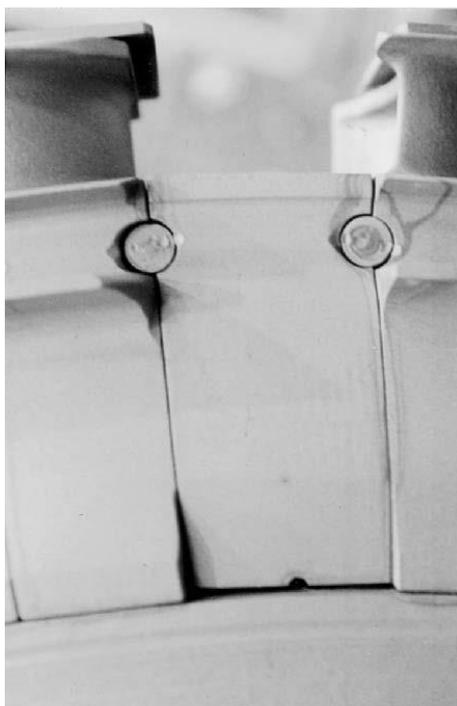


Figura 3-17. El bloque del tambor de una etapa de alta presión que se ha deslizado radialmente bajo la influencia de la carga centrífuga.

3.3.1 Deformación por fluencia

La fluencia es una deformación plástica lenta. Ocurre en cualquier componente sometido a estrés durante períodos prolongados. Esta tensión puede estar en un nivel constante o fluctuar, pero la tensión debe estar en la misma dirección en todo momento para causar deformación. Las tensiones requeridas para causar esta deformación del material son mucho más bajas que los valores requeridos para causar fallas cuando se aplican repentinamente.

La velocidad a la que se produce la deformación en condiciones de fluencia se define como que se produce en tres fases separadas. Aunque no son completamente distintos en ningún material, pueden reconocerse a partir de una curva característica de “deformación por fluencia vs tiempo” (Figura 3-18). Esta curva se elabora asumiendo que tanto el estrés como la temperatura se mantuvieron constantes durante el período de ensayo.

Es de vital importancia tener claro que la deformación por fluencia es una deformación plástica del material, es decir, el material no se recupera cuando se retira la carga. Por el contrario, la deflexión es una deformación elástica, es decir, el componente sí recupera, a medida que se quita la carga, su forma original.

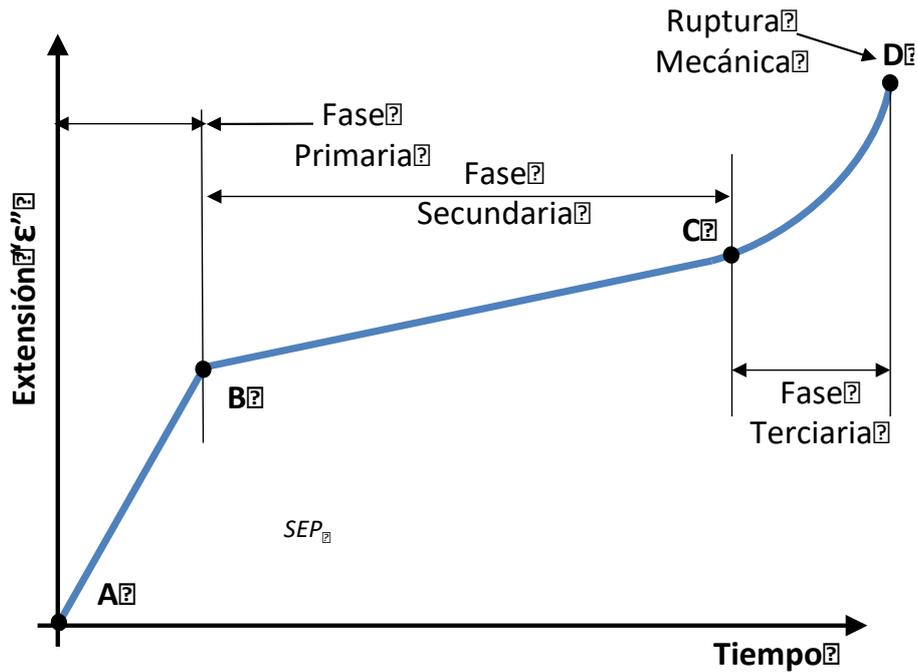


Figura 3-18. Fases de la deformación por fluencia hasta la rotura mecánica.

Las tres fases que se distinguen en la deformación por fluencia son las siguientes detalladas a continuación.

- Fase primaria, "A-B". Durante esta fase inicial, se produce una deformación relativamente rápida con la aplicación de una carga constante, normalmente a una velocidad ligeramente decreciente. La tasa de deformación es inicialmente rápida porque las ubicaciones más débiles dentro de los límites de grano son las primeras en fallar, ya que lo hacen con cargas relativamente más pequeñas.
- Fase secundaria, "B-C". Después de esta deformación inicial (fase primaria "A-B"), la tasa de fluencia disminuye a una tasa relativamente constante. Después de las fallas iniciales de los límites de grano, hay una serie continua de rupturas a medida que ocurren más grietas en los límites y menos cristales metálicos soportan la carga. Durante este tiempo, la deformación continúa, pero hay poca o ninguna aceleración de la velocidad de deformación.
- Fase terciaria, "C-D". A medida que la deformación entra en la fase terciaria, la velocidad de deformación se acelera hasta que se alcanza la condición "D", momento en el que se produce la rotura mecánica. En la condición "D", el material ya no puede soportar la carga aplicada debido a las rupturas de los límites de grano.

3.3.1.1 Familia de curvas características

Si se considera una familia de curvas de deformación por fluencia para un material de un componente bajo carga constante, pero a diferentes temperaturas. Se obtiene una serie de curvas características (Figura 3-19). En estas cuatro curvas, $T_1 > T_2 > T_3 > T_4$, a medida que aumenta la temperatura, también lo hace la velocidad de fluencia o deformación.

Observando la gráfica que representa las diferentes curvas se pueden comentar una serie de puntualizaciones interesantes:

- A temperaturas más altas, la tasa de fluencia es mayor en cada una de las tres fases.
- A todas las temperaturas, la cantidad de tiempo en la fase primaria es aproximadamente la misma, pero la deformación total es algo mayor a temperaturas más altas.
- El tiempo en la fase secundaria se reduce a medida que aumenta la temperatura, de modo que la deformación por fluencia entra en la fase terciaria con una deformación total menor.

- La vida útil total del componente se reduce a temperaturas de funcionamiento más altas.

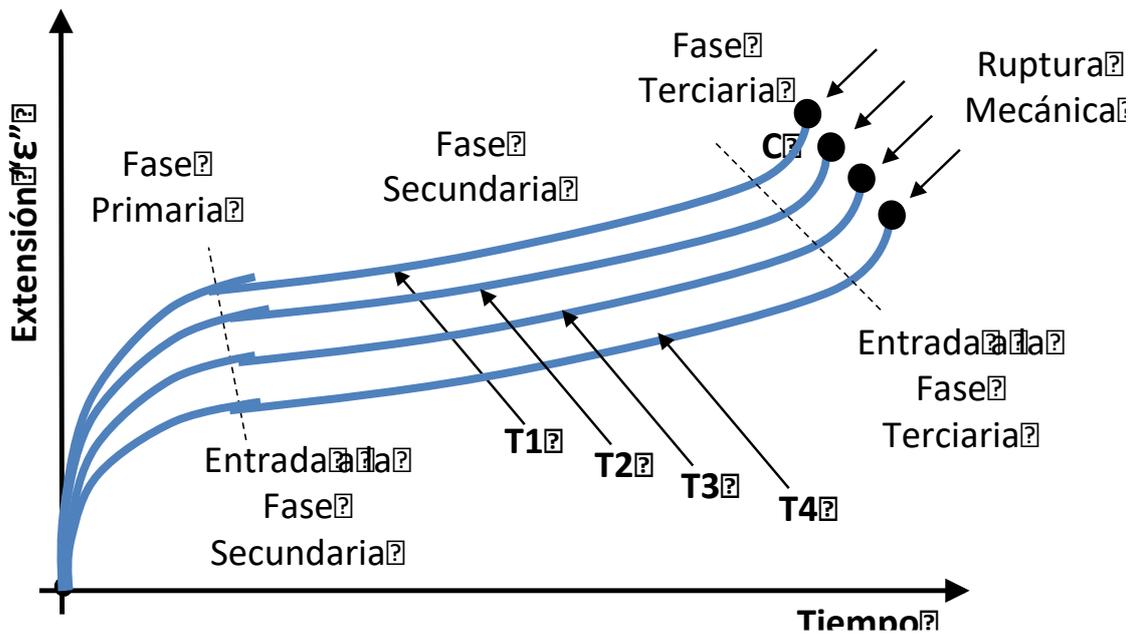


Figura 3-19. El efecto de la temperatura en las curvas características de deformación por fluencia a lo largo del tiempo

Se puede construir una familia similar de curvas para un material mantenido la temperatura constante y ensayando a diferentes niveles de tensión.

Como las curvas características salen de una fase y entran en la siguiente, la forma exacta de la curva es difícil de definir. Se describe mejor como un cambio en la tasa de deflexión por fluencia. Debido a que las curvas son el resultado de datos experimentales, es posible que no sean precisas, pero brindan al ingeniero de diseño suficiente información para que se puedan hacer predicciones de vida con un grado razonable de precisión.

Por el hecho de que las curvas características abandonan una fase o estadio y entran en la siguiente, la forma exacta de la curva es de difícil definición. La mejor manera de describirla es como un cambio en la velocidad de deformación por fluencia. Dado que las curvas están basadas en datos experimentales, muy posiblemente no serán precisas, pero proporcionan al ingeniero de diseño suficiente información para que puedan hacerse predicciones de vida útil con un grado razonable de precisión.

A la hora de definir las propiedades de fluencia requeridas de cualquier material utilizado para un componente de turbina de vapor, es necesario saber que los materiales de grano grueso se deslizan a una velocidad menor que aquellos con una estructura de grano fino.

Desafortunadamente, un componente que se va a someter a una carga de fluencia puede ser manufacturado a partir de un material de grano fino (ya que le permite cumplir con otros requisitos de diseño). Hasta cierto punto, esto compromete las características del material con el que está construido el componente para soportar la fluencia. Por ello, estas consideraciones requieren una revisión detallada y una evaluación del material. Esta es una evaluación que el ingeniero de diseño debe realizar teniendo en cuenta la especificación inicial de los materiales que se utilizarán para cualquier aplicación en particular, considerando que el potencial de fluencia del componente debe ser contrarrestado por otras modificaciones o parámetros de diseño.

Por otro lado, es interesante indicar que la mayoría de los aceros para turbinas se funden entre **750-800 °C**. Cuando se utilizan en el rango de alta temperatura, es normal considerar que la deformación por fluencia podría ocurrir en aquellos componentes con una temperatura de funcionamiento igual o superior a unos **400 °C**, y su diseño se considera para que se pueda producir deformación por fluencia para, de esta manera, proporcionar un factor de seguridad.

Estos componentes están normalmente diseñados para proporcionar una "vida útil mínima" de unas 200.000 horas. Esto se puede traducir a una vida útil de aproximadamente 30 años, con un factor de carga del 75%.

3.3.2 Fluencia en los componentes del paso del vapor

Dado que muchos componentes de la trayectoria de vapor de la turbina están sujetos a cargas continuas y temperaturas elevadas, es por ello por lo que se debe esperar que ocurra algún nivel de deformación por fluencia durante su vida operativa. En esta sección considerará aquellos componentes susceptibles de sufrir este patrón de daño.

Álabes de rotor

Las cuchillas giratorias están sujetas a cargas continuas durante el funcionamiento. En las primeras etapas de las secciones de alta presión y recalentamiento de la unidad, estas cargas se aplican a temperaturas lo suficientemente altas como para que se produzca deformación por fluencia. El alcance de esta deformación y la necesidad de reemplazar los álabes como consecuencia de esto depende de varios factores, por ejemplo, la magnitud de la carga y el tiempo durante el cual los álabes han estado en funcionamiento.



Figura 3-20. Raíz del álabe de la etapa de control que ha sufrido daños por fluencia.

La Figura 3-20 muestra un álabe de la etapa de control de una sección de alta presión con una temperatura de vapor inicial de 600 °C, y que ha estado en servicio durante 160,000 horas. Este álabe, bajo la influencia de la tensión y la temperatura durante un tiempo prolongado, finalmente se ha deformado hasta que las superficies de soporte carga del álabe han comenzado a desplazarse. Esta acción ha dañado el acople de la raíz en la ranura de la rueda. En la Figura 3-21 se ilustra la deformación por fluencia de una raíz de álabe similar, en esta figura se puede observar la condición operativa inicial y final, con el respectivo desplazamiento debido a la fluencia.

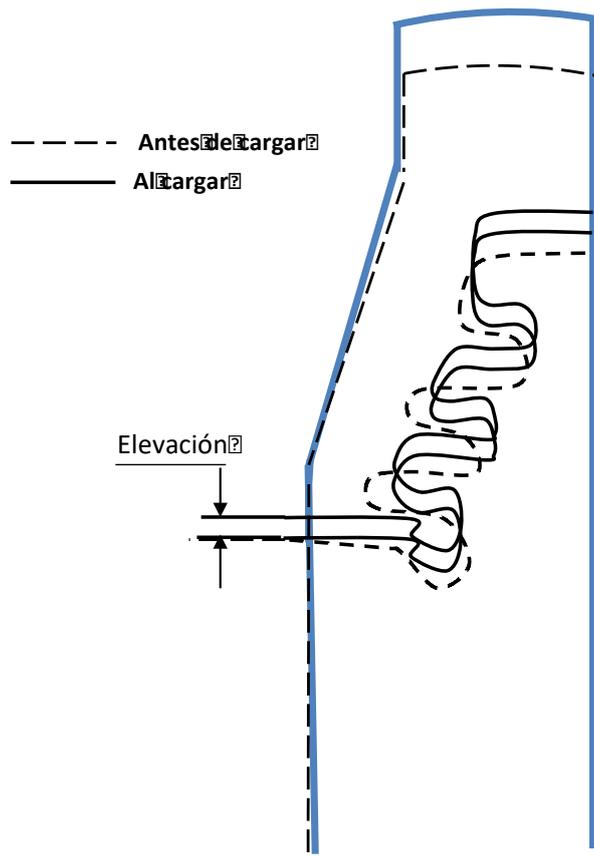


Figura 3-21. Deformación por fluencia en una raíz del mismo tipo que la mostrada en la Figura 3-20

Otro factor que puede inducir daños en cualquier componente, pero especialmente en los álabes giratorios, es el incumplimiento de ciertas tolerancias dimensionales especificadas en el diseño. La Figura 3-22 muestra el acoplamiento de un álabe de la primera fila de álabes giratorios de una sección de recalentamiento, cuya temperatura de recalentamiento es de unos 550 °C. En esta unidad se produjo un error de manufactura, como consecuencia se tiene el agujero en el acople la raíz. Esto provoca no tener suficiente superficie para transferir la carga del álabe.

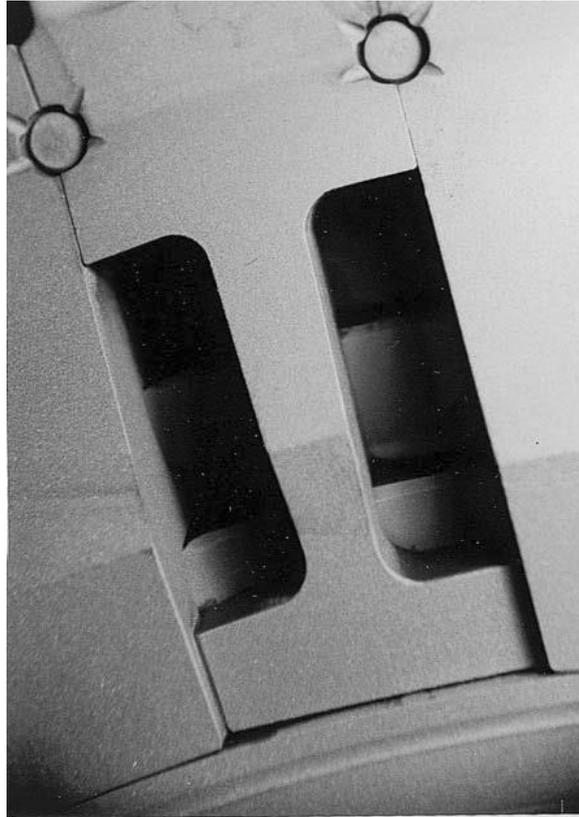


Figura 3-22. Acoplamiento de la raíz con error de manufactura que ha sufrido fluencia

En general, las cuchillas giratorias de alta temperatura se fabrican con materiales inoxidables de tipo martensítico (altamente aleado con cromo). Sin embargo, existen algunas aplicaciones de alta temperatura/alta presión en las que se puede emplear un material de tipo austenítico (además de cromo, aditivado con otros elementos como son el Níquel, el Manganeso y el Nitrógeno; dándole mayor resistencia a la oxidación). Una preocupación con los materiales austeníticos es que tienen un coeficiente de dilatación diferente. Es necesario tener en cuenta esta diferencia durante la fase de diseño para garantizar que, en condiciones térmicas transitorias, la unidad sea capaz de adaptarse a estas diferencias y a su posible efecto en la distribución desigual de la carga entre las superficies soporte de cargas.

Es crucial tener en cuenta que, al reemplazar los álabes giratorios para una etapa debido a un fenómeno de fluencia, es preferible cuantificar cualquier deformación por fluencia que se haya producido, ya que si se manufacturan los álabes con dimensiones originales puede no permitir una distribución de carga equitativa entre las distintas superficies de transferencia de carga en el acople.

Rotores

Los rotores, como otros componentes sujetos a alta temperatura y presión, están sujetos a deformaciones por fluencia. Este daño ocurre con mayor frecuencia en regiones del rotor donde las tensiones son altas. En la mayoría de los casos, los efectos más importantes de la fluencia se dan en las regiones donde la carga se transfiere desde la raíz del álabe hasta la llanta del rotor. La Figura 3-20, que ya fue comentada, muestra la ranura de una rueda donde la raíz del álabe se ha deformado, posibilitando un desprendimiento inminente del álabe. Es más, el propio acople de la rueda también se ha deformado debido a la fluencia.

Los rotores de alta temperatura tienen una forma compleja y es posible que la temperatura y las tensiones más altas no se produzcan en la ubicación comentada. Sin embargo, normalmente hay suficiente coincidencia como para que la fluencia tenga una alta probabilidad de ocurrir, aunque solo sea en un grado relativamente bajo.

El rotor también puede sufrir daños como consecuencia de una "fatiga por fluencia" combinada, acción simultánea de fluencia y fatiga de alto ciclo.

Diafragmas

Los diafragmas se fabrican en tres partes: un anillo exterior, un anillo de álabes que consta de varios elementos y un soporte interior. Cada uno de estos tres componentes del diafragma está sujeto a la diferencia de presión de la fila de álabes estacionarios. El anillo exterior se apoya contra la ranura ubicada en la carcasa y no se deforma bajo el efecto de la presión. Sin embargo, tanto los álabes (producidas a partir de un acero martensítico de las mismas propiedades mecánicas y químicas generales que las cuchillas giratorias) como el soporte interior están sujetos a presión diferencial y acabarán sufriendo una deformación elástica y, si están a temperaturas suficientemente altas, una deformación plástica o de fluencia.

Cuando el vapor se introduce inicialmente en la unidad, se producen tensiones en el diafragma. Estas tensiones iniciales inducidas en los diversos componentes del diafragma son de poca importancia en sí mismas. Sin embargo, las cargas axiales, aunque no son elevadas, dan lugar a una deflexión del diafragma en la dirección del flujo. La Figura 3-23 muestra la deflexión de un diafragma en el diámetro interior. Las tensiones máximas que se producen en un diafragma debido al diferencial de presión que experimenta, se producen en el elemento a lo largo del eje "XX", que está a 90° del eje "YY" o junta horizontal. También puede verse en este diagrama que la máxima deflexión no se produce en el eje de máxima tensión, sino en la junta horizontal que, durante el funcionamiento, recibe menos apoyo del material adyacente que la línea central vertical "XX".

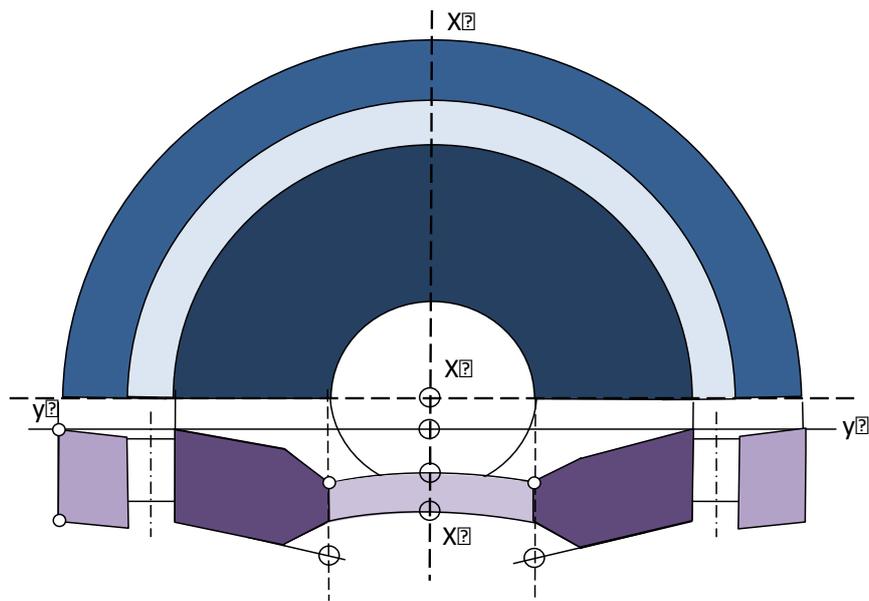


Figura 3-23. Deflexión del diafragma, siendo el máximo en el diámetro interior de la junta horizontal.

Los anillos exteriores y el soporte interior en las regiones de alta temperatura se producen a partir de acero de aleación forjado de alta resistencia. La principal preocupación con la fabricación de diafragmas es la capacidad de estos componentes para resistir durante períodos prolongados las altas temperaturas, las presiones axiales desarrolladas a través de ellos. El anillo exterior está ubicado en la carcasa para formar una junta hermética al vapor que no se desviará en un grado significativo. Sin embargo, tanto los álabes como el soporte interior se deflectarán corriente abajo por la influencia del gradiente de presión axial. Por lo tanto, es necesario considerar el efecto del tiempo operando con deflexión y la influencia que esto tendrá en las holguras axiales dentro del paso del vapor.

Los diafragmas tienen, en comparación con los componentes giratorios, niveles relativamente bajos

de tensión inducida en ellos. Es poco probable que estos componentes fallen de manera catastrófica. Sin embargo, cuando el vapor ingresa a la unidad, existe un esfuerzo diferencial de presión inducido en los álabes y el soporte interno que hará que se defleccione corriente abajo. Cuando una unidad entra en servicio, cada diafragma experimentará una deflexión elástica inicial seguida de una deformación plástica dependiente del tiempo y la temperatura.

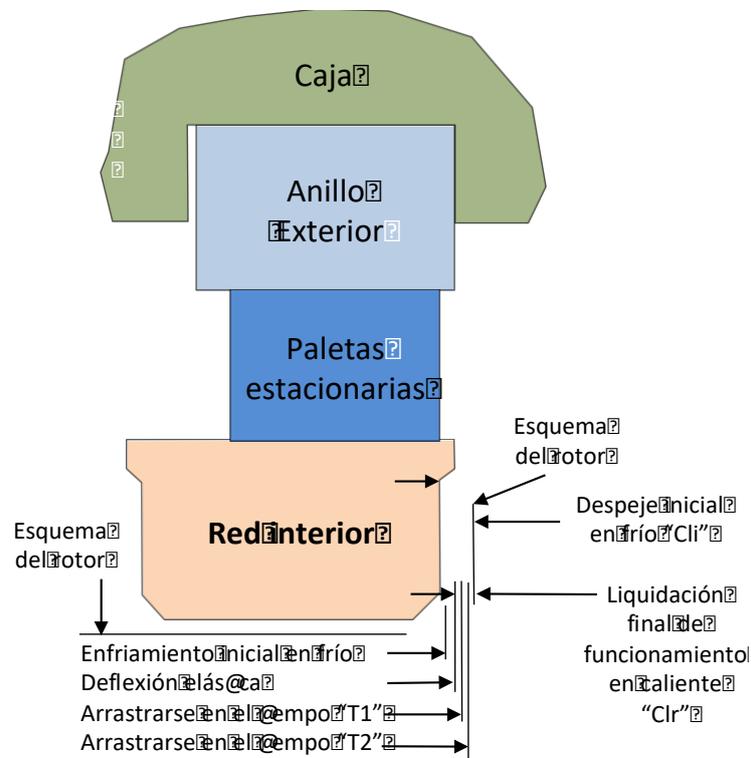


Figure 3-24. Las etapas de desviación de un diafragma con el tiempo de exposición.

La Figura 3-24 muestra una sección transversal de un diafragma en su posición de funcionamiento en relación con el rotor. Puede observarse que:

- Hay un espacio en frío inicial entre el soporte interno, en su diámetro interno, y el rotor "Cli", cuando el rotor está en el funcionamiento estacionario.
- Cuando la unidad se pone en marcha y se admite vapor, se producirá una deflexión elástica inicial, bajo la influencia del diferencial de presión en la fila de álabes estacionaria, consumiendo una parte de esta holgura.
- Después de un tiempo "T" habrá deformación por fluencia, que se suma a la deformación elástica. Después de este período de tiempo, la deflexión por fluencia habrá aumentado, reduciendo el espacio libre a "Clr"

A medida que continúa la operación, la "holgura de funcionamiento en caliente" inicial se reduce por deformación plástica (deformación por fluencia), y finalmente podría existir una situación de roce entre el soporte interno del diafragma y el rotor. Este roce se produce normalmente en el diámetro interior del diafragma, o en cualquier lugar donde puedan existir holguras axiales de funcionamiento reducidas.

El roce generará una cantidad considerable de calor por fricción. Estas regiones calentadas se enfrían inmediatamente por el vapor circundante generando una zona endurecida tanto en el diafragma como en el rotor. Mientras que el estado del diafragma puede no ser inmediatamente grave, el rotor se degradará hasta el punto de volverse particularmente duro y quebradizo, por tanto, no debería funcionar sin que se tomen medidas correctivas.

Este roce puede ocurrir a menudo durante una situación de arranque o parada, es decir, cuando se modifican las holguras de funcionamiento normales.

Es crucial conocer el hecho de que cuando la unidad se detiene y el vapor se deja de circular, la deflexión elástica se reducirá a cero. Sin embargo, la deformación plástica es permanente y no se recuperará. Se recomienda monitorear las holguras críticas como parte del registro de mantenimiento normal, sobre todo, en las etapas que operan en la región de alta temperatura, donde podría producirse fluencia.

En un esfuerzo por aumentar la resistencia a la deflexión por fluencia y para reducir el grado de deformación plástica inicial, algunos fabricantes producen sus álabes estacionarios a partir de diferentes perfiles. Los álabes utilizados en aquellas etapas que tienen una alta deformación por fluencia prevista se evalúan teniendo en cuenta los efectos provocados por las cargas de presión, temperatura y el momento inducido por el vapor en el álabe. Si estas cargas son excesivas, es común el uso de álabes de longitud axial extendida como se ilustra en la Figura 3-25. Estos álabes se utilizan parcialmente en cada etapa y extienden la profundidad axial de la trayectoria del vapor, pasando de "W" a "Wu" (debido al incremento de la longitud axial, "E").

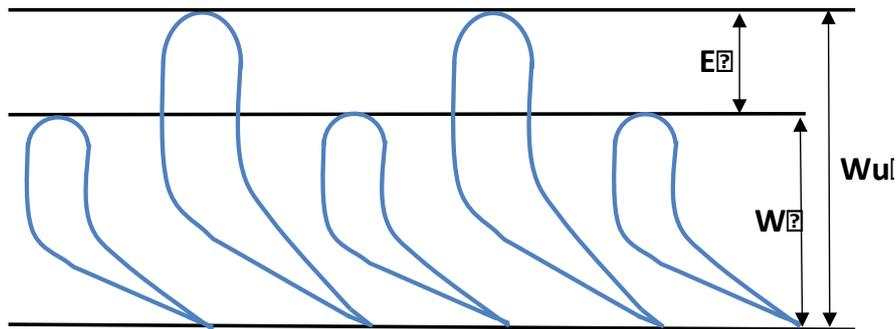


Figura 3-25. Álabes de rotor de longitud axial extendida para mejorar la resistencia sobre esfuerzos axiales.

La porción extendida de estos álabes se selecciona para preservar, en la mayor medida posible, la forma aerodinámica del paso por el estator y tiene poco o ningún efecto sobre la distribución del flujo del vapor. Esta extensión de álabe tiene poca o ninguna influencia en el desempeño de la etapa, debido a que la velocidad del vapor que ingresa desde la fila giratoria anterior es baja y prácticamente a 90° en la dirección tangencial. Sin embargo, si el vapor entra en algún ángulo " δ ", como se muestra en la Figura 3-26, esto podría cambiar la cantidad de vapor que entra en cada paso de expansión y causar cambios leves en las características del flujo de la etapa, lo que tiene efectos en la admisión de los pasos individuales.

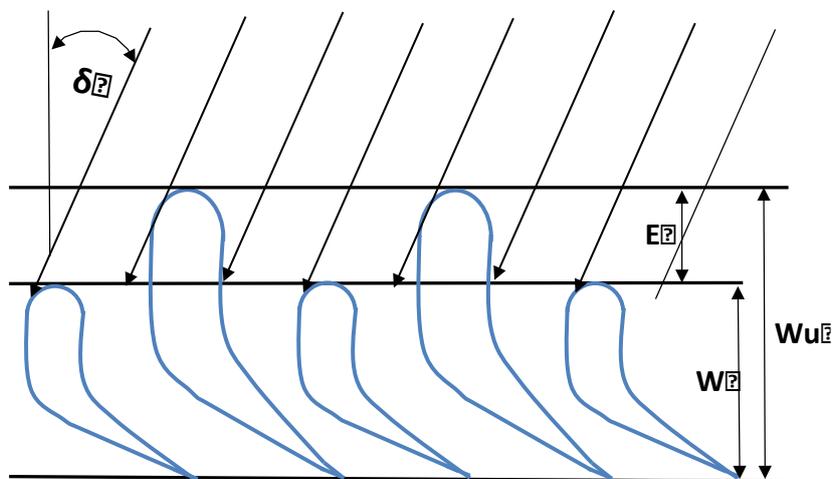


Figura 3-26. El efecto de los álabes extendidos axialmente en la distribución del flujo de vapor en caso de que éste no entre axialmente.

Este cambio en la cantidad de vapor que ingresa a los pasos individuales de las toberas modificará el flujo volumétrico que admite. Como consecuencia, habrá una diferencia en la velocidad, presión y dirección de descarga de vapor de los pasos de la fila.

Los diafragmas también pueden presentar fluencia en el plano radial y afectar a su junta horizontal. Este efecto se ve en la Figura 4-27 donde se muestran tanto los aumentos como la disminución del diámetro.

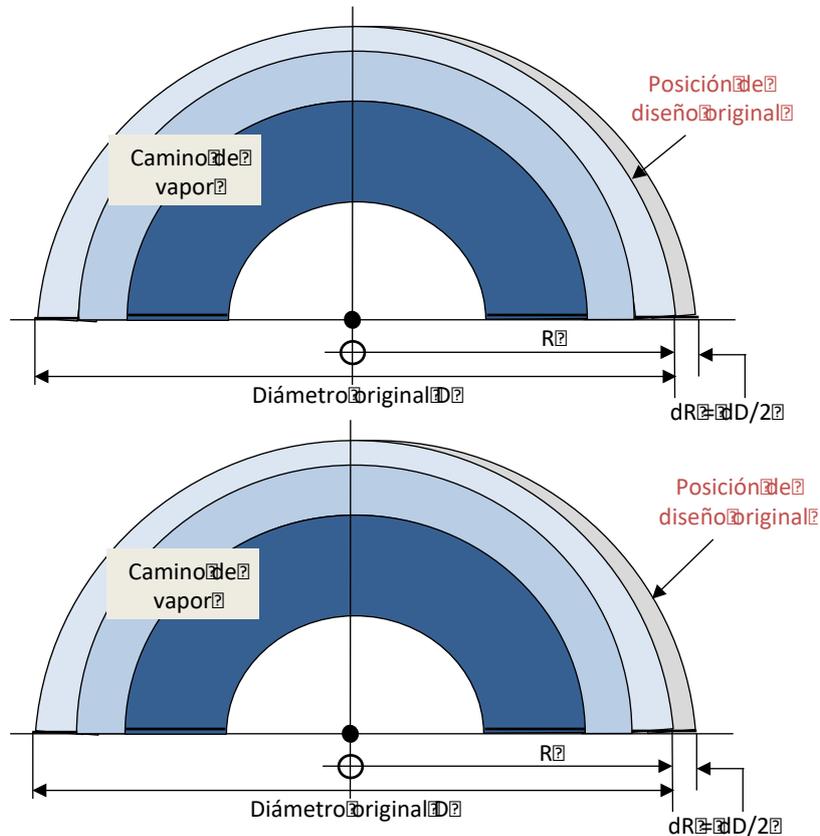


Figura 3-27. Deformación de fluencia radial del diafragma. En la figura superior el diafragma se ha deslizado hacia dentro reduciendo el diámetro en una cantidad " $-dR$ ", y en la figura inferior el diafragma se ha expandido en una cantidad similar " $+dr$ ".

En la Figura 3-28 se muestran las mitades fijadas de un diafragma, antes de la corrección, donde las mitades se han desplazado hacia el interior, abriendo un espacio en la junta horizontal.

Es importante indicar que, al considerar la distorsión axial o radial de los diafragmas, debe tenerse en cuenta que la fluencia no es el único mecanismo que introduce esta condición. También es posible que las tensiones residuales encerradas en el componente debido a un proceso de soldadura o de otro tipo puedan provocar esta situación. También es necesario reconocer que, si bien esta situación puede corregirse, en los casos de fluencia donde se elimina la deformación, los huecos que existen entre los cristales del material no se eliminarán y la deformación ocurrirá nuevamente a una velocidad relativamente rápida.

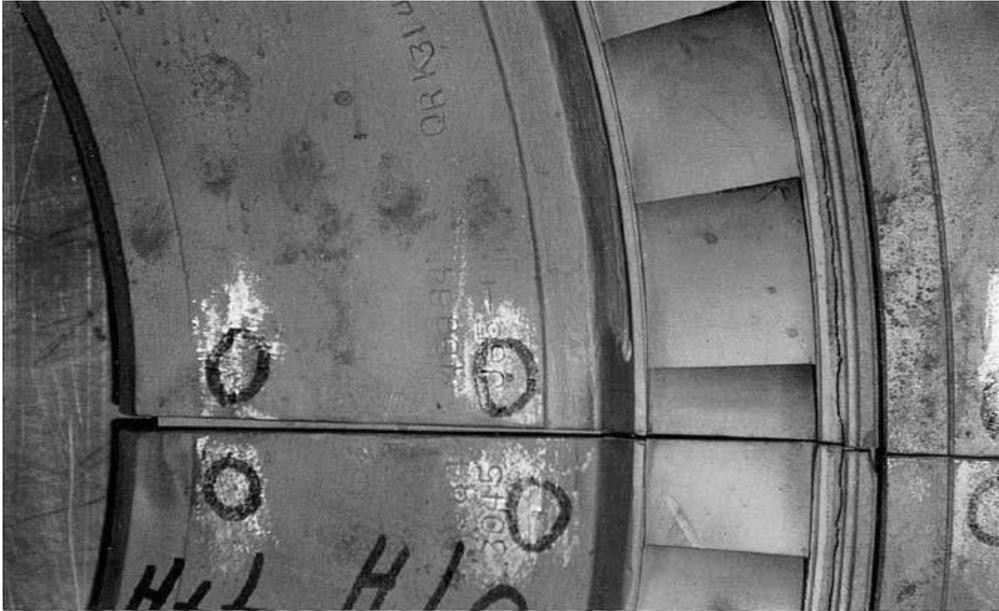


Figura 3-28. Hueco en la junta horizontal del diafragma causada por el movimiento de las mitades hacia adentro debido a la deflexión por fluencia.

Carcasa y soporte de álabes

Las carcasas de las turbinas y los soportes de álabes están sujetos a altos niveles de estrés y altas temperaturas. En estas condiciones, puede producirse un grado de deformación por fluencia que haga que la forma circular de la carcasa se modifique, pasando a poseer una forma elíptica, aumentando o reduciendo la junta horizontal. Las posibles consecuencias de esta deformación dependen de las características de diseño. En determinadas circunstancias, esta deformación puede causar graves daños e incluso dificultar la retirada de los pernos y la apertura de la mitad superior de la carcasa o la extracción del rotor, debido a la unión de las dos mitades de la carcasa mediante los pernos en la junta horizontal. En otras situaciones, las dificultades son menores y no influyen en la alineación del paso del vapor, por lo que pueden tolerarse.

Nota: Las carcasas que están más calientes en la superficie interior que en la exterior tienden a “desplazarse” en la junta horizontal. Esto puede dificultar la extracción de los pernos de unión horizontales y se sabe que dificulta el desmontaje de la unidad, incluso resultando en la destrucción de una gran cantidad de pernos. En el peor de los casos, incluso después de que se haya quitado la carcasa de la mitad superior, la mitad inferior se moverá hacia adentro y “agarrará” el rotor, dificultando su extracción sin dañar los álabes giratorios y los sellos de los extremos del eje.

La Figura 3-29 muestra la junta horizontal de una carcasa que se ha desplazado hacia adentro en la junta horizontal, produciendo fuertes roces entre la superficie interior de la carcasa y los sellos integrados en las puntas de los álabes giratorios. En este diseño, las hileras de álabes estacionarias se llevan en la carcasa interior, por lo que cualquier distorsión que sufra provocará una desalineación entre la hilera de álabes estacionarias y giratorias, reduciendo y, en última instancia, eliminando la holgura. Este tipo de deformación de la fila de álabes estacionarios también puede producir una variación tangencial de la fuerza del vapor, posiblemente introduciendo estímulos en los álabes giratorios, provocando alguna forma de vibración.



Figura 3-29. Superficie interior de una carcasa en la que la deformación por fluencia la ha desplazado hacia dentro hasta el punto de que los fuertes roces con los sellos integrados en la punta de los álabes giratorios han marcado la carcasa.

De nuevo, es interesante indicar que, al igual que en el caso de los diafragmas, la distorsión presente en las carcasas puede deberse a fenómenos distintos a la fluencia, y los comentarios sobre su corrección y deformación futura también son válidos para las carcasas.

Componentes de rosca

Muchos pernos y tornillos están siempre en un estado de alta tensión y funcionan a altas temperaturas. Si los extremos atornillados de los componentes están sujetos mediante una brida horizontal gruesa, es poco probable que se alarguen en un grado significativo. Del mismo modo, una tuerca de cabeza gruesa no permitirá una deformación significativa. Sin embargo, el vástago de la sujeción puede alargarse con el tiempo. Esta deformación debe monitorearse ya que la vida útil de estos componentes debe considerarse finita y, por lo tanto, deberá reemplazarse siempre que haya indicios de que su vida útil ha expirado.

3.4 Condiciones de funcionamiento transitorias.

Las condiciones transitorias, en sí mismas, suponen un mecanismo de daño muy importantes. Las rampas de temperatura severas son un fenómeno de daño común asociado con el funcionamiento transitorio. Otras consideraciones incluyen la sobrevelocidad transitoria, que ocurre en un rechazo repentino de la carga o cuando se prueban los mecanismos de la válvula. Cada uno de estos mecanismos o situaciones tiene el potencial de causar un deterioro en la capacidad operativa de la unidad. Estos efectos están directamente relacionados con los fenómenos ya vistos en este capítulo, por tanto, no se profundizará ahora en ellos.

3.5 Corrosión por fricción

Este mecanismo de daño se basa en el movimiento relativo de una superficie metálica con otra con la que está en contacto (impactando o deslizándose sobre ella de forma repetida), produciéndose un

contacto de alta presión superficial entre ellas. La consecuencia de este movimiento es la producción de un calor superficial excesivo y la formación de un óxido de hierro. Estas condiciones pueden darse en todo el recorrido del vapor, por lo que siempre hay que prever la posibilidad de que se produzcan estos daños.

La corrosión por frotamiento es un mecanismo que induce daños y pérdida de material en la superficie, pero no depende de la presencia de un compuesto corrosivo para producir el daño; por lo tanto, en términos de comparación con los efectos corrosivos que se verán en el capítulo 5, es una forma de daño bastante distinta.

El movimiento rápido y repetido que induce la fricción es a menudo la forma de movimiento que produce la fatiga de alto ciclo. Por lo tanto, cuando la corrosión por fricción se produce en la trayectoria del vapor de una turbina, también puede haber un fallo por fatiga de alto ciclo.

4 MECANISMOS DE DAÑOS EN EL PASO DEL VAPOR POR EROSIÓN POR PARTÍCULAS SÓLIDAS (“SOLID-PARTICLE EROSION” SPE)

Las turbinas actuales alimentadas con combustibles fósiles trabajan a presiones y temperaturas más elevadas y deben soportar arranques y paradas más frecuentes. Esto ha dado lugar a la erosión por partículas sólidas, un fenómeno perjudicial que provoca una importante pérdida de material en los distintos componentes en las etapas posteriores a la entrada a la unidad o reentrada desde el recalentador de la caldera.

SPE es un mecanismo dañino que se encuentra principalmente en las primeras secciones de alta presión y recalentamiento. Este mecanismo de daño elimina el material de las superficies mediante la acción de partículas sólidas de escamas duras desprendidas de los tubos de la caldera y transportadas a la ruta del vapor. Existen dos mecanismos de eliminación; por erosión (efecto abrasivo), o por el propio impacto de la escama, o por ambos mecanismos combinados.

Entonces, los daños se producen por la acción de las escamas duras que se forman en el lado del agua de los tubos de la caldera. Éstas se trasladan a la trayectoria del vapor de la turbina, donde entra en contacto con las distintas superficies de los componentes y les desprende material. En estos casos, tras la entrada del vapor a la unidad, la primera o las dos primeras etapas de la unidad sufren un patrón reconocido de pérdida de material en varias regiones. Este daño puede llegar a alcanzar la consideración de grave

La pérdida de material se produce en regiones que pueden afectar tanto a la eficiencia como a la integridad estructural de la unidad. Este tipo de daño se produce principalmente en las caras de presión de los álabes estacionarios y giratorios, en los bordes de ataque y estela. Sin embargo, estos daños también se producen en forma de pérdida de material en las coverbans y en las cabezas de los tetones.

4.1 La formación de escamas

Las escamas se forman en los tubos de la caldera como resultado del funcionamiento continuo a altas temperaturas y se mantienen adheridas a los tubos. Sin embargo, a medida que cambian las temperaturas dentro de los tubos, particularmente al encender y apagar la unidad, las escamas se desprenderán y se liberarán dentro de los propios tubos. A partir de esta observación, queda claro que las unidades en servicio para cubrir picos de demanda, o sujetas a un gran número de arranques en frío, sufrirán una mayor exposición a esta forma de daño. Requerirán un mayor nivel de supervisión y, en última instancia, una especial atención en el mantenimiento.

El aumento de la velocidad del flujo a través de los tubos de la caldera puede promover el desprendimiento de las escamas de óxido. Cuando se desprenden, se trasladan a las etapas de la turbina de vapor, dañando los componentes con los que entra en contacto. En la Figura 4-1 se observa el vástago de una válvula de corte que ha estado expuesto al impacto de incrustaciones durante dos años.



Figura 4-1. Vástago de una válvula de corte que ha sido sometido a la erosión de partículas sólidas.

4.2 Mecanismos de erosión

Al considerar la mecánica de los efectos de abrasión que eliminan el material de las etapas estacionarias y giratorias, es sumamente útil analizar los diagramas típicos de velocidad de la etapa, y considerar el posible recorrido de las partículas entre y dentro de los pasos de álabes.

Las pérdidas reales de material dependen principalmente de la geometría de la etapa y de los triángulos de velocidades. Por lo tanto, estas pérdidas son sensibles al diseño. Aunque se pueden desarrollar explicaciones generales de la mecánica de daño en los dos tipos de escalonamiento (estacionaria y giratoria), con la observación de las unidades individuales, se puede desarrollar una mejor comprensión de los modos de pérdida de forma más precisa.

4.2.1 La fila de álabes estacionarios (estatores)

Consideremos los perfiles de velocidad de la fila de álabes estacionarios que se muestra en la Figura 4-2. En esta hilera de álabes, el vapor que transporta pequeñas partículas de escama entra en el paso de los álabes. Debido a que las partículas de vapor dentro de este paso son de menor masa, pueden ser aceleradas y desviadas por la liberación de energía térmica a través del giro del álabe, saliendo del mismo con el ángulo correcto. Tanto la superficie de presión del álabe "R" como la cara de succión del álabe adyacente "S" influyen en que la descarga sea correcta, de manera que el vapor sale de la fila de álabes estacionarios con el ángulo de diseño.

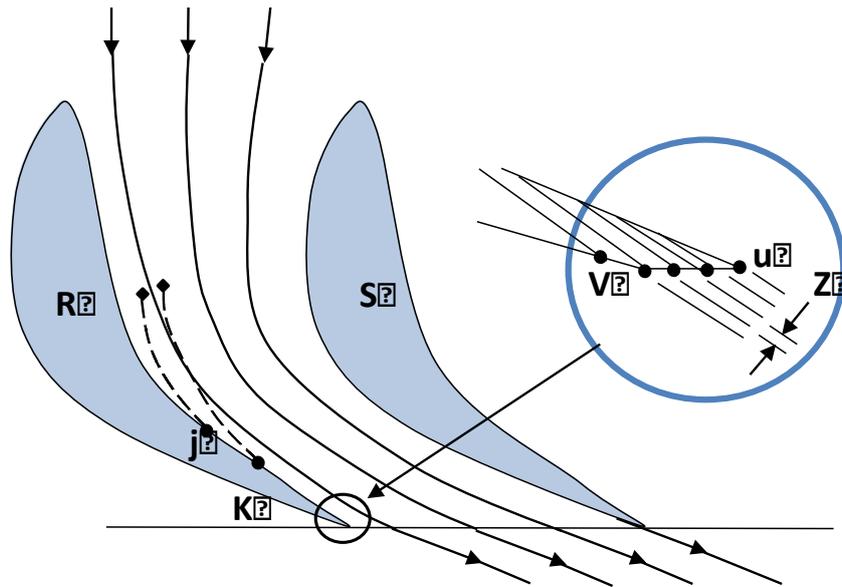


Figura 4-2. Flujo de vapor con partículas de escama a su paso por los álabes de estator, mostrando también el patrón de desgaste potencial en el borde de estela del álabe.

No obstante, como consecuencia de que las partículas de escama transportadas por el vapor son de mayor masa, no pueden ser aceleradas completamente a través del paso de álabes para descargar con el ángulo correcto. Por tanto, no son desviadas lo suficiente a través del paso de álabes.

Esto provoca que algunas de ellas entren en contacto con la cara de presión del álabe estacionario "R", provocando una acción de impacto o abrasiva en su superficie. La escama que entra en contacto con el álabe en el punto "j" será, predominantemente, impactante; mientras que la escama que entra en contacto en "k" será, fundamentalmente, abrasiva. Sin embargo, es también cierto que todas las escamas que entran en contacto con el álabe impactan y erosionan. Es una cuestión de alcance, y ese alcance varía de "j" a "k", y esto es así debido a que el mecanismo de daño real depende del ángulo de impacto.

4.2.2 La fila de álabes giratorios (rotores)

Las huellas de la escama en la fila de álabes giratorios están influidas por las fuerzas que ejerce sobre ellas el vapor que fluye y por los efectos centrífugos de la rotación. Esto significa que, en las hileras de álabes de rotor, es necesario considerar el movimiento de la escama en el plano axial/tangencial y también en la dirección radial. Además, en las hileras de álabes en rotación, el mecanismo de pérdida de material es algo más complejo, al tener la complicación de las altas componentes de flujo radial introducidas por las fuerzas centrífugas, impuestas por las fuerzas de arrastre que el flujo de vapor principal ejerce sobre la escama en movimiento.

Los planos axiales/tangenciales

En la Figura 4-3 se muestran los triángulos de velocidad en el plano axial/tangencial para el vapor, así como los de una escama; todo ello paea una fila típica de álabes en rotación. Aquí se pueden ver los triángulos de velocidad tanto del vapor como de la escama que entran y salen de la fila de álabes en rotación.

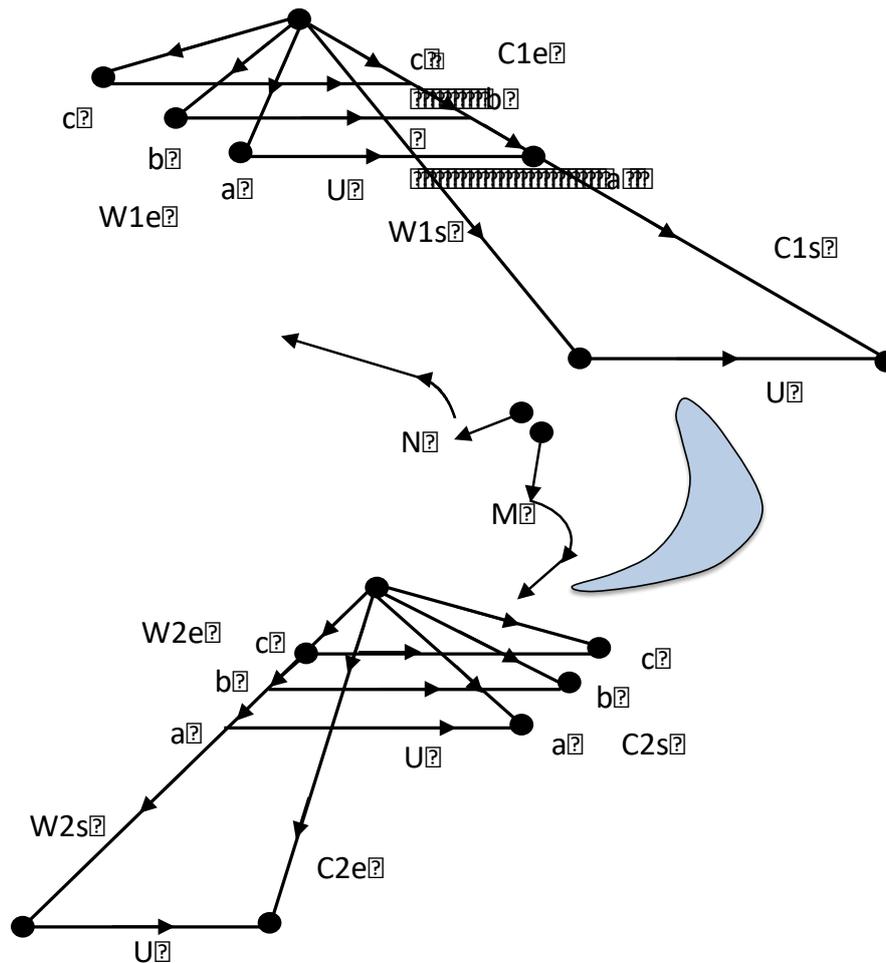


Figura 4-3. Los triángulos de velocidad para el vapor y la escama en la descarga de la fila de álabes estacionarias.

Como se muestra en este diagrama vectorial, el álabe giratorio, que tiene una velocidad tangencial "U", está dispuesto para aceptar el vapor entrante de la fila estacionaria con una velocidad relativa "W1s". Este vapor fluye hacia el paso de expansión entre los álabes y descarga (con una velocidad sustancialmente axial) en la siguiente fila de álabes estacionarios. Las partículas de escama tienen esencialmente el mismo ángulo de descarga que el vapor que sale de la fila de palas estacionarias (aunque podría haber diferencias en el ángulo de descarga para las escamas que entran en contacto con el borde de descarga del álabe estacionario, ya que la escama rebotaría y se desviaría del ángulo que sigue el vapor). La masa relativamente más grande de las partículas de escamas dejará la influencia de la fila de paletas estacionarias a velocidades más bajas, "C1e".

En el diagrama vectorial (Figura 4-3) se muestran triángulos de velocidad para tres partículas diferentes (a, b y c con velocidades "W1e"). Estos diferentes triángulos de velocidad reflejan un posible rango de velocidades de descarga para las escamas. Estas velocidades reales están influenciadas por su tamaño, forma e historial de impactos anteriores.

Por lo tanto, la escama que ingresa a la fila de álabes giratorios se puede dividir convenientemente en dos grupos:

- Escama que ha pasado a través de la fila de álabes estacionarios sin colisionar con éstos. Normalmente estas escamas serán de menor tamaño, y tendrán velocidades algo mayores, ya que no han perdido energía por impacto.
- Escama que ha impactado en los álabes estacionarios. Habrán perdido energía y, por lo tanto, tendrán una velocidad más baja, pero también podrían haberse roto en pedazos más pequeños por el efecto del impacto con el álabe de estator.

Es imposible tener en cuenta todos estos factores al desarrollar un modelo detallado. Es suficiente asumir que las velocidades de descarga de la fila de álabes estacionarios pueden tener un rango de valores que varía desde "W1e (a)" a "W1e (c)" como se muestra para los triángulos de velocidades de entrada al álabe de rotor.

Ahora es necesario considerar las posibles trayectorias de las partículas de escama en ambos extremos del rango de velocidad probable. Se considerará primero que la escama entra con una velocidad "W1e (a)" (esa sería una escama que ha pasado a través de los álabes estacionarios sin impacto, y posiblemente será de un tamaño menor). Esta escama entrará como se muestra en la Figura 4-3, impactando con la cara de succión del álabe giratorio en la posición "M". En el momento del impacto, esta partícula posiblemente se fracturará en pedazos más pequeños y seguirá rebotando en el flujo de vapor principal. Entonces es probable que toda o la mayor parte de esta escama (o partículas más pequeñas) continúe a través del paso del vapor para ingresar a la siguiente fila de álabes estacionarios.

Las partículas de incrustaciones que ingresen a la fila de álabes giratorios con una velocidad "W1e (c)" (estas escamas tenderán a ser de mayor tamaño) golpearán el álabe de rotor en la posición "N" y rebotarán. Debido a que la mayor parte de esta escama ya ha impactado en los álabes estacionarios, la mayoría de ellas probablemente rebotará en el espacio axial que existe entre las filas estacionaria y giratoria.

Las escamas llevadas a través de los pasos de rotor dejarán la fila de álabes giratorios con velocidades y direcciones como se muestra con "C2e", que nuevamente puede tener un rango de valores tanto de velocidad como de ángulos de descarga. El vapor se descargará de la fila a la velocidad prevista de diseño "C2s" en una dirección sustancialmente axial.

El plano radial

Como consecuencia del efecto centrífugo sobre el flujo de vapor en los pasajes de álabes giratorios, las partículas de escama que fluyen por el paso entre estos álabes experimentarán fuerzas radiales considerables que tenderán a hacerlas fluir hacia los radios exteriores, donde las coverbands evitarán que se centrifuguen radialmente hacia fuera contra la carcasa. La Figura 4-4 muestra trayectorias de escamas que reflejan el flujo radial hacia la parte inferior de la coverband, quien evita que estas partículas abandonen la fila. Sin embargo, al salir de la hilera de álabes, estas partículas, debido a su masa, tendrán un gran componente de flujo radial en el momento de su descarga. Esto hará que una gran proporción de estas partículas fluya en dirección a la carcasa. Parte de estas escamas rebotarán en la carcasa y volverá a entrar en el flujo de vapor principal. Otra parte se retendrá allí en cualquier tipo de cavidad que exista. A menudo, cuando se abre una unidad, se pueden recuperar algunas incrustaciones, principalmente de la mitad inferior de la carcasa.

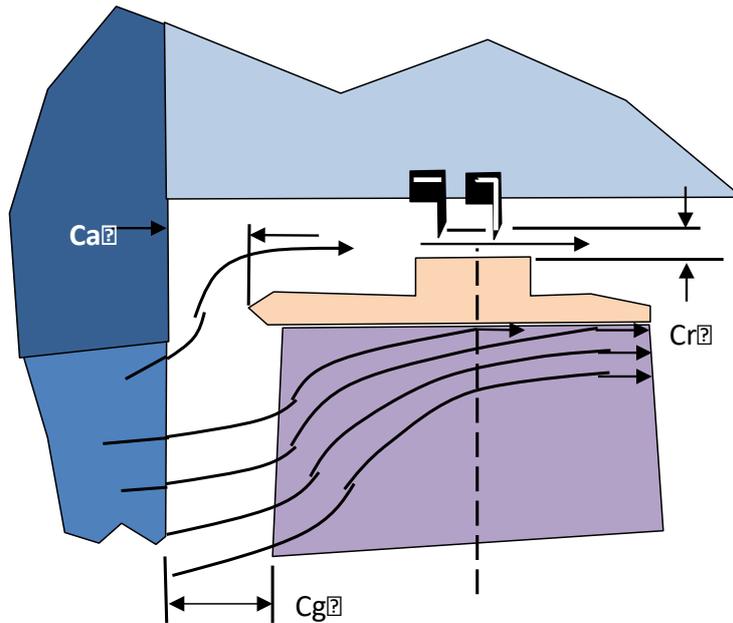


Figura 4-4. Influencia del flujo radial en las partículas de escama después de salir de la fila de álabes estacionarios.

Posibles patrones de flujo de escamas en los álabes giratorios se muestran en las Figuras 4-4 y 4-5. Aquí también se indican los efectos de las fugas de vapor (que arrastran escamas) sobre las coverbands.

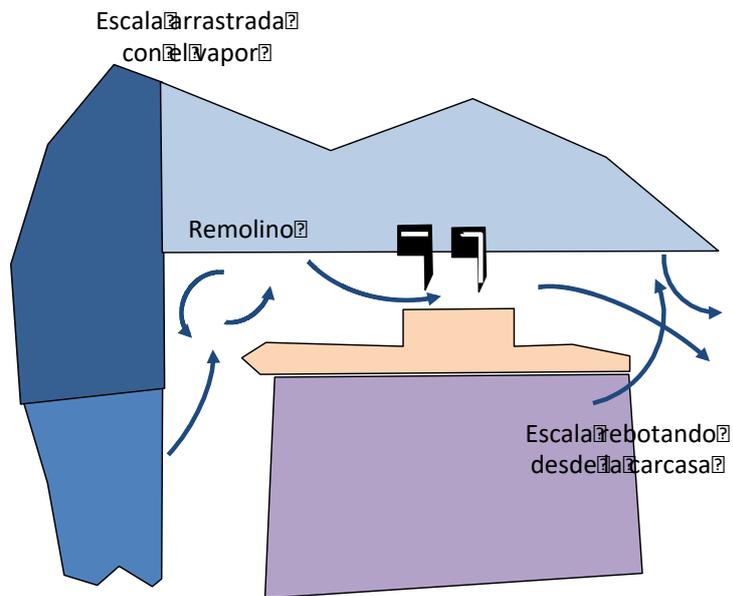


Figura. 4-5. El rebote de las escamas de la superficie interior de la carcasa y su desplazamiento más allá de la banda de sellado.

En la Figura 4-6 se ilustra la posible trayectoria de una sola partícula de escama que entra en la fila de álabes giratorios cerca de la sección de la raíz. Sus múltiples impactos propician que el flujo finalmente la conduzca a la sección de la cabeza, donde pasará sobre la coverband o a través de la fila de álabes. También es posible que cualquier partícula de escama se fracture en partículas más pequeñas, desarrollando trayectorias individuales determinadas por su tamaño y situación en el paso del vapor.

Las escamas que entren a la fila de álabes giratorios a otras alturas de álabes, de manera similar, rebotarán y fluirán hacia la sección de cabeza de éstos, por lo que hay una acumulación gradual de

impactos de escamas hacia la cabeza de los álabes. Por este motivo, será probable que los daños se agraven progresivamente conforme nos acercamos a la cabeza del álabe.

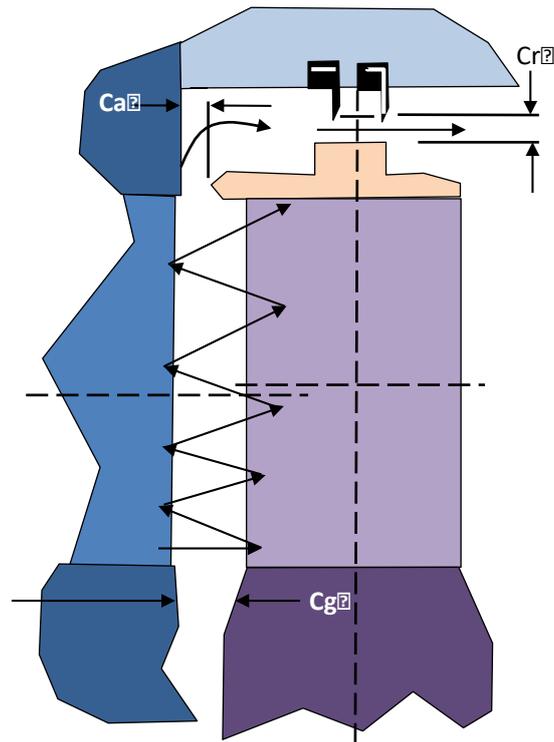


Figura. 4-6. El rebote de las escamas entre los elementos de álabes estacionarios y giratorios, y su desplazamiento hacia la sección de la cabeza y sellado.

4.3 Las pérdidas de material

A medida que la escama entra en la trayectoria del vapor, impacta y elimina el material de los elementos de álabes fijos y giratorios, las paredes laterales y las **coverbands**. También es capaz de quitar material de los tetones de las **coverbands**, debilitando así la unión de la **coverband** a los álabes.

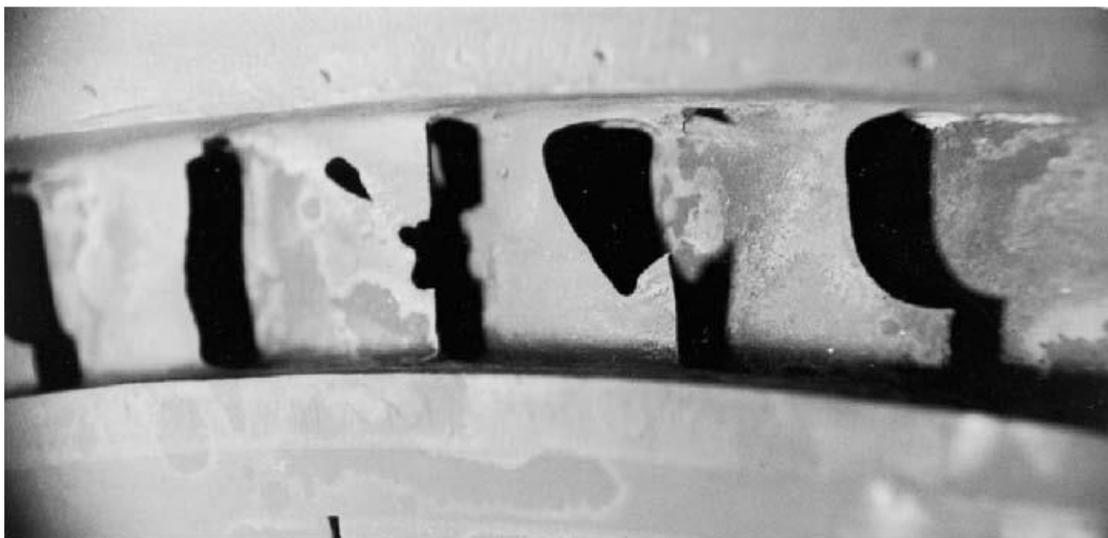


Figura 4-7. Erosión por partículas sólidas que muestra la pérdida de material de un borde de estela de los álabes de un escalonamiento de estátor. En esta etapa, la pérdida de material proviene de

elementos reparados previamente con soldadura, y la pérdida ha sido severa. Esta pérdida de material modifica el área total de descarga del escalonamiento radicalmente.

En las hileras de álabes estacionarias, el efecto principal es la eliminación del material del borde de estela de la paleta, lo que provoca un debilitamiento del álabe, así como un aumento en el área y el ángulo de descarga de la etapa (Figura 4-7). Las paredes laterales también pueden sufrir la eliminación de material, normalmente en la pared lateral exterior. La entrada a los álabes estacionarios también puede verse afectada por la acción erosiva de las partículas (Figura 4-8).



Figura 4-8. Material desprendido del borde de ataque de una fila de álabes estacionarios por erosión de partículas sólidas.

En los álabes giratorios, el material se desprende del borde de ataque, modificando la sección del álabe y el ángulo de entrada (Figura 4-9) y puede eliminar material de los bordes de estela (Figura 4-10). Desde un punto de vista estructural, una pérdida de material más incisiva proviene de la cara de presión o cóncava del álabe (Figura 4-11).

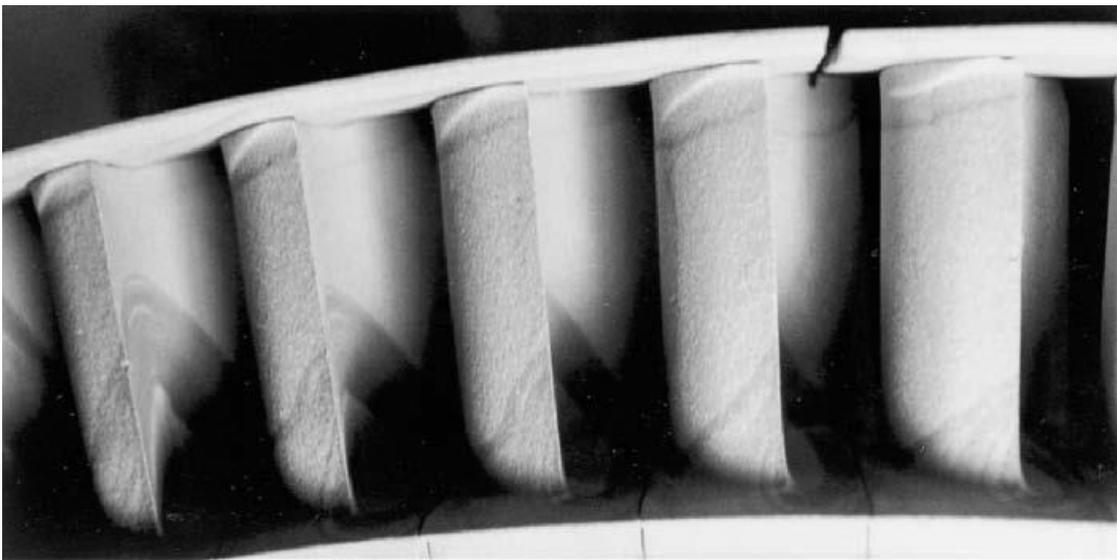


Figura 4-9. Material eliminado del borde de ataque y superficies de una hilera de álabes giratorios

por erosión de partículas sólidas.

Este tipo de daño debe vigilarse cuando se evidencian daños de la forma mostrada en la Figura 4-10. Esto se debe a que muchas etapas sujetas a este fenómeno erosivo tienen una coverband integral. Esta pérdida de material representa un socavamiento de la coverband integral que debilitará la sección de cabeza del álabe y modificará sus características vibratorias. En el caso de las etapas sin coverband integral, puede producirse un socavamiento de los tetones.

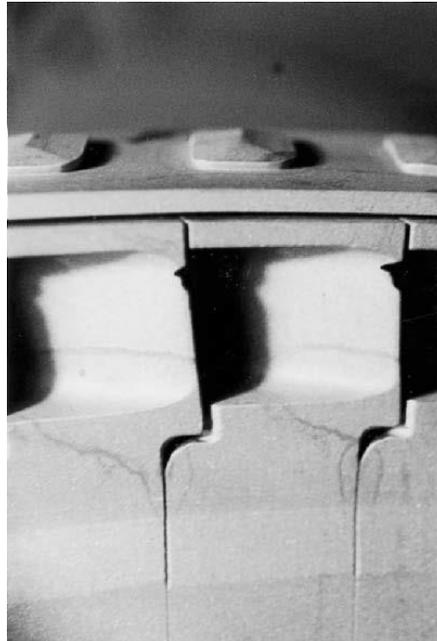


Figura 4-10. Pérdida de material en el borde de estela de una hilera de álabes giratorios por erosión de partículas sólidas.

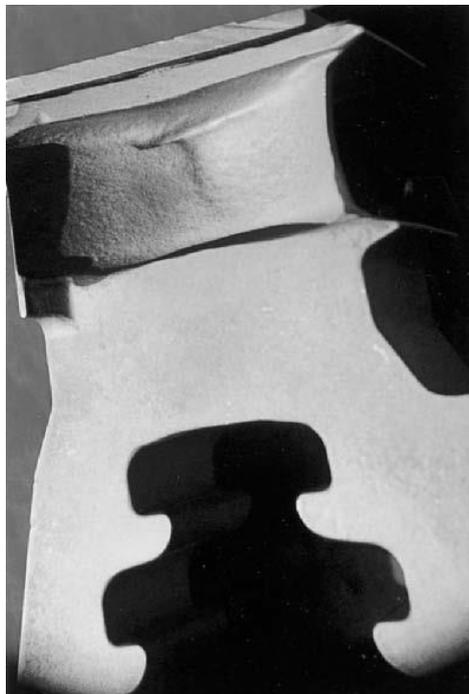


Figura 4-11. El efecto del "caving" en la superficie de presión de un álabe giratorio.

4.4 Medidas de protección

La erosión por partículas sólidas causa una pérdida suficiente de producción y representa una penalización financiera tal, que se ha invertido un esfuerzo considerable en encontrar métodos para prevenir y/o reducir la tasa de pérdida de material.

Estos métodos incluyen cambios en la geometría de la etapa, la forma en que se operan las unidades (particularmente en el arranque), el uso de revestimientos protectores y cambios en los materiales de la caldera y los métodos de limpieza. Algunos de estos métodos son los siguientes:

- **Cambios en la geometría del escalonamiento.** Estos incluyen modificar la forma de la pared exterior de las toberas y la disposición de sus álabes. Además, se han realizado cambios para aumentar la holgura axial entre los bordes de estela de las filas de álabes estacionarias y los álabes giratorios. Esto, por supuesto, reducirá la erosión en los álabes giratorios, pero no tendrá ningún efecto en las filas de álabes estacionarios.
- **Cambios en la limpieza y funcionamiento de la caldera.** Las escamas que impactan en el paso del vapor y provocan la erosión por partículas sólidas se generan en la caldera. Por lo tanto, es posible que los cambios en el diseño, operación y mantenimiento de las tuberías de la caldera puedan limitar el daño.
- **Recubrimientos protectores.** Los materiales de la trayectoria del vapor pueden estar provistos de superficies resistentes capaces de soportar el efecto abrasivo de las incrustaciones. Esta tecnología de recubrimiento se está convirtiendo en un factor importante para prolongar la vida útil del paso del vapor. Se encuentran disponibles y se están desarrollando varios procesos y materiales de recubrimiento.
- **Procedimientos de puesta en marcha de turbinas.** Las escamas se desprenden de los tubos de la caldera durante los transitorios de temperatura producidos en estos tubos. Por lo tanto, si se modifican los procedimientos del arranque de la turbina, es posible que las escamas generadas se puedan distribuir alrededor de toda la admisión del escalonamiento de regulación, en lugar de concentrarse en un pequeño arco de admisión (esto se ilustra en la Figura 4-12), por lo que la erosión, aunque seguirá estando presente, no será tan destructiva.

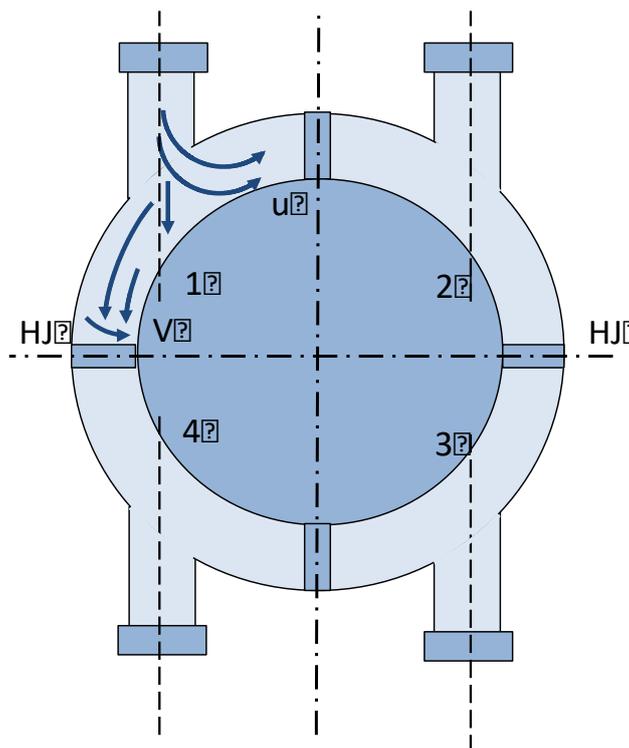


Figura 4-12. Escamas que fluyen con el vapor hacia el primer arco de admisión de un escalonamiento de control. Este daño por erosión será más grave en el segmento "1" del escalonamiento de control (que es el primero que admite vapor en la unidad, llevándola hasta el 25% de carga) y, especialmente, en los separadores "HJ".

4.5 Influencia de SPE en el rendimiento de los escalonamientos

Entre los efectos potenciales del daño erosivo sobre los componentes del paso del vapor, como es obvio, está el deterioro de la eficiencia de la etapa. Esto se comenta a continuación.

4.5.1 Efectos de cambio de área

La pérdida de material de los álabes estacionarios y giratorios puede afectar la eficiencia de la etapa modificando la forma del álabe, así como el área de descarga.

Pérdida de material de álabes

A medida que se retira material de los bordes de estela de los álabes estacionarios y giratorios, se modificará la morfología de la descarga del escalonamiento. Dado que los pasos formados entre álabes adyacentes son siempre convergentes (con la excepción de ciertos elementos de la última etapa), está claro que el área de descarga cambiará, modificándose así la presión de descarga. La caída de entalpía de la etapa cambia la relación de velocidad " ρ " (relación entre la velocidad del álabe y la velocidad del vapor

Pérdida de material de las paredes laterales

La pérdida de material de las paredes laterales afecta con mayor frecuencia a la pared lateral exterior y, con mayor frecuencia, a las paredes laterales en el escalonamiento de estator. Al eliminar material de estos lugares, el vapor se descargará del escalonamiento de estator con un diámetro mayor y podría dirigirse hacia la pared de la carcasa para fluir sobre la coverband. Las marcas erosivas producidas en las paredes laterales exteriores también fomentarán que las escamas fluyan hacia afuera en mayor medida y causarán daños erosivos al sistema de sellado ubicado sobre la punta del álabe.

4.5.2 Efectos en ángulos de descarga de vapor

El material perdido del borde de estela de las distintas filas de álabes modifica los ángulos de descarga del vapor. Esta modificación hace que el vapor entre en la siguiente fila de álabes con un ángulo para el que los álabes no fueron diseñadas. Por lo tanto, habrá algunas pérdidas de perfil y una reducción en la eficiencia de la etapa.

4.5.3 Efectos en la presión local

A medida que se pierde material de los bordes de estela de las paletas, se modifica la distribución de presión en toda la unidad. Las presiones en las diversas etapas se alteran, al igual que las etapas en las que el vapor está disponible para su extracción, el calentamiento de la alimentación regenerativa o cualquier otro requisito del ciclo. Esto afectará el rendimiento del ciclo y, por lo tanto, al "heat rate" de la unidad.

5 MECANISMOS DE DAÑOS EN EL PASO DEL VAPOR POR EFECTOS CORROSIVOS

La entrada de iones corrosivos en la trayectoria del vapor siempre es potencialmente posible. Estos iones tienen el potencial de forzar paradas dramáticas y costosas dentro de la unidad, y muchas etapas de la turbina pueden verse afectadas por estos efectos adversos. Sin embargo, las etapas más afectadas suelen ser aquellas en las que se forma humedad tras la expansión del fluido de trabajo en la región húmeda del paso del vapor. Cuando esto ocurre, muchos de los iones corrosivos precipitados desde el vapor se depositan en las superficies del paso del vapor y la humedad depositada los lleva a determinados lugares donde se concentran. En estos lugares se vuelven agresivos cuando se dan las condiciones ambientales propicias.

5.1 Fuentes que introducen corrosión

Los ingenieros deben abordar, de manera continua, los problemas operativos asociados con la introducción de productos químicos y la contaminación. Estos compuestos pueden acceder a la unidad a través de diversas fuentes y mecanismos. Algunos ocurren como resultado de daños mecánicos dentro de otros componentes del ciclo energético del vapor, sobre todo el condensador. Otras fuentes son los sistemas de tratamiento de agua, donde se requiere un control cuidadoso del proceso de tratamiento.

El oxígeno también puede obtener acceso en muchos puntos del ciclo donde se dan condiciones de presión por debajo de las atmosféricas. Las unidades normalmente están equipadas para eliminar el aire que ingresa al sistema antes de que pueda causar un daño corrosivo significativo o promover una reacción química. Sin embargo, una cierta cantidad puede, y a menudo lo hace, acceder a la ruta del vapor.

5.1.1 Fuentes externas: se infiltran por fugas del sistema

Una fuente común de contaminantes en la ruta del vapor es la infiltración de agua sin tratar (cruda) en el sistema. Esto suele ocurrir en el condensador, que se utiliza para producir vacío. El agua de refrigeración puede proceder de lagos, ríos o del mar (en instalaciones costeras).

Es especialmente necesario considerar los efectos de las instalaciones donde existe agua salina (agua de mar), porque a través del acceso al condensador, la solución salina puede producir una entrada significativa de contaminantes. El agua de mar contiene altos niveles de muchas sustancias, sobre todo sal (NaCl), que puede ser muy corrosiva si accede al paso del vapor.

5.1.2 Sistema interno: generado por sistemas de tratamiento de agua

Los sistemas modernos de generación de energía requieren que el vapor de agua en la caldera esté desmineralizado y lo más puro posible. Este requisito introduce la necesidad de un tratamiento de agua, un proceso que provocará la introducción en exceso de productos químicos en el paso del vapor de la unidad si no se controla dentro de un rango estricto. Algunas de estas sustancias de tratamiento tienen el potencial de formar productos químicamente peligrosos.

Agua pulverizada de atemperación contaminada

El agua que se usa para controlar la temperatura de entrada del sobrecalentador o del recalentador de la caldera debe tomarse de una fuente confiable y limpia (normalmente la propia agua de

alimentación).

Agua contaminada de los espráis del escape. ("Hood sprays")

Esta agua se utiliza en el último escalonamiento de baja presión para controlar el vapor y la temperatura de los álabes a bajas cargas, ya que el vapor tenderá a reentrar en los álabes de la última etapa con el potencial de causar "erosión del borde de estela". Esta agua de pulverización debe tomarse de una fuente limpia y fiable. A menudo, el agua tomada del pozo caliente del condensador contiene impurezas y oxígeno disuelto que pueden iniciar y también promover la corrosión. En algunas unidades nucleares, esta agua puede tomarse de una fuente auxiliar.

Uso de sulfuro de sodio como captador de oxígeno

El sulfuro de sodio se usa a menudo como captador de oxígeno en calderas de alta presión. La descomposición del sulfuro de sodio puede producir sulfuro de hidrógeno H₂S en la región inicial de húmeda de la unidad.

Uso de material de limpieza en las paradas

Los líquidos de limpieza pueden contener niveles inaceptables de cáusticos, cloruros o azufre cuando se utilizan para eliminar depósitos o se realizan otras actividades de limpieza durante una parada de la unidad. Esto puede ser aceptable para el proceso de limpieza en sí, pero si los componentes no se enjuagan completamente con líquido limpiador y dichos residuos permanecen en la turbina, tienen el potencial de acumularse y producir compuestos corrosivos en toda la unidad.

Lubricantes para fabricación y reparación

Los fabricantes de turbinas de vapor emplean materiales y procesos de producción sofisticados, muchos de los cuales requieren el uso de lubricantes y fluidos para el corte que contienen compuestos de azufre, cloro, fósforo y magnesio. Estas sustancias, incluso en cantidades mínimas, deben eliminarse de las superficies de los componentes antes de que se ensamblen y/o se coloquen en su lugar correspondiente.

Se requieren fluidos tanto para lubricar como para enfriar el proceso de corte de un metal. Dichos fluidos pueden ser compuestos a base de aceite o agua. Los más adecuados dependen del material que se va a cortar, la velocidad de corte y las profundidades de corte precisadas. Se pueden someter a modificaciones mecánicas muy pocos componentes de la turbina de vapor sin el uso de un fluido de corte/enfriamiento. Por lo tanto, los residuos de estos compuestos siempre están potencialmente presentes en la superficie de dichos componentes. Esta es una situación que puede existir cuando la unidad es nueva o cuando se vuelve a poner en servicio después de una reparación, pero tales impurezas también pueden introducirse cuando se instalan piezas de repuesto en una parada por mantenimiento.

Conservantes para el envío y almacenamiento

Cuando los componentes se envían a un lugar, muchos de ellos requieren protección durante el transporte, incluidos los productos necesarios para evitar la corrosión atmosférica. Si estos componentes se van a almacenar en el lugar durante la instalación, y posiblemente se mantengan almacenados a largo plazo, necesitarán protección contra la corrosión.

Los materiales utilizados para tal protección deben adecuarse a la vida útil prevista y pueden ser de una naturaleza que, si no se limpian completamente antes de la instalación, podrían introducir compuestos químicamente indeseables en el sistema o incluso atacar el componente durante el almacenamiento. La Figura 5-1 muestra unos álabes retirados del inventario para su instalación, pero que han sufrido un ataque corrosivo a lo largo de su almacenamiento.

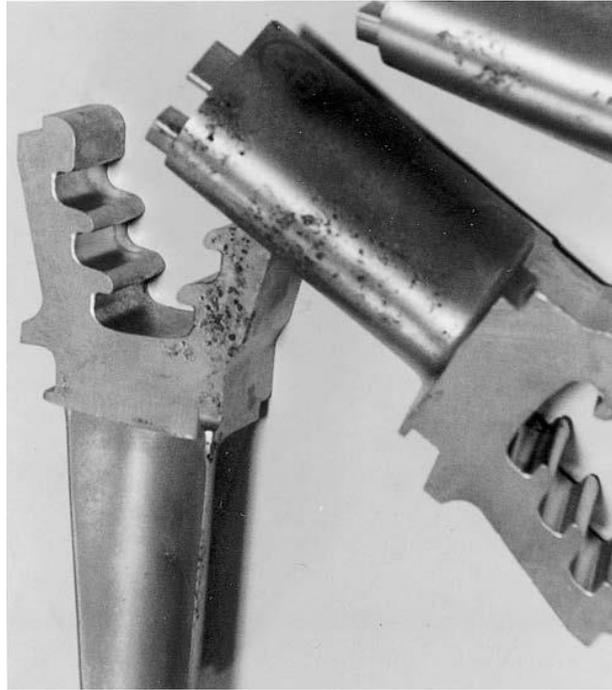


Figura 5-1. Daños por corrosión provocados en elementos de álabe nuevos mientras estaban almacenados.

Compuestos de otros equipos del sistema

Otra fuente de contaminantes transportados a la ruta del vapor son los producidos dentro de otros equipos que comprenden el ciclo de energía de la unidad. Los más notables son los óxidos de hierro y cobre producidos como subproductos de la disolución de metales de las superficies de los tubos y equipos. Esto incluye tuberías de calderas y calentadores de agua de alimentación regenerativos, donde el agua a alta temperatura y presión entra en contacto de manera continua a medida que la unidad produce energía.

Los más notables son los óxidos de hierro y cobre producidos como subproductos de la disolución de los metales de los tubos y las superficies de algunos equipos. Esto incluye los tubos de las calderas y los precalentadores regenerativos de agua de alimentación, donde el agua a alta temperatura y presión fluye de forma continua a través de sus tubos.

Fuente geotérmica

El vapor utilizado en las unidades suministradas para aplicaciones geotérmicas tiende a estar presente a presiones relativamente bajas, normalmente más bajas que las condiciones de entrada utilizadas para el ciclo nuclear. Este vapor también está contaminado por minerales y compuestos que se disuelven en él procedentes de la tierra.

Los contaminantes pueden variar considerablemente de un sitio a otro, tanto en componentes como en concentración. Para las unidades de ciclo directo, estos contaminantes se transportan a la ruta del vapor, donde muchos se depositan en las superficies internas, lo que provoca niveles de rugosidad y corrosión en la superficie considerablemente mayores que los que se experimentan normalmente en los ciclos fósiles o nucleares.

En términos de deposición de impurezas, las unidades geotérmicas proporcionan un conjunto de consideraciones completamente discretas. Esto se debe a que puede haber depósitos en estas unidades completamente diferentes a los que se encuentran en las unidades utilizadas para los ciclos de los diseños más convencionales de combustibles fósiles y nucleares (Figura 5-2).

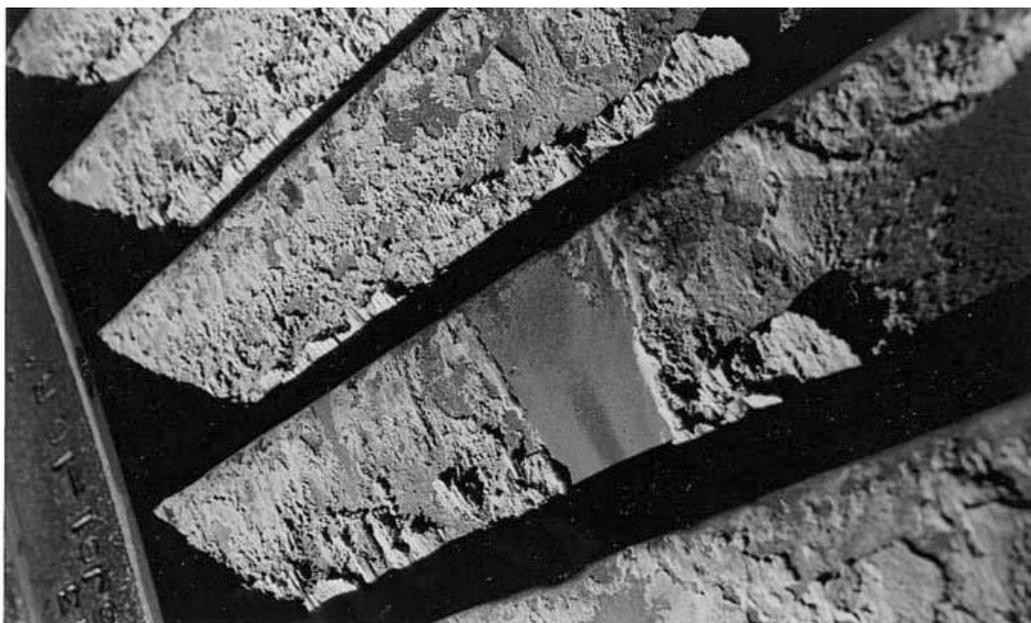


Figura 5.2- Los depósitos en una hilera de álabes estacionarios de una unidad geotérmica. Estos depósitos, aunque no son corrosivos, tuvieron un efecto muy significativo en la eficiencia del escalonamiento.

Las unidades geotérmicas están dispuestas para ser de ciclo directo o ciclo indirecto. En las unidades de ciclo directo, el vapor natural extraído de la tierra pasa a través de la trayectoria del vapor, a menudo con separadores interpuestos entre el suministro de vapor y la turbina. Los separadores eliminan la humedad en suspensión y las partículas sólidas del vapor. Se hace poco o ningún esfuerzo para eliminar las impurezas químicas suspendidas y disueltas.

Los ciclos geotérmicos indirectos emplean un intercambiador de calor entre el vapor geotérmico y el fluido de trabajo. En estas unidades, el fluido de trabajo debe tener una pureza comparable a la del fósil y unidades nucleares. Sin embargo, estas unidades pueden estar sujetas a la intrusión de contaminantes o impurezas como resultado de fallas de los tubos del intercambiador de calor que, dependiendo de los agentes corrosivos transportados, pueden ser relativamente comunes. En ciclos indirectos, los intercambiadores de calor pueden sufrir ellos mismos una fuerte deposición y daños corrosivos.

El vapor geotérmico tiende a estar saturado y contiene, en el mejor de los casos, solo unos pocos grados de recalentamiento. Por lo tanto, casi todos los componentes del paso del vapor se encuentran en la región saturada, con la posibilidad de que se produzca un “lavado” continuo. El agua presente en las superficies de la trayectoria del vapor puede contener impurezas que se depositan y son perjudiciales para el rendimiento total de la unidad. Sin embargo, puede tener algún efecto beneficioso en términos de eficiencia, ya que tenderá a reducir el nivel de algunos compuestos depositados.

Calidad del agua

Tras el primer arranque de una unidad y puesta en servicio de la unidad, la mayoría de los contaminantes que se encuentran en la ruta del vapor son los transportados por el vapor. Por tanto, el control de la calidad del vapor es fundamental.

Es interesante puntualizar que durante la puesta en marcha inicial y la puesta en servicio, cualquier contaminante derivado del proceso de fabricación, los conservantes de almacenamiento y otras circunstancias únicas de la primera puesta en marcha se eliminan casi por completo. Sin embargo, cuando un componente se ha retirado para reconstruirlo o repararlo, es una buena costumbre examinarlo y posiblemente limpiarlo antes de volver a ponerlo en servicio.

Desafortunadamente, es posible que una unidad funcione durante años por debajo de los niveles

recomendados, y luego una sola interrupción del sistema de varias horas de duración puede causar una entrada de contaminante suficiente para producir una tasa de deposición altamente perjudicial para el funcionamiento confiable y continuo de la unidad.



Figura 5-3. El resultado de una entrada de una cantidad considerable de agua de mar en el condensador, y la deposición de sal (NaCl) en una hilera de álabes giratorios.

La Figura 5-3 muestra una unidad que usa agua de mar para enfriar en el condensador. Esta unidad funcionó de forma fiable hasta que se produjo una fuga grave de varias horas de duración. La consiguiente deposición de contaminantes provocó que fuera necesario que la unidad se apagara y se limpiara por completo (incluida la eliminación de varias filas de álabes giratorios para permitir la limpieza de las raíces de éstos y la parte del rotor de la fijación de la raíz). Esta fue una interrupción costosa, pero no tan costosa (en términos de tiempo y material) si ni se hubiese apagado la unidad, ya que posiblemente hubiera surgido necesidad de reabrir la unidad dentro de un período corto de tiempo para corregir el daño de los álabes (y posiblemente la corrosión del rotor), con la consecuente compra de álabes de repuesto.

5.2 La composición de los depósitos

La composición y la concentración de los compuestos depositados en las superficies de los componentes del recorrido del vapor dependen de su origen. Independientemente del nivel de cuidado que tengan los operadores de la planta para limitar su presencia, las impurezas accederán desde diversas fuentes y estarán presentes en el vapor. Habrá una deposición persistente, posiblemente lenta, a lo largo de la vida operativa de la unidad. Para clasificar mejor estos compuestos de por vida, hay que considerar los que acceden a través de fugas en el ciclo, de algún proceso secundario de intercambio de calor o de mantenimiento del sistema, y los que están presentes como consecuencia de algún tipo de tratamiento realizado en el fluido de trabajo.

Probablemente los agentes corrosivos más frecuentes que afectan a la trayectoria de los álabes (y potencialmente más dañinos) son el cloruro de sodio y el hidróxido de sodio. La introducción de contaminantes cáusticos en el ciclo de agua/vapor se atribuye generalmente a la entrada de sal común (NaCl) en el sistema, y a la disociación de este compuesto en iones de sodio (Na) y cloro (Cl), que pueden recombinarse con iones de hidróxido (OH) e hidrógeno (H) para formar hidróxido de sodio cáustico (NaOH) y ácido clorhídrico (HCl).

Dado que estos compuestos se controlan normalmente a niveles extremadamente bajos, es necesario considerar los mecanismos por los que su deposición y concentración se incrementa hasta un nivel que inicia alguna forma de daño por corrosión.

Cuando la presión y la temperatura dentro de la trayectoria del vapor cambian, las moléculas depositadas podrían alcanzar las condiciones de equilibrio. Es posible que esto no siempre se pueda lograr fácilmente y que se requieran períodos prolongados de funcionamiento en las nuevas condiciones para lograrlo. Esto se debe a un retraso de tiempo antes de que las temperaturas del metal de los componentes principales puedan alcanzar una nueva condición de funcionamiento. Dependiendo de su ubicación dentro de la ruta del vapor, la solución de hidróxido de sodio en estos escondites tomará diferentes períodos de tiempo para lograr una nueva condición de equilibrio. Estos retrasos de tiempo pueden dejar una solución de hidróxido de sodio en un estado particularmente activo durante períodos prolongados cada vez que se produce un cambio de presión y temperatura dentro de la trayectoria del vapor.

Este aumento de actividad también es posible cuando una unidad está funcionando en condiciones de vapor fuera de diseño y los cambios en la temperatura del vapor de entrada provocan una fluctuación o variación en las temperaturas de la etapa. En estas condiciones, los componentes y regiones de la unidad que deberían estar en una "región sin hidróxido de sodio" se mueven a una "región con hidróxido de sodio activo" y, como consecuencia, pueden sufrir un ataque corrosivo.

5.3 Modificando el ambiente corrosivo del vapor

Aunque la acción corrosiva puede iniciarse en muchos entornos, algunos promueven un ritmo más rápido de agresión química y producen una condición en la que el deterioro alcanza un nivel peligroso o inaceptable en un periodo relativamente corto. La parte de la unidad que más a menudo está sometida a daños corrosivos es la correspondiente a las últimas etapas de la sección de baja presión. Aquí es donde está presente la humedad, y donde varios mecanismos pueden hacer que las temperaturas fluctúen hasta el punto de que partes de la unidad estén operando en las regiones húmedas o sobrecalentadas.

La sección de baja presión de la unidad es la parte en la que se forma agua por condensación, la parte que existe debajo de la "Línea Wilson". Esta agua capturarán los iones corrosivos disponibles y luego los llevará a recovecos o grietas donde se acumularán. Finalmente, bajo condiciones ambientales adecuadas, se volverán activamente corrosivos y atacarán los metales del paso del vapor.

A plena carga, y después de la expansión a través de la sección de alta presión, el recalentamiento y la expansión adicional a través de las etapas de recalentamiento y de la sección de baja presión, el vapor fluirá a través de la línea de saturación, donde la mezcla de dos fases se sobresaturará. Entonces se formará agua en la Línea Wilson, el punto en la que se produce la transferencia de calor de la fase de vapor a la líquida. Desde este punto de formación de agua hasta que el vapor llega al condensador, hay agua libre en el fluido de trabajo. En este punto [para muchos diseños fósiles es la penúltima etapa (L-1) de la unidad], los iones corrosivos son capturados y transportados por el agua. Estos iones corrosivos pueden llevarse a regiones de la etapa donde se acumularán y, en el entorno correcto, se concentrarán. Si esta unidad continúa funcionando a plena carga, estos iones no podrán afectar el material de la hilera de álabes, ya que se diluirán y no reaccionarán con el acero. Desafortunadamente, pueden ocurrir dos condiciones, ambas capaces de hacer que estos iones recolectados y depositados sean químicamente agresivos:

- Cambios en las condiciones operativas del paso del vapor
- Apagado de la unidad

5.3.1 Cambios en las condiciones operativas del paso del vapor

Cualquier acción de operación que cambie las condiciones del vapor dentro de la unidad modificará el ambiente en el lugar donde existen los iones corrosivos. Considerando los factores que conducen a tales cambios:

Cambios de carga de la unidad

A medida que la demanda de carga de una unidad se reduce para satisfacer las demandas del sistema, la cantidad de vapor admitida en la unidad se reducirá, lo que provocará un desplazamiento hacia la derecha en el diagrama de Mollier (Figura 5-4). Esto moverá algunas filas de álabe de la trayectoria del vapor de una condición saturada a una sobrecalentada.

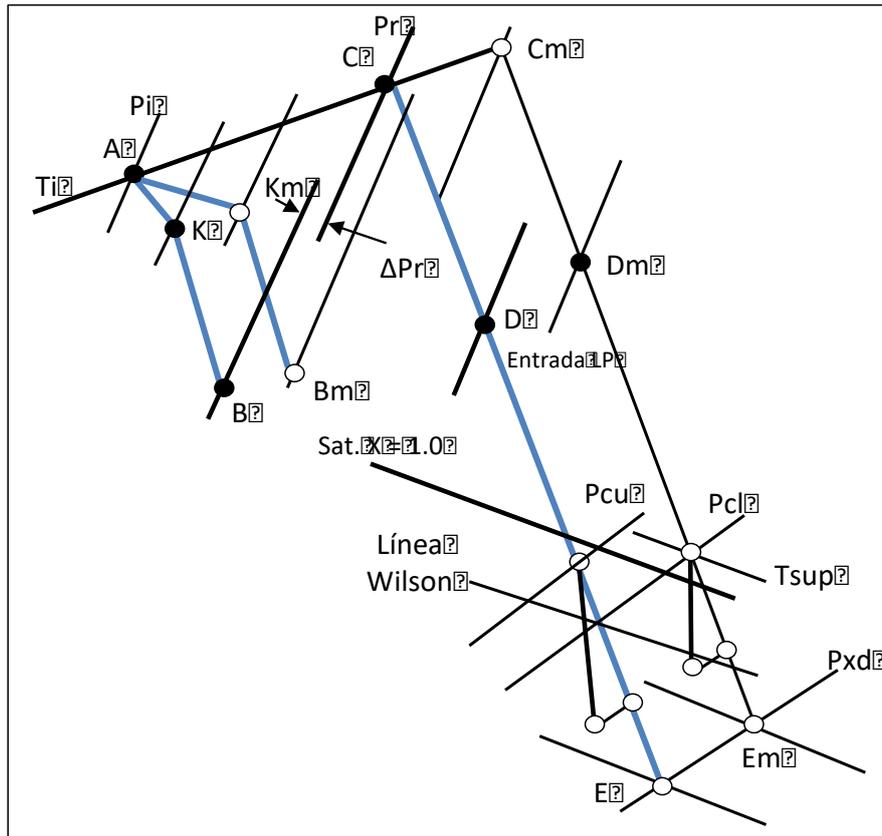


Figura 5-4. Efecto en la expansión en la sección de baja presión de un cambio de carga de la unidad.

En esta figura la carga se ha reducido mediante admisión parcial en arco del escalonamiento de control en la sección de alta presión. El escape de la sección de alta presión pasará de "B" (plena carga) a "Bm" (carga parcial). Se produce un recalentamiento intermedio hasta "C" (plena carga) o "Cm" (carga parcial). El escape final de la sección de baja presión se mantiene en "Pxd", pero el título de vapor ha cambiado de "E" a "Em", que es sensiblemente más seco.

Cambio en la condición del vapor de entrada

Si las condiciones iniciales del vapor, la presión o la temperatura se ajustan para cumplir con las demandas de carga más bajas, la línea de expansión se ajustará nuevamente, provocando un cambio de la humedad en las distintas etapas.

Considere la Figura 5-5. Para satisfacer la demanda de carga reducida y permitir que la etapa de control permanezca completamente abierta (sin introducir una pérdida de admisión parcial), la presión inicial se reduce de "Pd" a "Pm". Se muestra que esto ocurre a la misma temperatura inicial "Td". Con este cambio en la presión de entrada de vapor, la línea de expansión de baja presión se mueve hacia la derecha en el diagrama de Mollier. La consecuencia es que la sección de baja presión

entra en la región saturada más tarde en la expansión, y las etapas que se mueven a la región de sobrecalentamiento ahora comenzarán a desplazar la humedad con los iones corrosivos. Esta humedad corrosiva se recombinará en moléculas, se depositará y se activará, introduciendo la potencial corrosión.

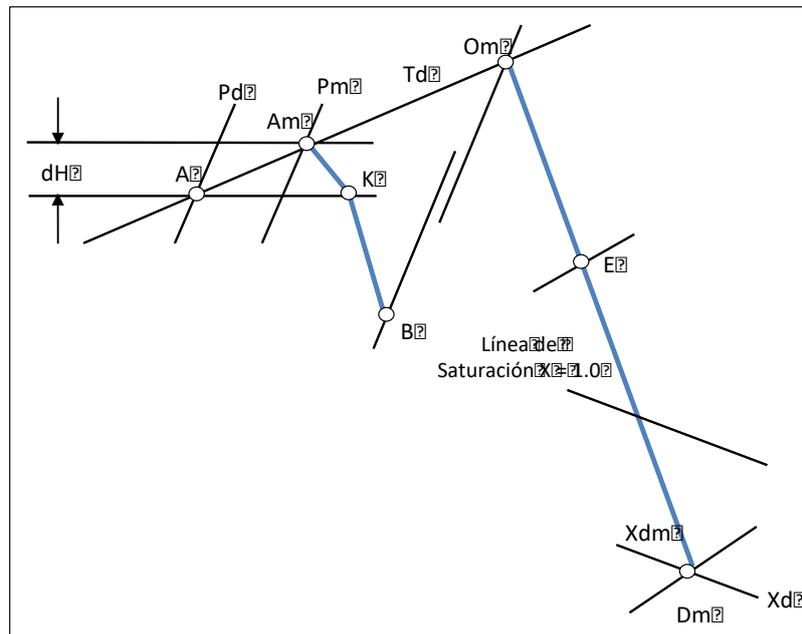


Figura 5-5. Se muestra el efecto de la reducción de la presión de vapor de admisión manteniendo el flujo del arco del escalonamiento de control completo.

Cambio de la temperatura de recalentamiento

Los efectos de los cambios de temperatura de recalentamiento se consideran en la Figura 5-6.. Aquí, los efectos de no mantener la temperatura son la modificación de la línea de expansión.

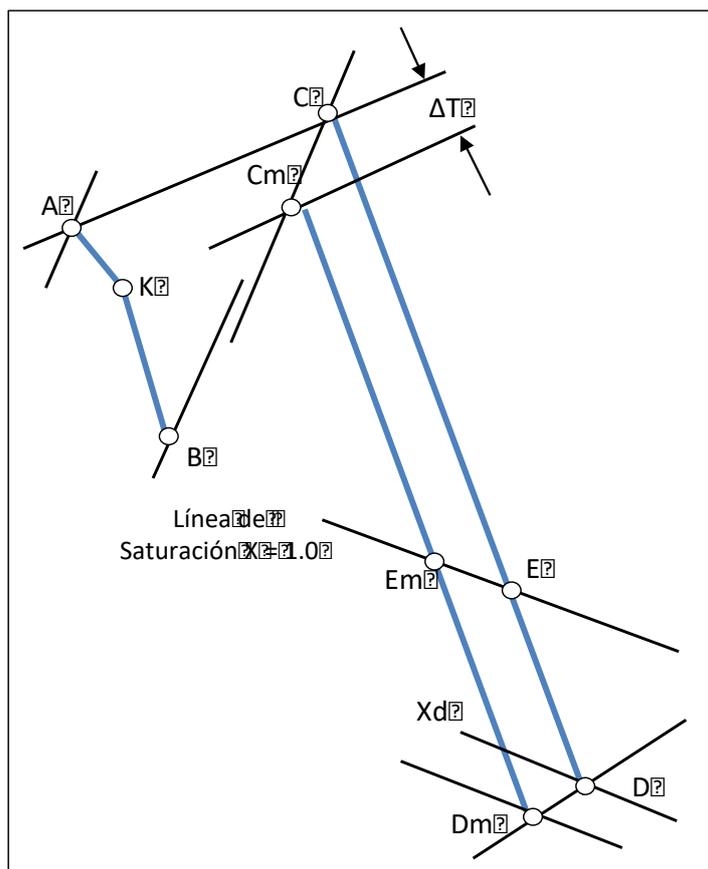


Figura 5-6. El efecto en las condiciones del vapor en el escape de no mantener la temperatura del vapor de recalentamiento. Se considera una reducción de la temperatura de recalentamiento de ΔT .

El ajuste más común es reducir la temperatura de recalentamiento. Los operadores lo harán ocasionalmente para reducir la temperatura en los álabes giratorios de la primera etapa de recalentamiento, que son un componente altamente sometido a estrés. En esta situación, se reduce la cantidad de expansión de recalentamiento/baja presión que se produce en la región sobrecalentada, y se mueven más etapas de baja presión a la región saturada.

Esta reducción de la temperatura de recalentamiento moverá las etapas hacia la región de humedad, reduciendo su potencial de verse afectadas por la corrosión. Sin embargo, también hará que algunas etapas que se hayan movido de la región sobrecalentada a la de humedad sean candidatas a recolectar iones corrosivos, que luego migrarán a recovecos y se concentrarán. Si la temperatura de recalentamiento se restablece nuevamente a su valor de diseño, estas etapas saturadas pasan a funcionar en sobrecalentamiento y cualquier agregación de iones corrosivos podría activarse.

Cambios en la eficiencia del paso del vapor

Si cambia la eficiencia de cualquier parte de la expansión de la trayectoria del vapor, esto afectará la pendiente (o forma) de la línea de expansión.

Considere la Figura 5-7: una reducción en la eficiencia de toda la sección de baja presión después de dejar la sección de recalentamiento provoca una reducción en la energía disponible de esta sección de "dH". Aquí, la línea de expansión de baja presión se ha movido hacia la derecha en el Diagrama de Mollier y habrá movido las etapas de la condición saturada a la sobrecalentada, haciéndolas más susceptibles a la acción corrosiva si los iones corrosivos estuvieran presentes en los componentes de la ruta del vapor.

probable que cualquier proceso de limpieza elimine grandes cantidades de compuestos químicamente agresivos que han migrado a los recovecos y existen en varios lugares a lo largo del paso del vapor. Si se sospecha que existen tales compuestos, se debe considerar su eliminación si se prevé que su presencia obligue a la unidad a dejar de funcionar dentro de un período de tiempo inaceptable.

Los depósitos tanto en los álabes como en las paredes laterales tienen el potencial de causar un deterioro de la eficiencia del escalonamiento. Esta pérdida de eficiencia ocurre como consecuencia del desprendimiento del flujo y la turbulencia en el vapor que fluye. Estos depósitos también pueden contener iones corrosivos que en las condiciones adecuadas pueden provocar corrosión. Por lo tanto, cuando se abre una unidad para inspección y el paso del vapor está accesible, es un procedimiento normal limpiar estos componentes. Esto se hace normalmente con algún proceso de limpieza con chorro, aunque las técnicas manuales se pueden utilizar con mayor eficacia. Suelen requerir mucha mano de obra y son más caras.

A pesar de la cantidad de tiempo que el departamento de fabricación del proveedor de turbinas dedica a preparar los componentes de la ruta de vapor para lograr los requisitos de diseño la superficie, siempre habrá algún tipo de acumulación en las superficies originales y deterioro que introducirá pérdidas de energía cuando la unidad entre en funcionamiento. Este hecho no se puede evitar.

Sin embargo, el ingeniero de mantenimiento tiene la responsabilidad de restablecer las condiciones originales de la ruta de vapor consideradas óptimas desde una perspectiva de rendimiento/tiempo/costo, en la mayor medida posible y en consonancia con los costos aceptables. Normalmente, restablecer las condiciones originales no es posible sin costos excesivos y prohibidos. Además, tales acciones podrían provocar algún cambio en el perfil de los componentes originales, lo que sería inaceptable. Afortunadamente, existe un recurso adecuado y equilibrado: limpiar a presión los componentes.

Se sabe que las unidades con compuestos corrosivos reconocidos se han vuelto a poner en servicio. Esto es imprudente y, en última instancia, hará que se incurra en costos que podrían ser mucho mayores que el costo de la eliminación inicial cuando se encuentren estos compuestos. Desafortunadamente, el costo de eliminación de depósitos puede ser alto, requiriendo cierto grado de desmontaje y, en las condiciones más severas, el reemplazo de piezas. La tentación de ignorar esta situación a menudo es difícil de superar.

5.5 Métodos de limpieza del paso del vapor

La eliminación de depósitos es un proceso normal que se emplea cuando una unidad se para y deja de prestar servicio temporalmente.

Habrà que evaluar una serie de consideraciones al seleccionar el proceso de limpieza más apropiado. Por ejemplo, para una unidad que se retira de servicio después de un período corto de funcionamiento (por ejemplo, para una inspección de garantía), el proceso de limpieza, mientras se eliminan los depósitos, puede hacer que la calidad de la superficie se deteriore. Esto es indeseable, pero puede ser necesario para permitir el examen no destructivo. Un método de limpieza demasiado agresivo puede causar el deterioro de la superficie.

Si bien estas son consideraciones menores, particularmente para una unidad madura, el proceso de limpieza seleccionado debe considerarlas. Los procesos disponibles que deben considerarse son los siguientes:

5.5.1 Limpieza con chorro del paso del vapor

La limpieza a chorro de los componentes de la ruta de vapor es un procedimiento de mantenimiento normal y una actividad típica en cada parada. Si un operador tiene la intención de realizar evaluaciones de eficiencia en una interrupción, se debe evaluar la condición de los componentes de

la ruta de vapor que impactan en la eficiencia de la expansión antes de intentar eliminar los depósitos. Aunque el acto de eliminar los depósitos puede parecer una operación relativamente simple, siempre existe la posibilidad de que dicha limpieza pueda causar algún nivel adicional de deterioro si no se controla y se realiza con cuidado. Por lo tanto, para limpiar eficazmente los componentes, se deben controlar ciertos parámetros del proceso de limpieza.

Los materiales más comunes utilizados para este proceso de limpieza mediante chorro son los siguientes

- Arena de carburo de silicio. La arena puede utilizarse eficazmente en un chorro de agua.
- Óxido de aluminio
- Cáscara de nuez
- Granos de vidrio
- Óxido de circonio
- Bolas de dióxido de carbono

La limpieza a chorro es un procedimiento rutinario, pero si no se controla, puede dañar los álabes. La Figura 5-8 muestra el borde de descarga de un álabe estacionario que ha sido limpiado con chorro sin control ninguno del proceso. En este caso, los delgados bordes de descarga se habían degradado y adelgazado, hasta cierto punto, como consecuencia de la erosión de las partículas sólidas. Estos bordes de salida se han doblado bajo el efecto del medio de limpieza (arena de carburo de silicio).

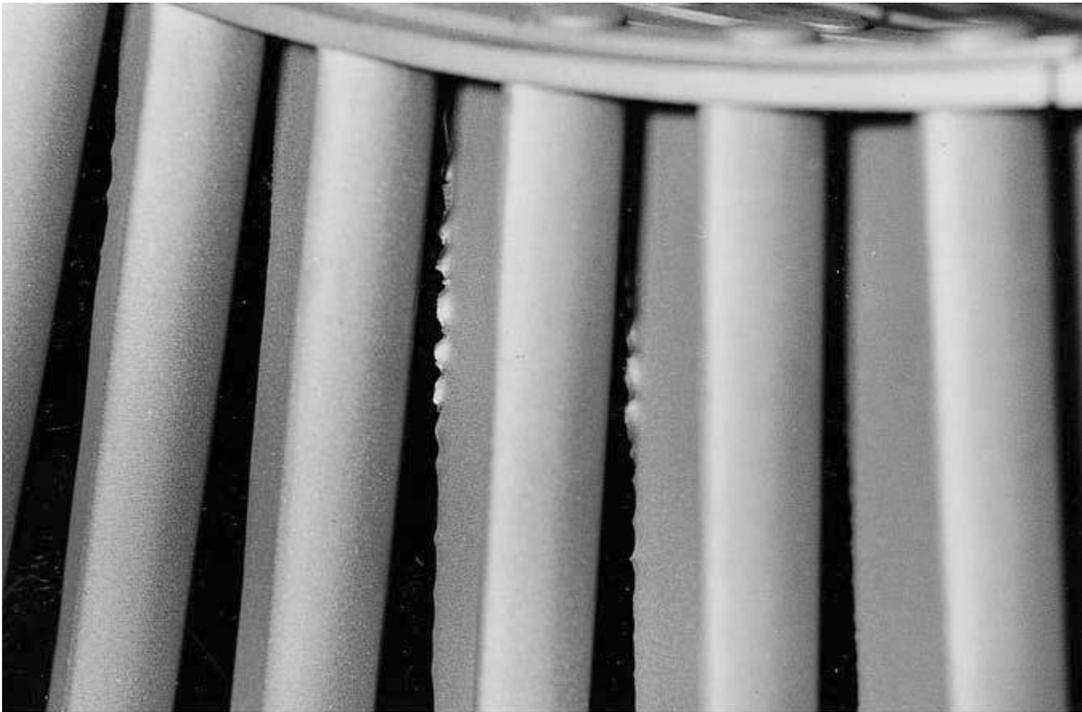


Figura 5-8. Daños en los bordes de estela de álabes causados por un mal control del proceso de limpieza mediante chorro.

Este daño podría haberse evitado mediante un examen inicial de las superficies de los álabes y el estado general de la unidad, y luego mediante una limpieza con chorro aplicando un procedimiento adecuado. Cuando los álabes tienen bordes de estela delgados, es mejor volver a calibrar el procedimiento de limpieza con chorro para que no se dañen. Cuando estos elementos de álabe se vuelvan a poner en servicio, será necesario cambiarlos en caso de una interrupción futura, y los álabes de repuesto podrían solicitarse en la parada actual para cambiarlas en cuatro o cinco años. El hecho de que estén dañados en la medida que se muestra en la Figura 5-8 requiere que se tomen medidas correctivas de algún tipo en la presente parada.

5.5.2 Limpieza a mano los componentes del paso del vapor

Hay situaciones en las que se requiere o se justifica la limpieza manual de la superficie. Normalmente, si se emplea la limpieza manual, se utilizan agentes químicos y se realiza en componentes individuales, utilizando un disolvente en un paño o cepillo. Esto tiene ventajas cuando la cantidad de depósito es pequeña y la superficie original todavía está presente en los componentes de la trayectoria del vapor. Es importante que el disolvente escogido no contenga azufre, cloro, sodio, fósforo o cualquier elemento que pueda formar compuestos agresivos bajo la acción del vapor y/o calor.

Es de vital importancia tener en cuenta que la limpieza con solventes o químicos puede ser peligrosa tanto para el trabajador como para los componentes. Se requiere el uso de los EPIs pertinentes y prestar extrema atención y cuidado en esta operación.

Además, ocasionalmente, el operador optará por eliminar las escamas depositadas con métodos manuales. Normalmente no se recomienda con el uso de ningún dispositivo metálico o duro, como una lima. A menudo, el lado convexo se puede limpiar con un paño abrasivo fino. Sin embargo, es difícil limpiar la superficie cóncava de esta manera, debido a la curvatura de ésta. En estos casos es preferible la limpieza mediante chorro.

5.5.3 Lavado con agua

El lavado con agua es un asunto polémico, considerado por muchos como ineficaz. La razón es que muchos depósitos pueden consistir en compuestos tanto solubles como insolubles. Los compuestos solubles se eliminarán mediante el lavado, pero los insolubles no, a menos que el agua los elimine por medios mecánicos como fuerzas de impacto.

Un ejemplo son los óxidos típicamente formados por hierro y cobre. Éstos serán difíciles de eliminar mediante lavado con agua y, a menos que se elimine la incrustación completa, la eliminación de las porciones dejará pequeños cambios escalonados en el estado de la superficie que provocarían el desprendimiento del flujo, en particular para las etapas con números de Reynolds grandes.

Sin embargo, algunas unidades parecen beneficiarse de los efectos del lavado con agua. Este es particularmente el caso de las unidades de condiciones de vapor moderadas-bajas, y se ha demostrado que es efectivo en unidades geotérmicas que operan con vapor saturado.

Ciertamente, en las turbinas que funcionan con vapor de alta temperatura y alta presión, existen considerables dudas sobre la capacidad de mantener alguna mejora con el lavado con agua, pero si hay mejoras, entonces tales procedimientos pueden estar justificados.

5.6 Patrones de deposición

Los patrones de deposición son difíciles de predecir en cualquier componente de la ruta del vapor, ya que parecen depender en un grado considerable del tipo de contaminantes que existan en el sistema, factor de carga de la unidad y una serie de otras características difíciles de definir de la unidad y el modo de operación.

Sin embargo, existen ciertas diferencias inherentes entre las etapas que se encuentran en las regiones sobrecalentadas y las saturadas.

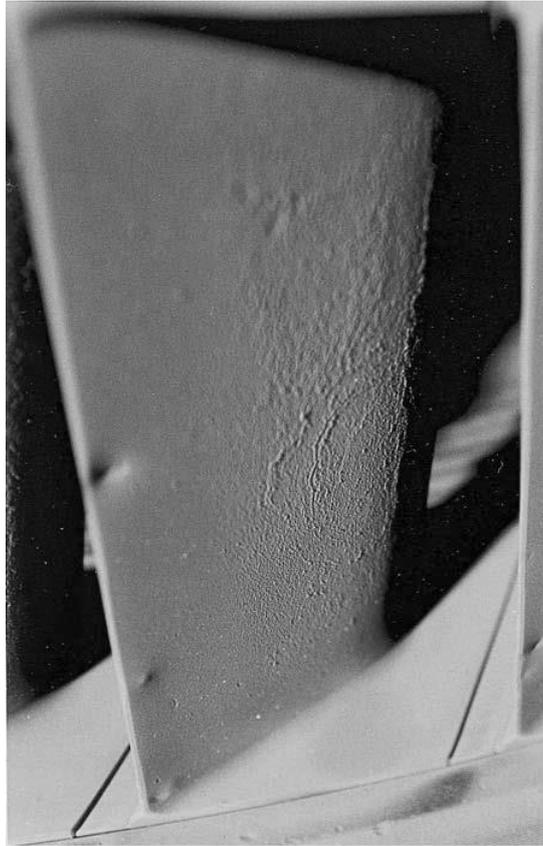


Figura 5-9. Una álabes de reacción de alta presión con depósitos en la cara de succión.

La Figura 5-9 muestra un álabes de alta presión de una unidad de reacción. El patrón de deposición es relativamente constante a través de la cara de succión. Existe un depósito más profundo en la región de la garganta del paso, que puede deberse a una reducción brusca de la presión en este lugar, así como a la influencia del desprendimiento del flujo que podría ocurrir debido a la curvatura del perfil.

La deposición que se produce en las superficies sobrecalentadas tiende a distribuirse más uniformemente a lo largo del álabes con depósitos tanto en las superficies de succión como en las de presión.

La Figura 5-10 muestra los álabes de una sección de alta presión que ha estado en servicio durante más de seis años después de la última parada y limpieza. Los depósitos son ligeros y se distribuyen uniformemente por la superficie de la cara de succión.



Figura 5-10. Álabes de acción de alta presión con depósitos en la cara de succión.

Por otro lado, es de esperar en la mayoría de las etapas que los depósitos en la cara de presión tienden a ser más gruesos que en la cara de succión.

Sin embargo, la cara de succión tiende a tener depósitos gruesos después de la posición de desprendimiento del flujo. Esta diferencia se debe a que el vapor y los contaminantes transportados se ven forzados a un contacto más intenso en el lado de presión, tendiendo a adherirse en mayores cantidades. La Figura 5-11 muestra depósitos masivos en el borde de ataque de los álabes estacionarios de una unidad, y en la Figura 5-12 se puede observar la cara de succión de esta misma etapa. En este caso, se perdió el control de la caldera y se produjo una oxidación intensa, lo que provocó depósitos significativos tanto en las paletas estacionarias como en las giratorias.

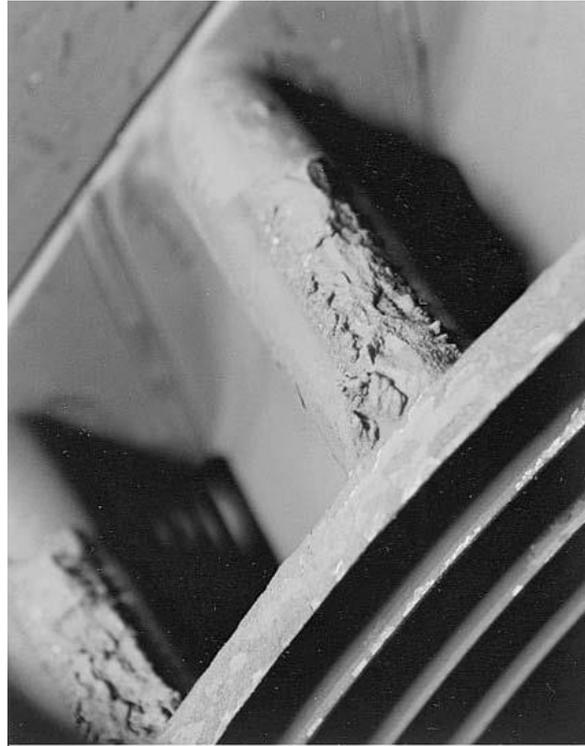


Figura 5-11. Depósitos masivos en el borde de ataque de álabes de una fila estacionaria.

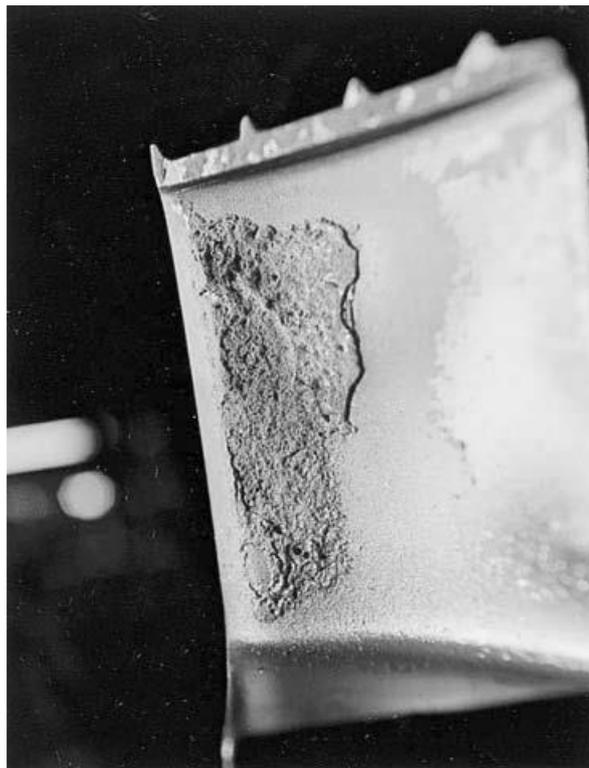


Figura 5-12. Depósitos masivos en la cara de presión de una fila de álabes estacionarios.

5.7 Corrosión del paso del vapor

Se sabe que el sistema de cuchillas es susceptible a daños por corrosión. Los agentes de la falla están presentes en forma de altas tensiones, compuestos agresivos llevados a la unidad con el vapor y los efectos dañinos acelerados por las altas temperaturas que existen en muchos lugares.

Los agentes corrosivos se introducen en el sistema de vapor/agua a partir de varias fuentes, como se ha discutido.

A partir de esto, se determina que los agentes corrosivos que obtienen acceso pueden ser transportados a lo largo del ciclo, tienen la capacidad de depositarse y acumularse durante la operación y, en última instancia, resultar en daños o fallas que podrían obligar a la unidad a dejar de estar disponible durante períodos prolongados.

Los agentes corrosivos de interés contienen elementos o compuestos que contienen azufre, sodio, fósforo o cloruro. Con bastante frecuencia se introducen en el sistema desde cualquier número de ubicaciones de "entrada", por el mal funcionamiento del equipo de purificación de agua o por tratamientos químicos de limpieza y conservación llevados a cabo en el ciclo de agua/vapor. Esta no puede considerarse una lista exhaustiva de sus medios de introducción, y en muchas ocasiones se ingresa de otras fuentes.

Debido a que la turbina es parte de un ciclo termodinámico complejo, su fluido de trabajo debe mantenerse a niveles muy altos de pureza, además, y como es obvio, la turbina interactúa con otros equipos que contienen fluidos.

operando a un nivel mucho más alto de impurezas, el aislamiento de un sistema de fluido de otro es vital. Siempre existe la posibilidad de que ingresen iones corrosivos de estas otras partes del sistema total en la turbina. Si bien otras partes del sistema son susceptibles a estas impurezas, es quizás la turbina de vapor la más sensible y puede sufrir los daños más graves en caso de que se produzca una acción corrosiva. La necesidad de limpieza, incluido el mantenimiento de la pureza del agua mediante el pulido y el aislamiento, es de suma importancia para mantener la confiabilidad del sistema.

Dado que la turbina forma parte de un complejo ciclo termodinámico, su fluido de trabajo debe mantenerse en niveles de pureza muy elevados, y dado que la turbina interactúa con otros equipos que contienen fluidos que operan con un nivel de impurezas mucho más alto, es vital aislar un sistema de fluidos de otro. Siempre existe la posibilidad de que entren en la turbina iones corrosivos de estas otras partes del sistema. Aunque otras partes del sistema son susceptibles de sufrir estas impurezas, es quizás la turbina de vapor la más sensible y la que puede sufrir los daños más graves en caso de que se produzca una acción corrosiva. La necesidad de limpieza (incluyendo el mantenimiento de la pureza del agua mediante el tratamiento y el aislamiento) es de suma importancia para mantener la fiabilidad del sistema.

Sólo una parte del número total de iones que acceden a la turbina desde estas diversas fuentes son corrosivos o tienen el potencial de producir compuestos corrosivos bajo la acción de presión y temperatura. Sin embargo, si las condiciones locales de vapor son favorables y se produce una acción de corrosión, esta combinación tiene el potencial de causar interrupciones dramáticas y costosas, y muchas etapas de la turbina pueden considerarse en riesgo. Las etapas más seriamente "en riesgo" se encuentran en la región que opera más allá de la línea de saturación. Esto se debe a que en estas etapas es donde se forma la humedad, y muchos de estos iones corrosivos son capturados inmediatamente por las moléculas de agua en esa región, y luego transportados por la humedad suspendida a través del resto de la ruta del vapor.

Estos compuestos agresivos, una vez capturados y transportados por la humedad, tendrán una parte de su población total depositada en las superficies de los componentes de la trayectoria del vapor. Fluirán con las películas de humedad formadas y se llevarán a recovecos donde pueden acumularse. Luego, con las condiciones cambiantes del vapor que ocurren en toda la unidad, y dependiendo de una serie de requisitos operativos, se concentrarán y se volverán químicamente agresivos bajo estas condiciones modificadas.

Los estrictos requisitos de control de la pureza del agua se comprenden bien, y el personal operativo normalmente tiene instrucciones o procedimientos documentados para tomar medidas correctivas para modificar y controlar la calidad. Desafortunadamente, pueden ocurrir fugas graves y las impurezas ingresan al sistema muy rápidamente, a menudo antes de que se puedan tomar medidas correctivas. Incluso las soluciones muy diluidas agregadas al ciclo de energía (difíciles de detectar) pueden concentrarse en los escondites o recovecos durante la operación hasta el punto de introducir problemas.

5.7.1 Los recovecos (“Hideouts”)

La aparición de escondites o recovecos es un factor importante para proporcionar condiciones para que se produzcan las distintas formas de corrosión. Los recovecos donde se suelen acumular los compuestos se localizan en las partes ensambladas del paso del vapor y son una consecuencia natural de los ensamblajes, ajustes por contracción y, en ciertas circunstancias, la acumulación de errores en las piezas fabricadas. Los más importantes son los siguientes:

Huecos de los tetones de las coverbands

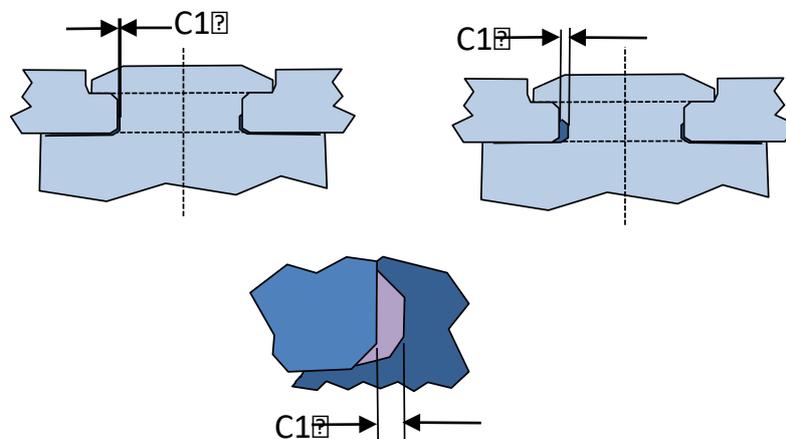


Figura 5-13. Recovecos producidos por el proceso de remachado y fijación de la coverband de la superficie superior del álabe. A la izquierda y a la derecha se muestran dos diseños de fijación distintos

Huecos de los alambres antivibración

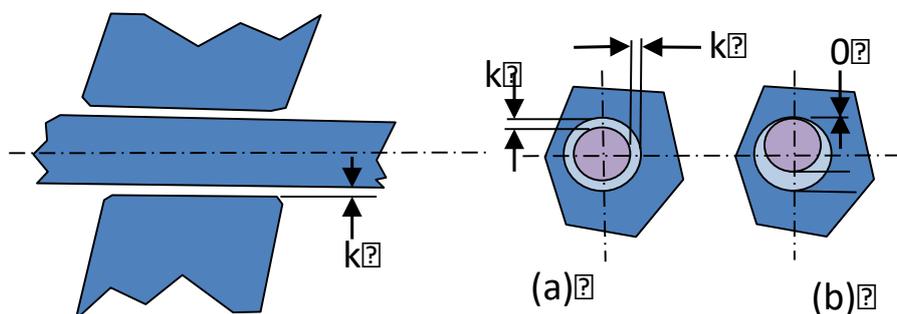


Figura 5-14. Alambre antivibración, mostrando posibles recovecos.

- **Encogimiento de los discos.** Posiblemente, la acción corrosiva más crítica que pone en peligro la trayectoria del vapor se produce en el ajuste entre el eje central y los discos de rotor. En funcionamiento, esta tensión de tracción del disco sobre el ajuste en el eje se alivia, pero a medida que la velocidad de la unidad se reduce desde el funcionamiento hasta la parada, el nivel de tensión aumenta debido al encogimiento de los discos y, por

tanto, a la tendencia del disco a aumentar el tamaño de su circunferencia interior. En estas condiciones, los iones corrosivos se vuelven más concentrados y agresivos.

- **Encaje de la raíz del álabe con el rotor.** Es probable que la corrosión encuentre recovecos en la zona de transferencia de carga de la fijación.

5.8 Tipos de mecanismos de corrosión

Existen varios mecanismos corrosivos que tienen gran potencial de causar daños o deterioro. Los que se dan con mayor frecuencia en la trayectoria del vapor y en los álabes son:

5.8.1 Agrietamiento por corrosión bajo tensión (“Stress corrosion cracking”, SCC)

Para que el SCC se produzca, deben darse tres condiciones en los elementos: la presencia de iones corrosivos, una tensión en el componente y que el material sea susceptible. La velocidad a la que se inician y propagan estas grietas depende de la temperatura presente para favorecer la reacción química. En muchas partes del recorrido del vapor, existe una tensión residual de tracción, tanto por diseño como, accidentalmente, por consecuencia de la fabricación. En estos lugares puede producirse fácilmente una SCC. La velocidad a la que se generan y propagan las grietas corrosivas depende de la concentración de productos corrosivos y de la magnitud de la tensión y la temperatura local.

5.8.2 Corrosión por picadura

Los componentes ubicados por más allá de la región de humedad son particularmente susceptibles a las picaduras por corrosión. Este fenómeno ocurre en la superficie de varios componentes, más a menudo los álabes de los escalonamientos estacionarios y giratorios. Sin embargo, este fenómeno a menudo se puede notar en las caras de las coronas o de los discos de muchas unidades, y en puntos de sellado del eje (Figura 5-15). Las picaduras suelen indicar la presencia de cloruros.

La corrosión por picaduras es un fenómeno de la superficie y es el resultado de la reacción química de un agente corrosivo agresivo en la superficie del metal. Los hoyos que se forman en una superficie son básicamente semicirculares, con una profundidad de pozo de aproximadamente la mitad del ancho del pozo. El crecimiento del pozo es normalmente lento, y hasta cierto punto se autopropaga cuando hay iones agresivos retenidos en el pozo y la corrosión continua. Las picaduras son similares a la corrosión por grietas, ya que puede haber un nivel de acumulación y concentración suficiente para causar daños.



Figura 5-15. Picaduras corrosivas en el sellado del extremo del eje de un rotor. Se pueden ver hoyos corrosivos en el cuerpo del rotor y las tiras de sellado.

5.8.3 Corrosión por fatiga

Muchos componentes están sometidos a tensiones alternas de una magnitud tal que, en última instancia, la fatiga contribuye a su deterioro. Si un elemento corrosivo contamina aún más el componente, la capacidad de éste para resistir el fallo se ve aún más afectada. En estas circunstancias, el fallo se producirá a niveles de tensión más bajos o en un periodo de tiempo más corto con la misma tensión. La Figura 5-16 muestra una grieta procedente de un orificio de alambre antivibración, en la que el mecanismo de inicio del fallo es la corrosión por fatiga.



Figura 5-16. Una grieta en un álabe que se inicia en el orificio del alambre antivibración.

Esta última forma de fallo se distingue del SCC en que la tensión aplicada es cíclica y el fallo es un mecanismo de tipo fatiga. Estos fallos tienden a iniciarse en aquellos puntos en los que se pueden concentrar los productos corrosivos y en los que un nivel de concentración de tensiones provoca elevados efectos locales de tracción. Estas grietas pueden ser transgranulares o intergranulares.

6 MECANISMOS DE DAÑOS DEBIDOS A LA HUMEDAD EN EL PASO DEL VAPOR

Debido a la masa relativamente mayor de las partículas de humedad, éstas no pueden pasar por los escalonamientos con el mismo grado de aceleración que el vapor seco. Estas partículas de agua consumirán trabajo del vapor en un intento de igualar las velocidades del vapor.

Estas velocidades de vapor actuarán sobre las partículas de agua porque el vapor acelera y cambia de dirección en su paso por los escalonamientos. Sin embargo, las partículas de agua no podrán acelerar y lograr la igualdad de velocidad debido a su mayor masa. Por lo tanto, las partículas de agua tendrán trayectorias dentro de la trayectoria del vapor que son diferentes a las del vapor. Muchas chocarán con las superficies de los componentes de la trayectoria del vapor, sobre las que se depositarán.

Después de la deposición, esta humedad no podrá volver a entrar en el flujo de vapor principal, pero seguirá experimentando grandes fuerzas del vapor que fluye. Esto tiende a hacer que la película de agua resultante fluya en la dirección general de las partículas de vapor. Con las partículas de humedad que se depositan constantemente en la superficie por los continuos contactos, al final habrá una película significativa de agua que fluye a través de las superficies de la trayectoria del vapor.

Es esta humedad depositada la que tiene el potencial de causar varias formas de daño a los componentes de la trayectoria del vapor, ya que se acumula y vuelve a entrar en el flujo de vapor como gotas más grandes. Además, la parte de la humedad transportada que permanece en el vapor reducirá la eficiencia del recorrido del vapor, aunque su presencia no contribuya a ningún daño mecánico en los propios componentes del recorrido del vapor.

Hay otras fuentes de agua además de las formadas por la condensación: en total existen tres fuentes principales de agua dentro del paso del vapor. Las dos primeras enumeradas aquí son agua contenida en el recorrido del vapor, pero que sólo existen en la región saturada. La lista completa incluye:

- El agua formada por la condensación del fluido de trabajo durante su expansión a través de las filas de paletas estacionarias y giratorias.
- El agua rociada en el escape de la sección de baja presión para eliminar el exceso de calor generado por el calentamiento por fricción durante el funcionamiento a carga parcial o ligera (esto se considerará con más detalle).
- Eualquier parte de la unidad conectada a otros equipos dentro del ciclo de vapor, es decir, el agua que vuelve a entrar en el recorrido del vapor desde fuentes externas.

6.1 La formación del agua

Hay tres posibles medios por los que se puede formar agua en la trayectoria del vapor:

- Condensación en partículas microscópicas a menudo impurezas o contaminantes contenidos en el fluido de trabajo. Sin embargo, los métodos modernos de tratamiento del agua de alimentación evitarían la contaminación en un grado excesivo. Si bien puede haber algunas impurezas presentes, que promuevan minimamente de condensación, es probable que la cantidad no sea suficiente para formar una parte significativa de la humedad total presente

en cualquier momento. Algunas de las impurezas se combinarán con el agua, y esto tiene otras implicaciones más insidiosas en términos de corrosión, pero es intrascendente en términos de formación y flujo de humedad.

- Condensación en las superficies de los componentes de la ruta de vapor. Para que las partículas de vapor presentes en el flujo principal se condensen en las superficies del paso del vapor, deben entrar en contacto con él y estar a una temperatura que cause condensación a la presión ambiental local. Sin embargo, estas superficies metálicas siempre están cubiertas por su capa límite, que tiende a estar a una temperatura ligeramente más alta que el vapor circundante. Esto se debe a que la energía de velocidad del vapor en la capa límite se ha reconvertido nuevamente en energía térmica, elevando la temperatura del vapor. Por lo tanto, las superficies con las que entran en contacto las partículas de humedad están por encima de la temperatura del vapor circundante y es poco probable que se forme condensación.
- Nucleación espontánea después de que se ha alcanzado un grado límite de super-saturación y ha habido suficiente tiempo para la transferencia de calor. Se ha demostrado mediante análisis que la única manera significativa en la que se puede formar suficiente humedad en el vapor es mediante este proceso.

6.2 Daños provocados por la humedad

La humedad en la trayectoria del vapor puede causar grandes daños mecánicos a los diversos componentes que conforman el paso del vapor. Este daño puede degradar la eficiencia y también hacer que la unidad deje de funcionar durante períodos prolongados para reparar y / o reemplazar piezas. Existen cuatro formas principales de daño que se deben considerar, causadas por agua formada en la ruta de vapor o rociada intencionalmente con fines de enfriamiento:

Erosión por impacto de humedad

Esta es una forma de erosión que se produce en borde de ataque de los álabes, en sus regiones exteriores. Este daño se produce como consecuencia de la gran fuerza de impacto que se desarrolla entre las partículas de humedad y el material del álabe.

Erosión del borde de estela

Esta es una forma de erosión que ocurre en la porción de descarga de los álabes de la última etapa cerca de la sección de la raíz. El daño es consecuencia de la recirculación del vapor y el agua llevados a los álabes desde la carcasa en la zona del escape.

Erosión por lamiendo

El daño ocurre cuando la humedad, en un lado de una junta metálica es forzada por un diferencial de alta presión a fluir entre las caras de la junta, eliminando el material mediante un proceso de lavado/cavitación.

Erosión por lavado

La erosión por lavado ocurre como pérdida de material a alta velocidad, posiblemente por vapor de alta presión que fluye a través de una superficie y elimina material.

Los siguientes apartados considerarán estos tipos de daños con mayor detalle y, cuando sea posible, explicarán el mecanismo o procesos de pérdida de material.

6.3 Erosión por impacto de humedad

Ésta es la forma más común de daño por agua en la ruta de vapor de la turbina. Para que ocurra esta erosión, la humedad debe acumularse en gotas considerablemente más grandes que las que existen por la formación de gotas de agua por nucleación. El daño resulta de las fuerzas de impacto desarrolladas entre las gotas de humedad transportadas por el vapor y el álabe.

Durante su paso entre los álabes, una parte de esta humedad transportada se depositará sobre los diversos elementos de la trayectoria del vapor y fluirá a través de sus superficies. Esta agua fluye como una película a través de las superficies hacia regiones donde la película se acumula en charcos más grandes. Eventualmente se desprenden de las superficies y vuelven a entrar en el flujo de vapor principal, moviéndose a velocidades considerablemente más bajas.

Esta humedad reintroducida, arrancada de la parte estacionaria (normalmente los elementos estacionarios de los álabes), provoca una "erosión por impacto" al chocar con el borde de ataque de los álabes en rotación. La pérdida de material es típica, como se muestra en la Figura 6-1, en la que aparecen cráteres en el borde de ataque y la extensión de la penetración en la superficie a lo largo de la cara de succión.



Figura 6-1. Erosión por impacto de la humedad en el borde de ataque de álabes.

6.3.1 Mecanismo de daño por impacto de humedad

Las gotitas formadas en la trayectoria del vapor no son en sí mismas lo suficientemente grandes como para causar un daño erosivo al impactar con las superficies metálicas de los elementos rotativos. Por lo tanto, estas pequeñas partículas de humedad deben agregarse a gotitas de un tamaño mucho mayor antes de que las fuerzas de impacto desarrolladas entre ellas y los álabes giratorios sean suficientes para causar la ruptura y pérdida del material de la superficie. La Figura 6-2 muestra el mecanismo de aglomeración del agua en la cara de succión en la zona de la descarga de los álabes estacionarios.

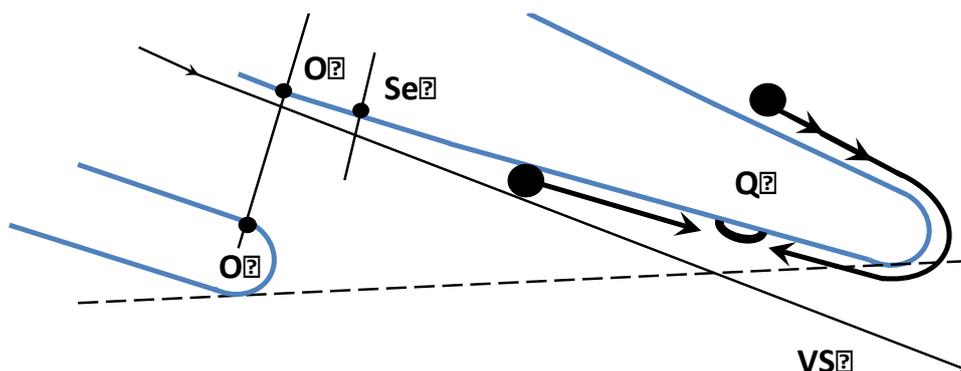


Figura 6-2. Flujo de humedad a lo largo de la zona de descarga y acumulación en la cara de succión de un álabe estacionario.

Esta zona de acumulación de humedad "Q" seguirá creciendo en la región de baja presión hasta que sea demasiado grande para resistir las fuerzas de arrastre del vapor que fluye. Estos charcos serán entonces arrancados de la superficie de la cola de succión y volverán a entrar en el flujo principal de vapor como gotas considerablemente más grandes. Como las gotas desprendidas de la descarga ya no tienen un tamaño que pueda ser transportado por el flujo de vapor principal se rompen en muchas gotas pequeñas, pero siguen siendo cientos de veces más grandes que las gotas originales, y tienen el tamaño suficiente para provocar la erosión por impacto de la humedad en el borde de ataque de los álabes giratorios.

Son estas gotas grandes, arrancadas del borde de estela del alabeado estacionario, las que causan el daño por "erosión por impacto" en los bordes de ataque del siguiente escalonamiento de rotor. Debido a su mayor masa, estas gotas, una vez arrancadas por las fuerzas del vapor de la cara de succión, aceleran desde la velocidad cero, pero no pueden acercarse a la velocidad del vapor, que es alta en la región de descarga. Por lo tanto, su impacto con el borde de ataque del álabe giratorio es en un ángulo incorrecto, como se muestra en el triángulo de velocidad de la Figura 3.8.3. Tras el impacto, se desarrollan grandes fuerzas de presión entre la superficie del álabe y las gotas de agua.

La Figura 6-3 muestra el triángulo de la velocidad del vapor a la salida de un escalonamiento de estator, que tiene una velocidad tangencial alta. Estos vectores de velocidad del vapor tienen un sufijo "s". Este triángulo de velocidad es típico de la región de la punta de un gran escalonamiento de álabes giratorios. El álabe tiene una alta velocidad tangencial "U" y el vapor se descarga desde la fila de álabes estacionarios a una velocidad "C1s", con un ángulo de descarga " α_1 ". Estas velocidades dan una velocidad de entrada relativa en la entrada de la fila de álabes giratorios de "W1s", con un ángulo relativo de " β_{1s} ". Superpuestos a este triángulo de velocidades del vapor están los componentes de velocidad de las gotas de agua, sufijo "w". Las gotas de agua, partiendo del reposo sobre la superficie de succión de la paleta, tienen una velocidad relativamente pequeña al descargarse de la fila de álabes estacionarios, siendo aceleradas a una velocidad "C1w" por el vapor que fluye. Estas gotas se descargan de la fila de palas estacionarias con el mismo ángulo de descarga " α_1 ". La velocidad tangencial del álabe giratorio no cambia, es "U". A continuación, se muestra el triángulo de velocidades de la gota de agua, con una velocidad de entrada relativa al escalonamiento de álabes giratorios de "W1w". Las gotas de agua entran en la fila de álabes giratorios con un ángulo relativo llamado "**Ángulo de sombra, ψ** ".

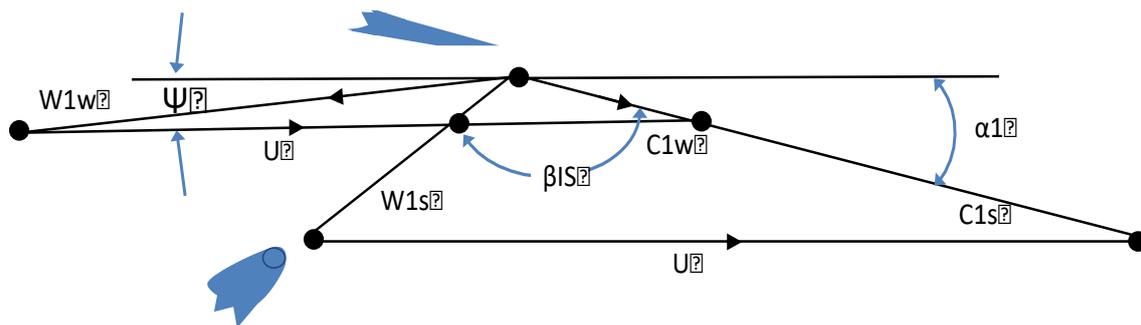


Figura 6-3. Los triángulos de velocidad para el vapor "s" y el agua "w" en la salida de un escalonamiento de estator de etapa húmeda.

Estas gotas grandes desprendidas de la descarga de la fila de álabes estacionarios son normalmente demasiado grandes (alrededor de 10^{-4} metros) para existir en el ambiente de vapor presente en esa zona. Por lo tanto, las gotas se descomponen en gotas de un tamaño que son capaces de mantener. Estas gotas todavía son considerablemente más grandes que las gotitas (aproximadamente 10^{-8} metros) formados por nucleación.

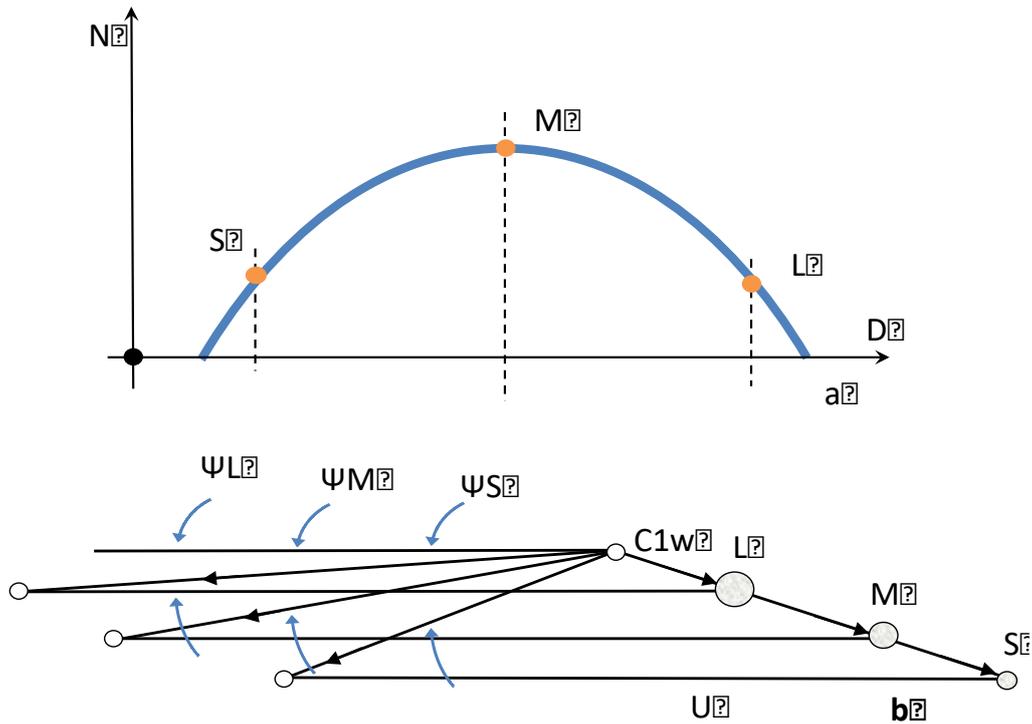


Figura 6-4. Distribución del tamaño de las gotas de agua (a) y sus triángulos de velocidades (b).

En la Figura 6-4 (a) se muestra una representación esquemática de la variación del tamaño de las gotas que ingresan a la fila de álabes giratorios. Estas gotas, que tienen un espectro de tamaños, son aceleradas a diferentes velocidades "C1w" por el flujo de vapor, esto se muestra en la Figura 6-5 (b). Estas gotas alcanzan diferentes velocidades relativas "W1w" y **ángulos de sombra**, "ψ" dependiendo de su tamaño. Impactan con los álabes giratorios, pero penetran en la cascada de álabes giratorios en una dirección axial diferente según sea el tamaño de la gota. En la Figura 6-5 (b) se pueden ver los triángulos de velocidad para tres tamaños de gota diferentes, "L", "M" y "S". Sus velocidades absolutas son "C1w", alcanzadas después de separarse del álabe estacionario y ser aceleradas por el flujo de vapor. Sus **ángulos de sombra** son "ψ" y su **penetración** en la dirección axial se muestra en la Figura 6-5. Como consecuencia de su velocidad relativa "W1w", su penetración al entrar en la hilera de palas giratorias depende del tamaño, que influye en la velocidad "C1w" y el punto de impacto en el borde de entrada de la paleta giratoria; es decir, según sea el tamaño de la gota, esta impactará en el álabe giratorio con un ángulo u otro. Si la gota es mayor el **ángulo de sombra**, "ψ" será menor, lo que se traduce en un impacto más frontal a la superficie del álabe y, además, más cercano del borde de ataque de este.

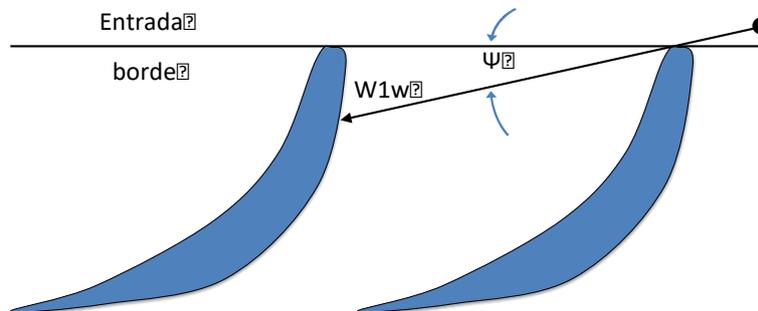


Figura 6-5. Muestra el ángulo de sombra "ψ" y el grado de penetración en la fila de álabes giratorios.

Tras el impacto entre la gota de agua y el borde de ataque de un álabe giratorio, hay dos factores que pueden explicar o contribuir al daño erosivo que se produce. Primero, está la presión de alta intensidad inicialmente desarrollada entre la gota y el material del álabe en el punto de impacto. En

segundo lugar, están las altas velocidades de flujo radial del agua hacia exterior desde el punto de impacto.

Si se considera el impacto de la partícula de agua a alta velocidad y un material elástico/plástico quebradizo, el material se deforma a un cráter elástico bajo las fuerzas del impacto (Figura 6-6). La magnitud de las tensiones inducidas en el material son suficientes para producir pequeñas grietas que se forman en el hombro de la muesca y corren alrededor de él. Tras el impacto, el material se recupera sustancialmente conservando su posición original. Estas pequeñas grietas ahora se habrán cerrado, pero existe una zona de fractura circular alrededor del punto de impacto.

Estrés producido por:

P = Presión (Pressure)

T = Tracción (Tensile)

S = Corte (Shear)

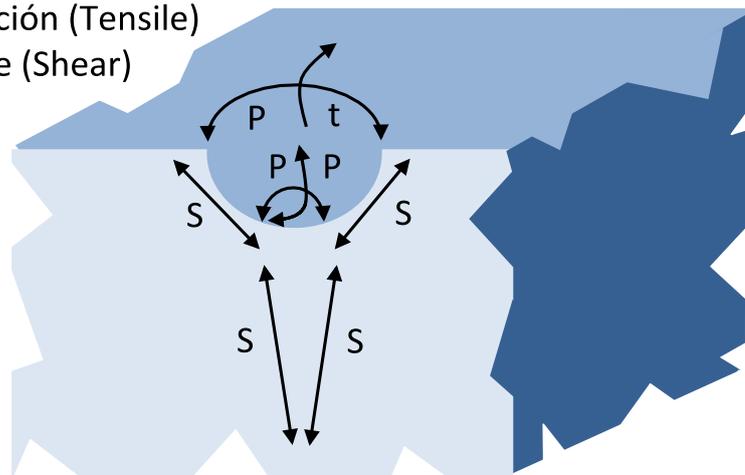


Figura 6-6. La tensión producida en una superficie como consecuencia de un impacto.

Tras el impacto, el material se recupera sustancialmente conservando su posición original. Como consecuencia de este impacto inicial, probablemente no haya pérdida de material de la superficie, o sea mínima. Sin embargo, los impactos posteriores en la región del impacto inicial provocarán la acumulación de agua en la superficie, lo que volverá a causar hendiduras de impacto. Inmediatamente después de estos impactos posteriores, el agua fluye radialmente hacia afuera. Hay tres aspectos de este flujo de agua que pueden causar o contribuir a la pérdida de material por erosión. Éstas son: las fuerzas de alto impacto entre el agua que fluye radialmente hacia afuera y las irregularidades de la superficie (muchas de estas irregularidades se han formado en puntos de las grietas); las altas fuerzas de cizallamiento se desarrollaron entre el agua que fluye y el material de la superficie y; finalmente, cualquier efecto de cavitación del agua a alta velocidad que fluye a través de la cara del perfil.

6.3.2 Métodos de protección

Se puede considerar que los métodos de protección que se utilizan actualmente contra el daño por impacto de la humedad emplean dos principios fundamentales que pueden aplicarse simultáneamente:

- La recolección y drenaje de la mayor cantidad de humedad posible, que está presente y se ha depositado sobre los elementos de la turbina.
- La fijación o unión sobre las áreas de la superficie del álabe que probablemente se verán afectadas de una capa de material más duro y resistente que es más capaz de resistir las fuerzas de impacto desarrolladas por las gotas de agua.

Un tercer método consiste en aumentar el espacio axial entre la descarga del escalonamiento de estátor y el borde de ataque de los álabes giratorios. Al aumentar este espacio se permite un mayor recorrido del flujo y, por lo tanto, más tiempo para que las gotas de humedad se aceleren a la

velocidad del vapor, reduciendo su diferencia de velocidad con respecto a la de los álabes. Este método no se emplea mucho, ya que el costo de aumentar la longitud axial (conlleva pérdidas de eficiencia y el aumento de la longitud del eje) no compensa cualquier ganancia potencial de la reducción de la erosión.

6.3.3 Eliminación de humedad

Todas las unidades en las que el vapor funciona con un contenido de humedad tienen la necesidad de controlar y eliminar del paso del vapor la mayor cantidad posible de esta humedad.

También es necesario que las partes de las unidades que no operan total o exclusivamente en la región de la humedad tengan la posibilidad de eliminar la humedad. Esto es necesario para que, en un arranque en frío, el agua presente en el paso del vapor se pueda drenar antes de que se alcancen altas velocidades de rotación en la turbina. La mayoría de las etapas dependen del calentamiento, la evaporación y el arrastre de la humedad condensada para su eliminación durante el arranque. Este es un método satisfactorio, pero los operadores deben asegurarse de que el flujo de calor sea suficiente para que toda el agua se haya evaporado antes de que se alcancen altas velocidades de rotación.

Hay tres métodos distintos para controlar el nivel de humedad en una unidad:

- Controlando las condiciones del vapor. Esto se aplica tanto a los ciclos de vapor sobrecalentado como a los saturados. Los ciclos saturados incluyen tanto nucleares como geotermales.
- La eliminación de agua del vapor a medida que se transporta de una sección de turbina a la siguiente. Esto es más efectivo en los ciclos nucleares refrigerados por agua donde el vapor que ingresa a la turbina de alta presión ya contiene un pequeño porcentaje de humedad o solo tiene un grado muy pequeño de sobrecalentamiento, por lo que la humedad se forma al principio de la expansión.

En los ciclos que utilizan vapor saturado, como los ciclos nucleares de reactores refrigerados por agua y aplicaciones geotérmicas, el vapor se seca antes de entrar en la unidad mediante dispositivos de separación de humedad.

- La recolección y drenaje de la humedad depositada de las etapas individuales.

6.3.3.1 Recolección y drenaje interno de la humedad

Se deben incorporar sistemas de eliminación efectivos en el diseño de determinada etapa:

- Cuando el calentamiento antes de la puesta en marcha no permite un secado eficaz.
- Cuando se forma y se deposita humedad en la etapa durante la operación.

Para lograr el drenaje, es necesario recolectar esta humedad de la manera más efectiva posible, pasarla a un lugar donde se pueda drenar y luego proporcionar un canal adecuado para su eliminación. Como es obvio, este drenaje debe completarse sin una descarga excesiva de vapor de la unidad.

La mayoría de las unidades empleadas en los ciclos de combustibles fósiles tienen sus secciones de baja presión diseñadas para recolectar y drenar la humedad. Para las unidades diseñadas para operar con vapor generado en la familia de "reactores enfriados por agua", la humedad está presente incluso en las etapas de alta presión. Por lo tanto, es necesario recolectar y drenar de la sección de alta presión, así como de las secciones de baja presión.

La humedad se recoge en la superficie interior de la carcasa mediante la incorporación de ranuras de recogida, o captadores. El agua que acabe en la superficie interna de la carcasa proviene de tres fuentes:

- Lo que se deposita en la superficie interior de la carcasa por los efectos del flujo radial del vapor en expansión. Esta es una cantidad relativamente pequeña, pero debe tenerse en cuenta. En aquellas etapas en las que no ha transcurrido suficiente tiempo después de

la formación de partículas de agua para que estas gotitas se acumulen en grandes gotas, esta puede ser la única fuente de humedad.

- El agua que se deposita en los escalonamientos de álabes estacionarios, tanto en los álabes como en las paredes exteriores, y fluye con un gran componente radial hacia la carcasa. Esta es parte de la humedad total depositada en coronas de álabes estacionarios que no vuelve a ingresar al flujo de vapor principal como gotas grandes destructivas.
- El agua centrifugada a la carcasa desde los álabes giratorios. Después de impactar con los álabes giratorios, una parte de esta humedad rebota y vuelve a entrar en el flujo de vapor principal. Sin embargo, la mayor parte de esta humedad se centrifugará hacia la superficie interior de la carcasa.

Para recolectar el mayor porcentaje posible de esta humedad, se mantiene especial atención al diseñar las ranuras de recolección de humedad. Deben permitir que la humedad entre, se retenga y luego se drene al inferior de la carcasa, donde se retira. Para lograr un drenaje efectivo, las ranuras de recolección deben dimensionarse para captar la humedad que fluye a lo largo de las paredes laterales. La ranura se coloca de manera óptima por encima de la humedad que se centrifuga de las filas de álabes giratorios. Para lograr una colocación axial óptima, se debe tener en cuenta la expansión diferencial que se produce en la trayectoria del vapor. Aunque la expansión diferencial es sensible a la carga que se ajusta a la demanda impuesta a la unidad.

El dispositivo de extracción interna más común, y el que emplean todos los fabricantes, es recolectar una gran parte de la humedad depositada existente en la superficie interna de la carcasa y drenarla a un punto adecuado del ciclo mediante un cinturón colector circunferencial. La Figura 6-7 muestra la disposición básica de un cinturón colector de agua colocado radialmente hacia afuera respecto a los álabes giratorios. Se puede ver el método de construcción del cinturón colector. Aquí, a la entrada del colector, se coloca un espacio axial "A" a una distancia "S" (en la posición axial) de la línea central del álabes giratorio, todo ello para permitir que entre la humedad. Hay una distancia radial relativamente grande "R" por encima del punto de entrada para evitar el rebote del agua en el colector, y luego se conforman rebordes de profundidad "D" en la entrada de la banda proporcionando un camino de drenaje para que el agua recolectada drene hacia la parte inferior donde se puede expulsar de la unidad.

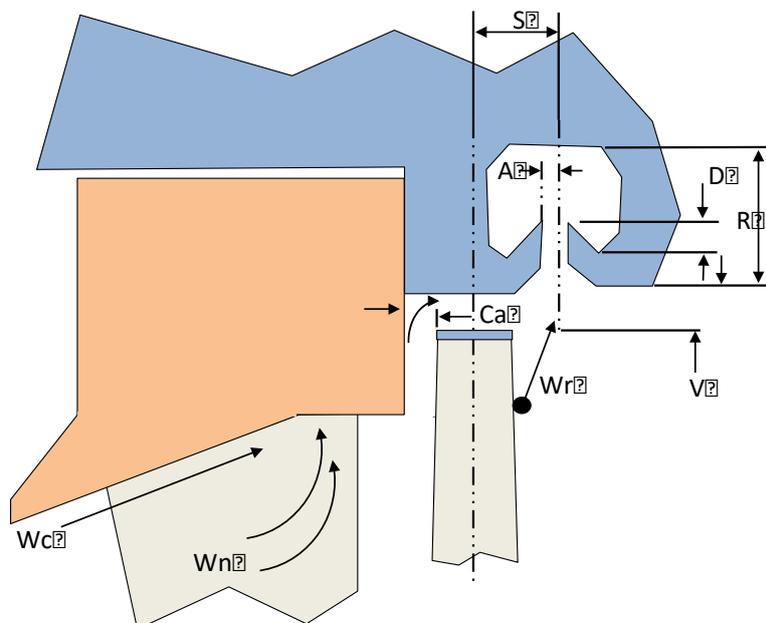


Figura 6-7. Cinturón colector interno de agua.

Este sistema colector de humedad (cinturón circunferencial), que se muestra en la Figura 6-7, se emplea comúnmente en las últimas etapas de todas las secciones de baja presión, donde existen

grandes cantidades de humedad libre. Estos diseños están dimensionados para capturar tres fuentes de agua diferentes:

- “ W_c ” que ingresa a lo largo de la carcasa, y no fue eliminado en dispositivos de captación anteriores.
- “ W_n ” que se deposita en la hilera de álabes estacionarios, fluye hacia la carcasa y se une al flujo “ W_c ”.
- El colector también se coloca de modo que se capture “ W_r ”, centrifugado de los álabes giratorios.

Estos diseños también están dispuestos para tener una purga de vapor de aproximadamente el 0,5% del flujo de vapor. Esto es así con el objetivo de ayudar a asegurar la eliminación efectiva del agua.

Si bien este diseño de drenaje se utiliza en la sección de turbina de baja presión, dicho diseño también se puede aplicar en la expansión de alta presión en unidades nucleares de vapor saturado.

Además de la geometría que se muestra en la Figura 6-7, se puede usar una disposición alternativa, que se muestra en la Figura 6-8, donde la correa colectora se encuentra por encima del borde de ataque de los álabes giratorios. En este diseño, el borde de ataque del álabe de rotor tendrá ranuras de recolección (se puede observar en la imagen) que capturan las partículas de humedad que ingresan “ M ”, luego proporcionan canales guía para que esta humedad sea centrifugada a la carcasa, donde ingresará a la garganta del receptor “ A ”.

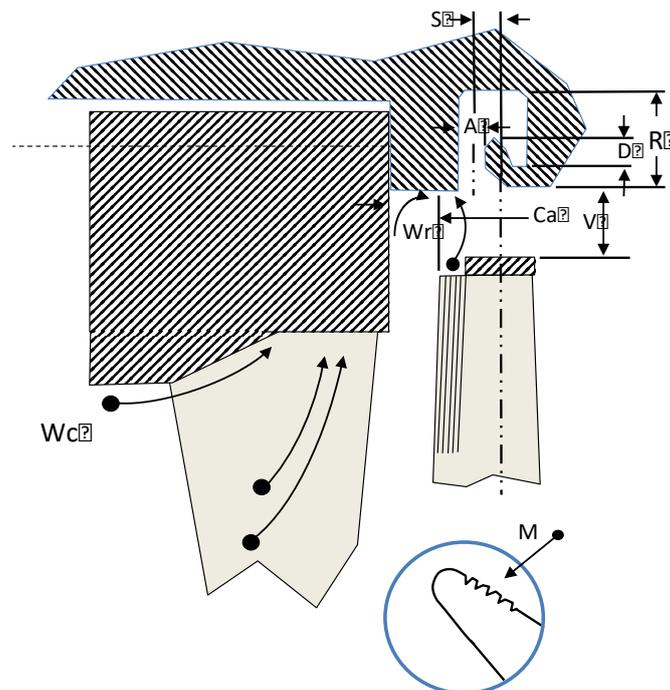


Figura 6-8. Cinturón colector de agua, utilizado con álabes de borde de ataque ranurados.

La eliminación de la humedad en las secciones nucleares de alta presión no se realiza para evitar la erosión en esas etapas, sino que tiene el propósito de eliminar la humedad de la expansión antes de que cause una pérdida excesiva de eficiencia.

Este drenaje interno también se utiliza como medida preventiva para reducir el drenaje impuesto al colector de humedad en la zona intermedia de la unidad nuclear. Las cantidades de humedad eliminadas pueden ser relativamente pequeñas, aunque modificarán la forma de la línea de expansión como se muestra en la Figura 6-9, donde la entalpía en una etapa aumentará en una pequeña cantidad “ dH ” de “ $d1$ ” a “ $d2$ ” debido a la eliminación de humedad (que posee baja entalpía). Además, habrá un pequeño aumento en la entropía de etapa de “ dS ”. Al examinar una etapa, se puede ver que, si bien hay un desplazamiento de la línea de expansión hacia la derecha, lo que potencialmente reduce el nivel de energía disponible, también habrá un pequeño aumento en la

eficiencia debido a los niveles reducidos de humedad. Ambos cambios son pequeños y normalmente no se podrían mostrar en el diagrama de Mollier, pero este efecto existe.

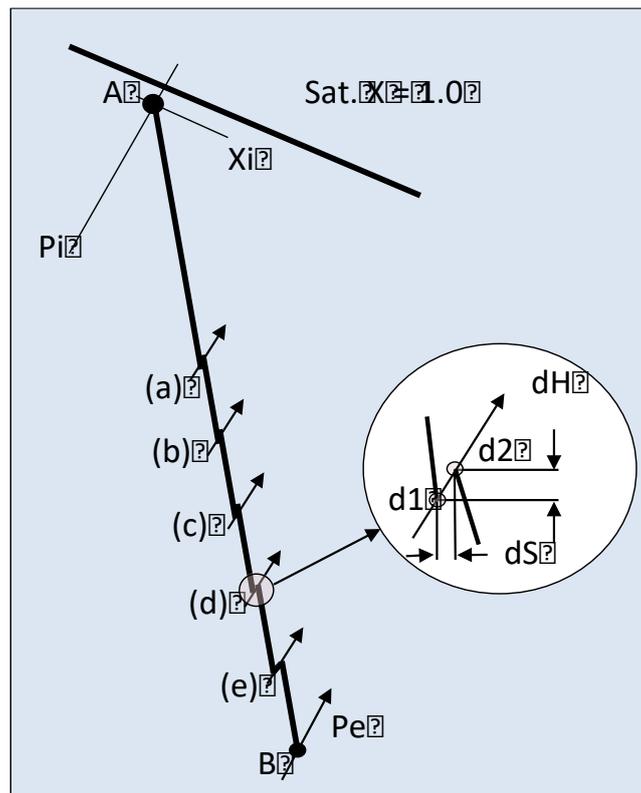


Figura 6-9. Los efectos de la separación de la humedad en la sección de alta presión de una unidad nuclear.

Otro método utilizado para eliminar la humedad es proporcionar un drenaje en la pared exterior detrás de cada escalonamiento de estátor. Se ha demostrado que esto reduce un tanto la erosión. Sin embargo, el mecanizado de las líneas individuales de drenaje y purga es relativamente caro.

Otro método que se utiliza, pero que es demasiado costoso para la mayoría de las aplicaciones, es purgar la capa límite en las uniones de los álabes estacionarios y extraer la humedad que fluye allí. Este sistema no se ha utilizado ampliamente, ya que rara vez se han encontrado resultados que justifiquen el coste de fabricación.

En los lugares del paso del vapor donde se extrae el vapor para regeneración, o para otro propósito, si la humedad existe en forma de gotas, esta extracción de vapor actúa como un dispositivo de recogida y eliminación muy eficaz, eliminando una gran parte de la humedad presente en forma de gotas.

6.3.3.2 Eliminación externa de la humedad

Los ciclos que emplean vapor saturado o cercano a saturado al entrar a la turbina pueden, si el vapor va a ser extraído durante su expansión total, emplear dispositivos de separación externos a la turbina. Existen varios tipos de separadores que se basan en la diferencia de densidad entre las partículas de vapor y de agua para efectuar la separación.

Para eliminar esta humedad, el vapor debe extraerse de la turbina después de la expansión parcial, para que se pueda secar el vapor, y drenar el agua. La separación externa se considera adecuada solo para estos ciclos en los que el vapor, cuando se suministra a la unidad, contiene humedad en suspensión, como en algunas aplicaciones geotérmicas y aquellas unidades que se utilizan con reactores refrigerados por agua. En estos ciclos, el vapor se extrae de la sección de alta presión y se pasa a través de un "sistema intermedio", donde se seca antes de volver a entrar para las expansiones de baja presión. Es en este sistema intermedio donde se elimina la humedad en un dispositivo

separador.

6.3.3.3 Borde de ataque resistente a la erosión

El método de protección contra la erosión más utilizado es producir en el borde de ataque del álabe, en las regiones expuestas a erosión, una superficie dura y resistente. Existen varios métodos para proporcionar una superficie más resistente. Estos incluyen los siguientes:

Material resistente (protector) unido por soldadura

El protector unido mediante soldadura es el método más común de protección. El protector puede tener muchas formas. La Figura 6-10 muestra cuatro diseños posibles. La forma del protector se selecciona para proporcionar protección y, en los diseños más recientes, para preservar la forma aerodinámica del álabe en el punto de fijación. Este contorno permite que el protector se adhiera dentro de un hueco preformado y preserve la forma aerodinámica del perfil. En las Figura 6-10 (a) y (b) los protectores son de diseño relativamente simple y no intentan mantener la forma aerodinámica de la paleta. Entonces habrá cierto grado de separación de la capa límite y pérdida de eficiencia con estos diseños de capa protectora. La Figura 6-10 (c) y (d) emplea formas de protección más complejas, encajadas en huecos o ranuras especialmente diseñadas en el álabe de rotor. Estos protectores mantienen el perfil del borde de ataque.

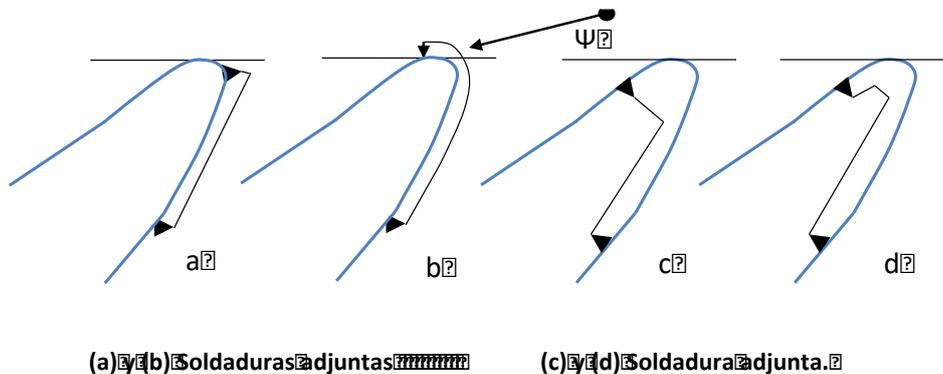


Figura 6-10. Varias formas de protector (para el borde de ataque de álabes de rotor) contra erosión por impacto de humedad.

Se pueden experimentar dificultades con el protector unido por soldadura en caso de que no se sigan en detalle los procedimientos de fijación. El punto de fusión de muchos materiales de fijación está cerca de la temperatura de austenización del material del propio álabe. No controlar la temperatura puede provocar la fragilización del material del álabe si se produce algún punto de sobrecalentamiento. En última instancia, esto puede conducir a una falla prematura del material del álabe por fragilización.

Para la unión soldada, la protección puede desprenderse en funcionamiento si la junta soldada no es adecuada. El desprendimiento del escudo deja expuesto el material de la punta del álabe y, por lo tanto, sujeto a una gran tasa de pérdida de material.

Otra dificultad encontrada con la protección soldada ha sido que el material de soldadura (normalmente más blando) ha estado sujeto a una fuerte erosión por impacto de la humedad y algo de perforación por la humedad. Sin embargo, es posible diseñar el protector para que sea parcialmente autoprotector en los puntos de soldadura.

Material resistente soldado al álabe

Otro método protector la aplicación directa de una soldadura de material resistente. El control del proceso de adhesión de la soldadura es fundamental. Se pueden producir grietas en la zona afectada por el calor de la interfase soldadura / álabe, y aunque la mayoría de estas grietas se han extendido hacia el exterior, hacia el borde de ataque, algunas han retrocedido hacia el material principal del álabe. En el caso de que se desarrolle una grieta, se requiere alguna forma de acción correctiva. Esta

situación no se puede dejar sin corregir, pues una grieta que se extienda hacia el álabe puede desembocar en una falla importante.

Endurecimiento térmico

El endurecimiento térmico se lleva a cabo mediante el impacto directo de la llama o el calentamiento por inducción del material del álabe. Con un sistema de endurecimiento de este tipo, el control del tratamiento es fundamental y la observación estricta de los procedimientos es obligatoria. Si este proceso no se controla, normalmente se pueden iniciar grietas en la zona afectada por el calor, lo que hace que la parte externa del álabe pueda desprenderse.

Endurecimiento por láser

Otro avance en el endurecimiento del material de los álabes es el uso de láseres. Este método no es tan común como otros, pero promete ser más utilizado a medida que los resultados justifiquen su aplicación.

6.3.4 El tiempo y la erosión

Una hoja sujeta al ataque erosivo por impacto de la humedad y, por lo tanto, a la pérdida de material, sufre un daño que varía en función del tiempo. Sin embargo, esta forma de daño no se rige por una relación lineal con el tiempo, sino que sigue una relación exponencial.

La relación "erosión-tiempo" se muestra en la Figura 6-11, representando la profundidad de penetración de la erosión "e" en función del tiempo de exposición "Y", en años. Se puede considerar que la penetración de la erosión ocurre en tres fases distintas.

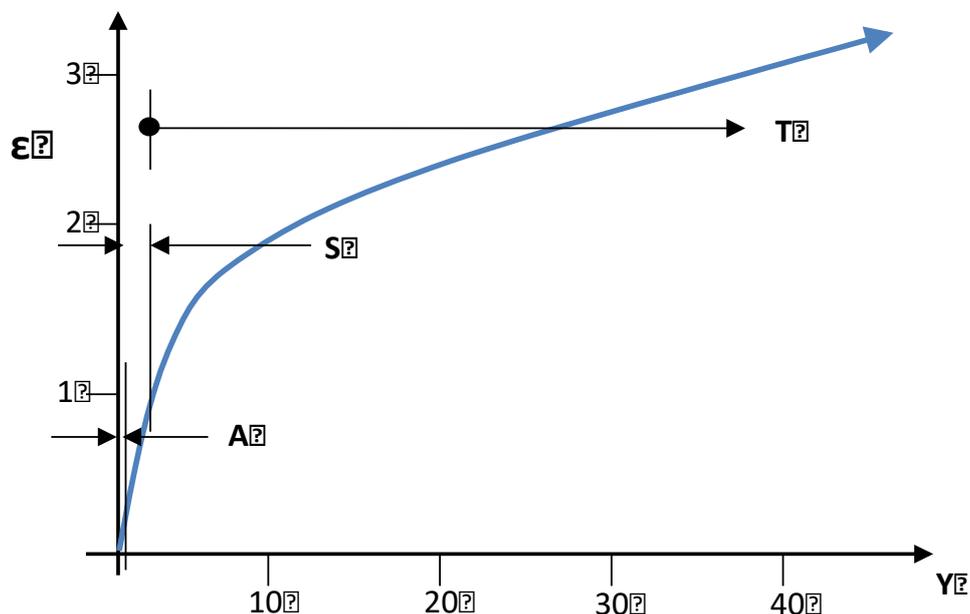


Figura 6-11. La relación entre la penetración de la erosión y el tiempo.

La fase inicial "A" de la Figura 6-11 se denomina comúnmente "período de incubación". El tiempo que dura este periodo depende mucho del material que se está erosionando. Aun así, este período de incubación es muy corto. Normalmente, las unidades no se abrirían para realizar una inspección cuando el material se está erosionando en esta fase. Su relevancia reside en que determina el retraso que puede ocasionar la entrada del elemento erosionado en la fase secundaria "S". Durante esta fase secundaria, hay una tasa de pérdida de material masiva durante un período de aproximadamente 7.000-10.000 horas de funcionamiento. La penetración de la erosión alcanza una profundidad "ε" durante este período y aparece la característica superficie erosionada.

La tercera zona o zona terciaria "T", se desarrolla de manera relativamente paulatina, llegando finalmente a una pérdida casi lineal, durante la cual la profundidad de penetración de erosión " ϵ " se duplica a " 2ϵ " en unos 7-10 años de funcionamiento adicional. Si la operación continúa aproximadamente con el mismo patrón de carga y condiciones de vapor que las primeras 7.000-10.000 horas. La erosión se triplicará a " 3ϵ " en 35 a 40 años, nuevamente basado en el supuesto de que la unidad funcione en "el mismo patrón de carga y condiciones de vapor".

Debido a que la profundidad de la erosión depende del tiempo, es posible producir una curva que permita realizar una estimación aproximada de la profundidad de penetración futura basada en que la unidad siga funcionando en las mismas condiciones de vapor y con aproximadamente los mismos factores de carga.

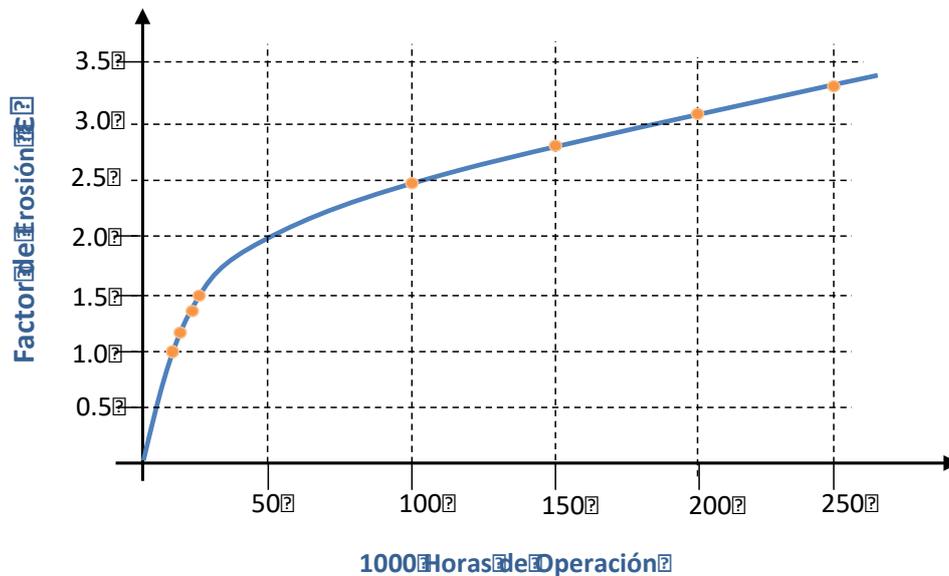


Figura 6-12. El factor " ϵ " para pronosticar la erosión a lo largo de tiempo.

Al medir la profundidad de penetración por erosión " ϵ " es importante asegurarse de que la profundidad se mida perpendicularmente a la dirección en la que el vapor entra en la fila de álabes, es decir, en el ángulo de sombra " ψ " de la Figura 6-5. Este es un método incómodo y bastante subjetivo, pero con experiencia, el ingeniero pronto puede hacer una evaluación buena y precisa con bastante rapidez.

La curva característica de erosión / tiempo para un álabe típico de acero al cromo al 12% forjado en estilete 6B se muestra en detalle en la Figura 6-12. Aquí, la característica de profundidad de penetración " $\epsilon = 1,0$ " se establece en las 7.000 horas". Esto es equivalente a que la unidad opere el primer año de funcionamiento con un factor de carga de aproximadamente el 80%. Utilizando el valor de " ϵ " en cualquier momento, se puede predecir la profundidad para la operación futura, asumiendo que durante este tiempo la erosión no atraviesa el protector del álabe.

6.3.5 La severidad de la erosión

La clasificación de la gravedad de la erosión es, en el mejor de los casos, un arte subjetivo. Términos como "ligero" o "fuerte" son significativos solo en términos de otros parámetros como el grosor del álabe, la longitud de este, el período de horas que ha funcionado e incluso la comparación con otros elementos similares al examinar escalonamientos.

La figura 3.8.18 muestra los perfiles de álabes que ilustran las características de los distintos niveles de penetración. En un intento por cuantificar la erosión, además de los seis niveles definidos en la Figura 6-13, se debe tener en cuenta un nivel "0", éste indica ningún daño o daño insignificante. La descripción de este nivel "0" es que al menos el 75% de la superficie del borde de ataque original

permanece y no se ve afectada. Puede haber decoloración de la superficie o deposición química en la superficie, pero no una pérdida significativa de material debido al impacto de la humedad.

La medida más significativa de daño por erosión es la profundidad de penetración en la hoja o el material del protector. A menudo, cuando se ha experimentado una gran pérdida de material en una distancia radial extensa del borde de ataque, las mediciones y estimaciones de la penetración se facilitan con la ayuda de una arista recta sostenida en la superficie original, preferiblemente localizada a partir del material superficial existente. Sin embargo, esto puede no ser siempre posible en el caso de una pérdida importante de material.

Esta clasificación simplemente tiene la intención de actuar como una guía para el análisis y diagnóstico de este tipo de daño.

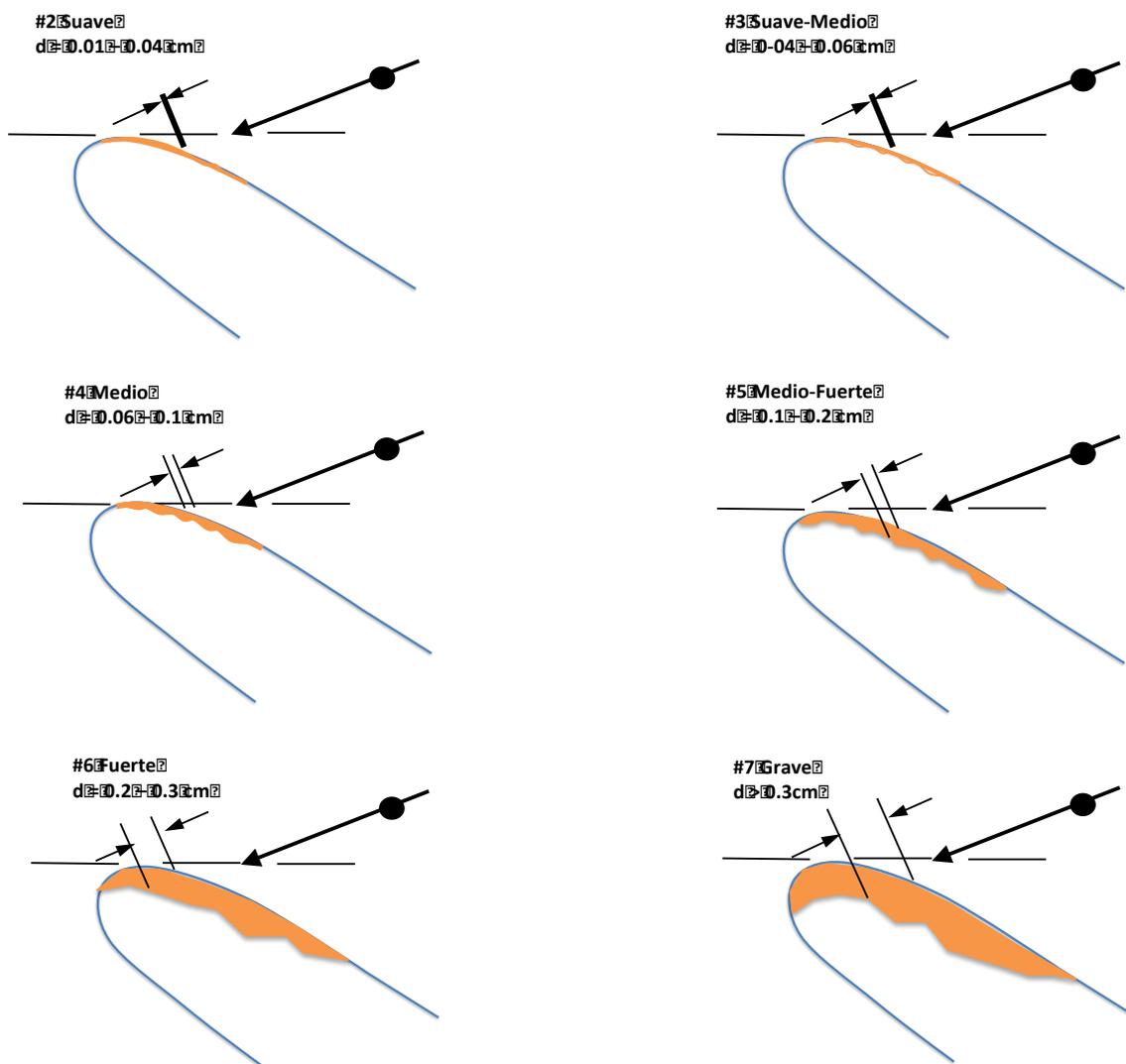


Figura 6-13. Niveles de penetración debido al impacto de la humedad.

6.4 Erosión del borde de estela

Un fenómeno que se observa en ciertos álabes de la última etapa es el daño de tipo erosivo de la cara de succión de éste. El daño es consecuencia de la recirculación del vapor y el agua llevados de vuelta a los álabes desde la carcasa en la zona del escape. Este daño ocurre en el borde de estela y está

ubicado en la parte inferior del álabe, a menudo comenzando a una pequeña distancia la base de la raíz. Esta pérdida de material puede extenderse hasta el diámetro medio del álabe. El daño que se inicia a una pequeña distancia arriba del borde de estela (alrededor de 0.5 a 1.5 centímetros), y se vuelve progresivamente más severo hacia la posición de descarga.

Este es un tipo de pérdida de material por "raspado", como se muestra en la Figura 6-14. El daño se manifiesta en la medida en que el borde de estela se vuelve progresivamente más delgado hacia su punto de descarga. Tal adelgazamiento aumentará la tensión directa. Esta se convertirá en una región sensible a la tensión, en la que pueden iniciarse las grietas, e incluso fallas finales. El borde de estela en la sección de la raíz de la pala es un lugar en el que existen tensiones de tracción relativamente altas y, además, estará sujeto a una tensión de flexión elevada. Además, en esta región, la carga vibratoria o dinámica puede alcanzar valores importantes.

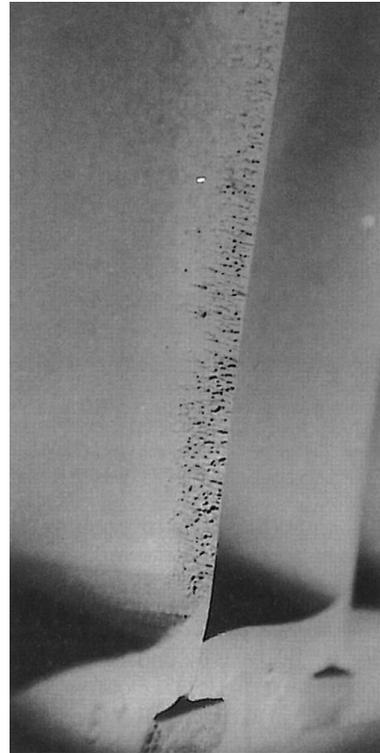


Figura 6-14. Erosión del borde de estela en la superficie de succión de un álabe de rotor, cerca de la región de la raíz.

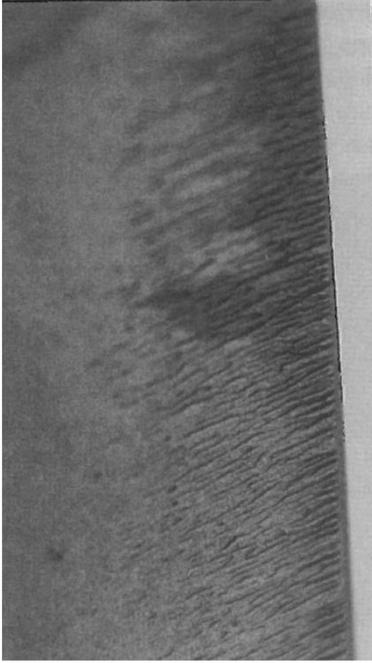


Figura 6-15. Erosión del borde de estela en la cara de succión con raspados profundos.

La Figura 6-15 muestra daños similares a los de la imagen anterior. Además, en este caso, una grieta que se ha iniciado es particularmente difícil de ver desde la cara de succión, e incluso difícil de detectar por métodos no destructivos desde esta cara

Sin embargo, esta grieta penetra a través del grosor del borde de estela y se puede ver mediante un examen con líquidos penetrantes por la cara de presión del álabe (Figura 6-16).

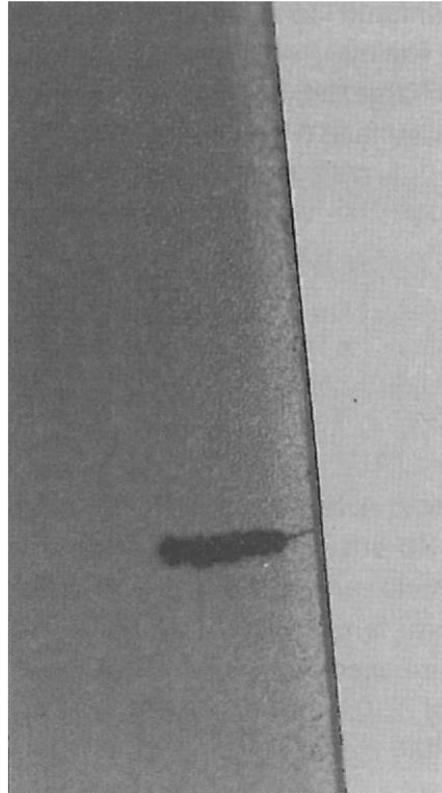


Figura 6-16. Cara de presión del álabe que se muestra en la Figura 6-15. Desde este punto de vista la grieta se puede ver con líquidos penetrantes.

El mecanismo exacto que produce esta pérdida de material por raspado en el borde de fuga no se comprende con precisión. Existe una fuerte evidencia para apoyar la hipótesis de que las partículas de humedad vuelven a entrar en la fila de álabes de la última etapa en la región de la raíz. Esta reentrada solo se produce cuando la fuerza del vapor es pequeña e insuficiente para inhibir la recirculación del fluido de trabajo.

6.4.1 Recirculación hacia la raíz

A plena carga, el anillo de flujo de vapor de descarga de la última etapa fluirá consistentemente, y las líneas de corriente se pueden representar como en la Figura 6-17. Este patrón de flujo será, relativamente, bastante uniforme, hasta cargas parciales relativamente más bajas. Sin embargo, la densidad de flujo de diseño (kg de flujo de vapor por área anular de paso de vapor) influirá en la posición de la línea de corriente, así como la presión de escape. Estos dos parámetros establecen el flujo volumétrico en el anillo de flujo.

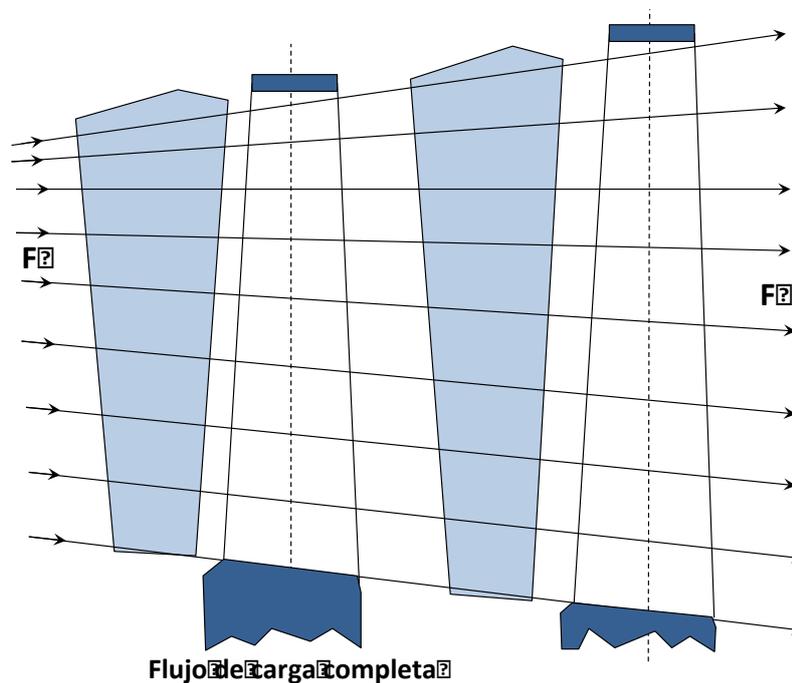


Figura 6-17. Líneas de corriente del vapor cuando la sección de baja presión fluye "llena".

A medida que se reduce la carga (y por lo tanto el flujo volumétrico de vapor), se alcanza un punto en el que el flujo, bajo la influencia de la componente radial del flujo de vapor, migrará a las regiones de flujo externas. No habrá flujo a través de la región adyacente a la raíz de los álabes de esa última etapa. Con este flujo volumétrico de vapor a carga parcial se desarrollará una región de baja presión en las secciones de la raíz, y habrá una presión negativa en la región de la sección de la raíz de los álabes giratorios. El efecto de esta presión negativa será forzar al vapor que está llenando la zona del escape a que fluya de regreso a la zona inferior del último escalonamiento. (Figura 6-18). Este vapor, una vez que entra en el paso de los álabes, se bombea radialmente hacia fuera por los efectos de la rotación, de esta manera se expulsa del anillo de flujo del escalonamiento. Estos movimientos establecen una recirculación de vapor en la sección inferior de la fila de álabes; cuanto menor sea la carga de flujo de vapor, mayor será la magnitud de esta recirculación.

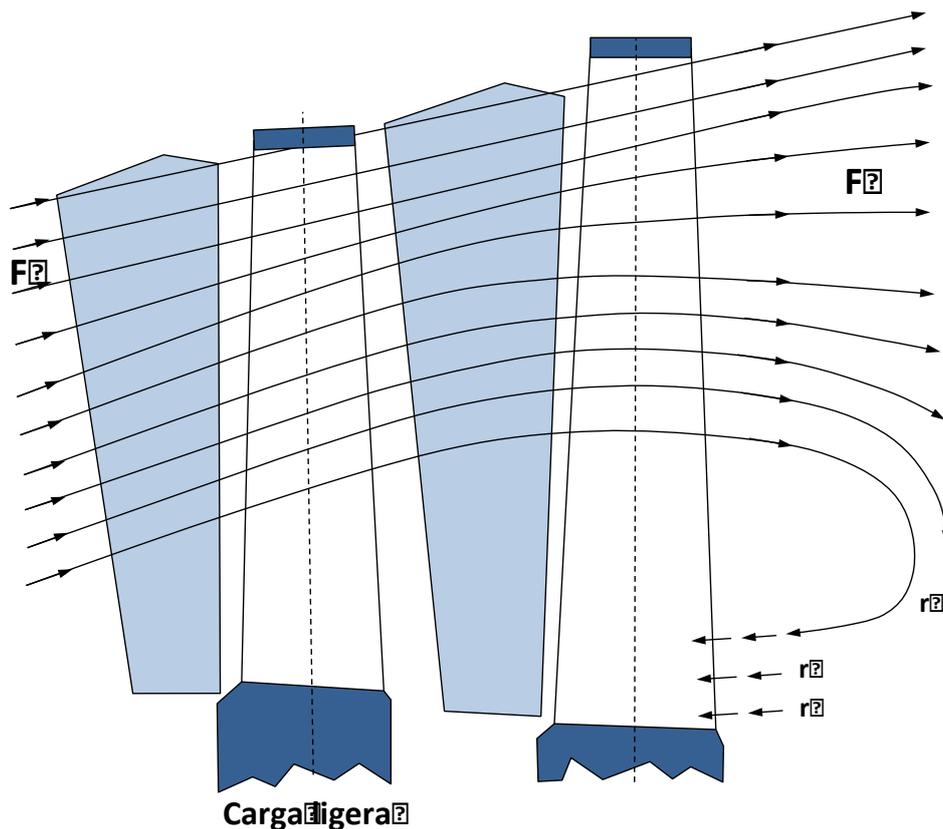


Figura 6-18. Patrón de flujo a cargas parciales. Se produce recirculación de vapor hacia la sección de raíz de los álabes giratorios de la última etapa.

6.4.2 Espráis de agua en el escape. (Hood sprays)

Para eliminar el calor por fricción generado por la recirculación, se rocía agua en la zona del escape, preferiblemente tratada y no agua sin procesar. Se toma de algún lugar dentro del ciclo de vapor. Posiblemente, la fuente más común proviene del condensador, donde hay gran cantidad de agua relativamente limpia (que podría tener algunos gases disueltos). En la pulverización, el agua se atomiza, se distribuye lo más ampliamente posible y se suministra una cantidad suficiente para eliminar cualquier calor latente del vapor.

Desafortunadamente, esta agua de enfriamiento, si se suministra en cantidades excesivas más de las necesarias para eliminar el sobrecalentamiento, se deja libre en el anillo de flujo del escape. Esta agua libre es capturada por el vapor de recirculación y es llevada de vuelta a los álabes giratorios.

6.4.3 Mecanismo de daño

Si se dan las condiciones para que el vapor recircule en el escape de la última etapa, entonces cualquier agua libre presente puede ser arrastrada con el vapor recirculante. Como se ha comentado anteriormente, los espráis de agua del escape son los principales candidatos para introducir esta agua. También es posible que la humedad sea arrastrada desde otras partes de los miembros estructurales de la cubierta de escape, donde existe una especie de película en las superficies. Sin embargo, se cree que la mayor parte de la humedad que vuelve a entrar en los álabes es aportada por el vapor que recircula.

La Figura 6-19 muestra un diagrama del efecto de la recirculación en la campana de escape, donde el agua introducida a través de los rociadores para eliminar el calor por fricción vuelve a entrar en la sección de la raíz de los álabes giratorios. También está claro que esta humedad que vuelve a entrar no penetra más allá en la trayectoria del vapor que los elementos de los álabes de rotor.

El daño que se produce en el borde de estela no puede explicarse por el mecanismo relativamente simple de la velocidad de impacto de la humedad, ya que este daño se produce en las partes inferiores del álabe, donde las velocidades son bajas y están por debajo de lo que normalmente se considera que son los valores umbral asociados a la pérdida de material.

También hay que tener en cuenta que no se ha observado ninguna pérdida de material en la raíz del álabe (que no la sección de raíz). La raíz suele estar protegida, en gran medida, por placas difusoras e incluso por conos de rodamiento. En algunos casos, normalmente se esperaría encontrar algún tipo de daño, aunque leve, en esta región de la raíz si la erosión por impacto fuera el único mecanismo que explica el daño.

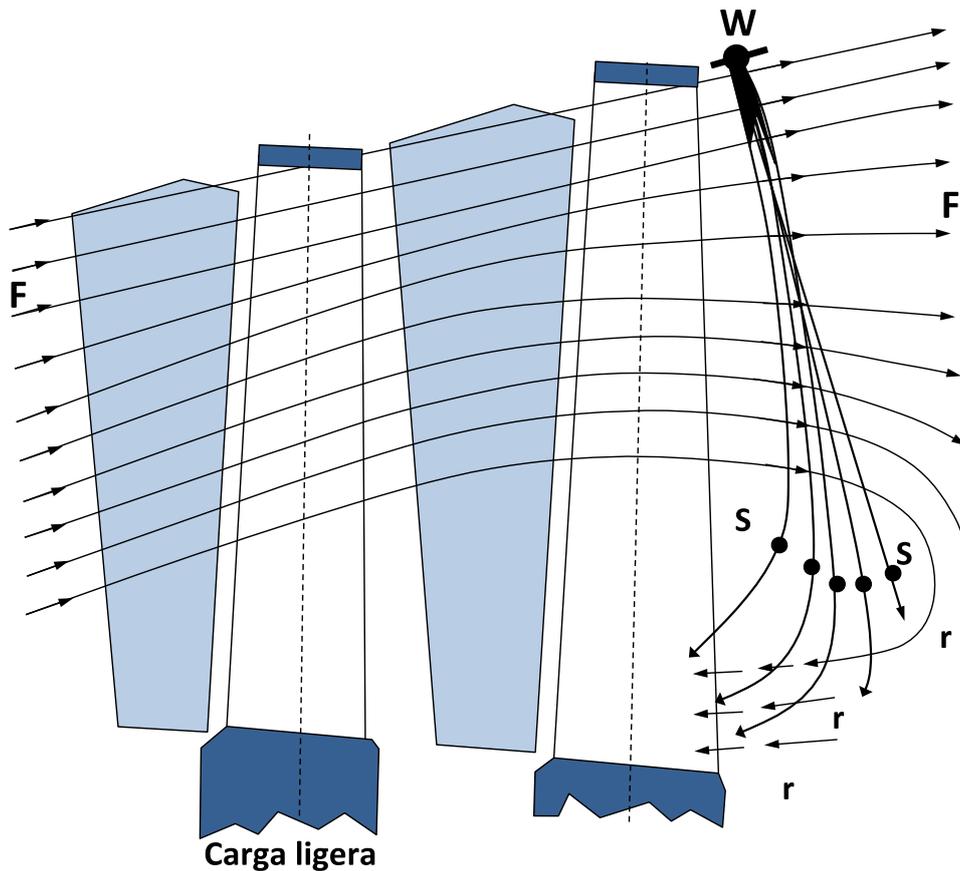


Figura 6-19. Agua pulverizada para refrigeración en la campana de escape. Si se aporta en exceso será arrastrada hacia los álabes giratorios.

Este tipo de daño probablemente ocurre como resultado de tres mecanismos separados, pero posiblemente interactuando, estos son:

- Daños por impacto de humedad como se discutió anteriormente. Esta forma de daño posiblemente podría ocurrir en algunos lugares, o al menos contribuir a la pérdida total de material.
- Desgaste por cavitación causadas por la alta velocidad de las gotas de agua, que después del impacto con los bordes de descarga de la cuchilla se bombean desde el punto de impacto.
- La interacción en la superficie de la pala entre las fuerzas centrífugas y Coriolis en el punto de impacto y el flujo de agua hacia el borde de escape

6.5 Erosión por estrangulamiento

Este tipo de erosión se basa en una expansión libre de la mezcla de agua / vapor a través de una

abertura diminuta (trayectoria de fuga), y dicha expansión tiene lugar sin la adición o el rechazo de calor.

En un gas perfecto, el estrangulamiento no produce ningún cambio en la temperatura del gas, pero en el vapor o en la mezcla bifásica agua/vapor produce un pequeño efecto de enfriamiento, que se traduce en una caída de temperatura, es decir, una caída de presión bajo la condición de calor total constante. En el vapor, la operación de estrangulamiento debe contar con la presencia de fluido en fase líquida al principio de la expansión para causar daños. Esto es así ya que, si el vapor saturado, tal como existe en el recorrido del vapor, se expandiera, a partir de cualquier presión, el fluido final (también vapor) estaría sobrecalentado y también a una temperatura inferior (Figura 6-20).

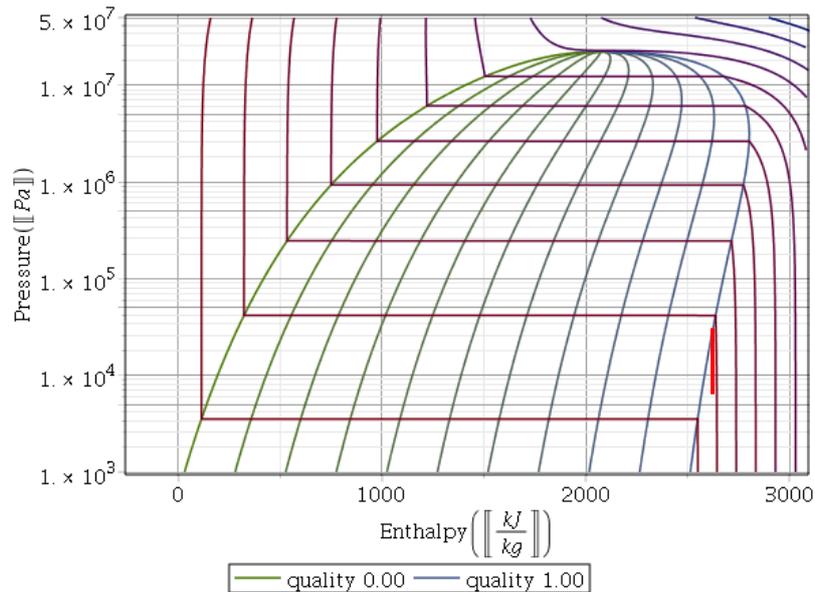


Figura 6-20. Diagrama P – h en el que se muestra el efecto del estrangulamiento en el vapor saturado, siendo este proceso no dañino al no ser mezcla bifásica en ningún momento.

Para que esta operación se produzca y cause daños en el recorrido del vapor, deben darse tres condiciones:

- Una mezcla bifásica de agua/vapor a una presión elevada, a la entrada del recorrido de fuga
- Un diferencial de presión a través del miembro mecánico o junta
- Una trayectoria de fuga inicial o primaria, a través de la cual la mezcla de agua/vapor pueda expandirse desde la presión más alta a la más baja.

Dentro de la trayectoria del vapor de la turbina, estas tres condiciones pueden presentarse como un fenómeno relativamente común. Los dos primeros siempre están presentes en una turbina de condensación, una vez que el vapor ha cruzado la línea de saturación. La probabilidad de que ocurra el tercero tiende a aumentar a medida que la unidad envejece, principalmente en términos de la aparición o el desarrollo de una serie de trayectorias de fuga. El material estructural libera la tensión, se retuerce y deforma en mayor medida conforme una unidad se pone en funcionamiento de forma cíclica con un mayor número de paradas, arranques y transitorios térmicos. Esta expansión en la trayectoria de fuga se caracteriza por dos efectos básicos:

- El vapor fugado alcanzará una alta velocidad en su paso por la abertura. Esto representa la conversión de la presión de la mezcla en energía cinética, siendo el calor total constante.

- Habrá un cambio en las propiedades físicas de la fase de vapor de la mezcla. Si esta expansión se examina en el diagrama de Mollier (Figura 6-21), mostrará que está representada por una línea horizontal (calor total constante), que moverá el estado de la mezcla de "A" a "B".

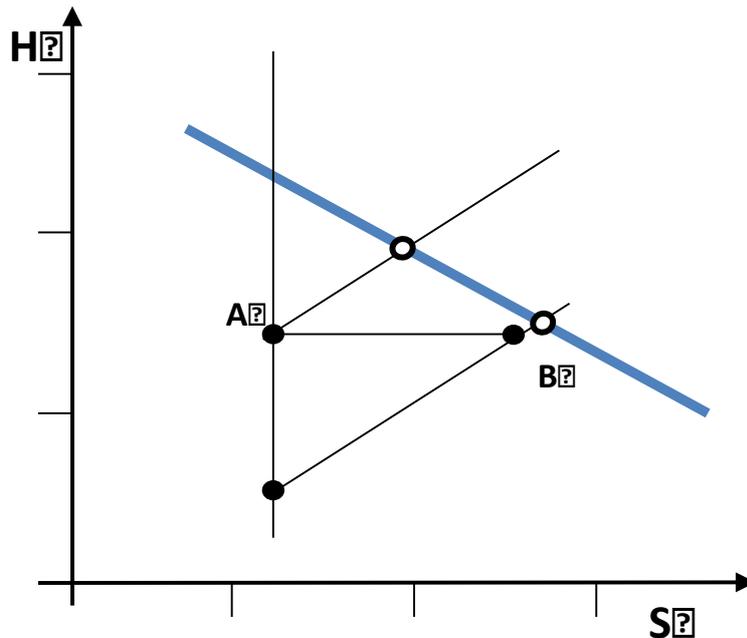


Figura 6-21. Estrangulamiento de la mezcla bifásica de "A" a "B" a entalpía constante.

Dentro de la ruta del vapor hay tres posibles consecuencias de este tipo de expansión que degradan el rendimiento de la unidad:

- El vapor que se filtra a través de una junta pasará por alto las filas de álabes y, por lo tanto, no producirá trabajo en el escalonamiento. También es posible, dependiendo de dónde se escape el vapor, que vuelva a entrar en la ruta del vapor provocando una perturbación en el flujo del vapor que se ha expandido a través de la fila de álabes giratorios, introduciendo así una pérdida adicional.
- En la expansión a través de la pequeña abertura, el fluido de la fase líquida hará que la superficie metálica se deteriore y pierda material mediante un proceso que rompe la estructura de la superficie del material. Esta pérdida de superficie aumentará el tamaño de la abertura aumentando la cantidad de fuga y, por lo tanto, agravará la situación.
- El vapor que se escapa volverá a entrar en la trayectoria del vapor de manera que provocará cargas de empuje capaces de excitar hasta niveles peligrosos de vibración debido a la frecuencia del impulso imprimida por ese vapor fugado.

Esto es más común cuando la fuga se produce en la unión horizontal de las mitades del diafragma, de forma que los álabes de rotor experimentan un estímulo de frecuencia $2/\text{rev}$, incluso es posible que se convierta en un empuje de alta intensidad a medida que la abertura se agranda.

La evolución de la pérdida de material y las condiciones finales del vapor (contenido de humedad) después de la fuga dependen de las condiciones del vapor en la entrada a la trayectoria de fuga. En la Figura 6-22 se muestra una parte de la línea de expansión, donde el vapor que tiene las condiciones iniciales "Pa" y "Ma" se reduce a las condiciones "Pb". A esta presión, el vapor tendrá un título "Mb", que es más seco. Si la presión final, después del estrangulamiento hubiera sido "Pc", el vapor final estaría seco con un grado de recalentamiento " ΔT " por encima de la temperatura "Tc" (la temperatura de saturación correspondiente a la presión "Pc").

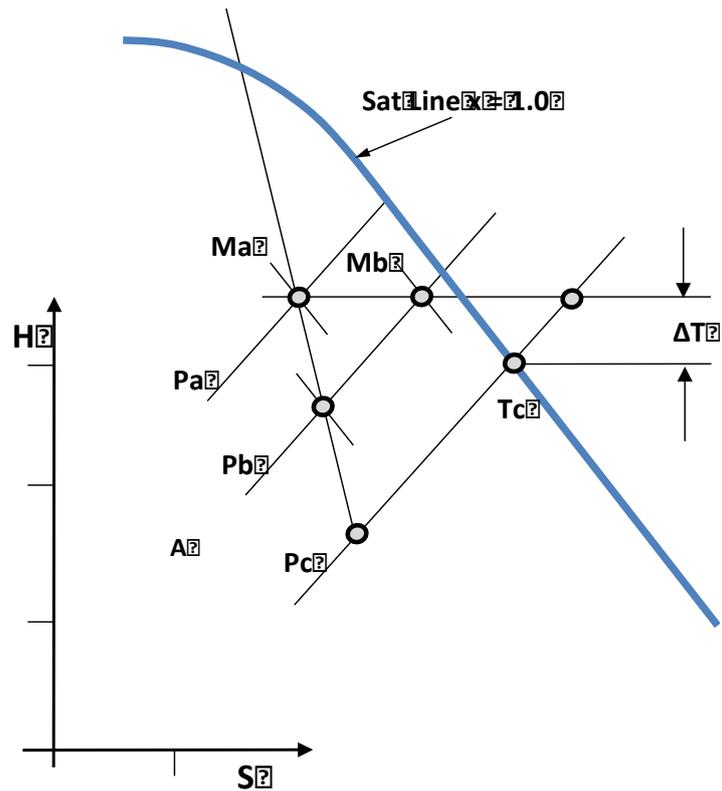


Figura 6-22. El fenómeno del estrangulamiento y su efecto en la temperatura final del vapor.

6.5.1 Localizaciones típicas de aberturas de fuga

Es importante considerar dentro de la composición interna total de la turbina (incluida la ruta de vapor), dónde se pueden desarrollar las aberturas de fuga y dónde se pueden buscar tales daños. La turbina de vapor contiene una serie de juntas, tanto horizontales como verticales, que son candidatas a la aparición de estas vías de fuga. Algunos de los lugares más susceptibles son los siguientes:

Juntas horizontales de la carcasa.

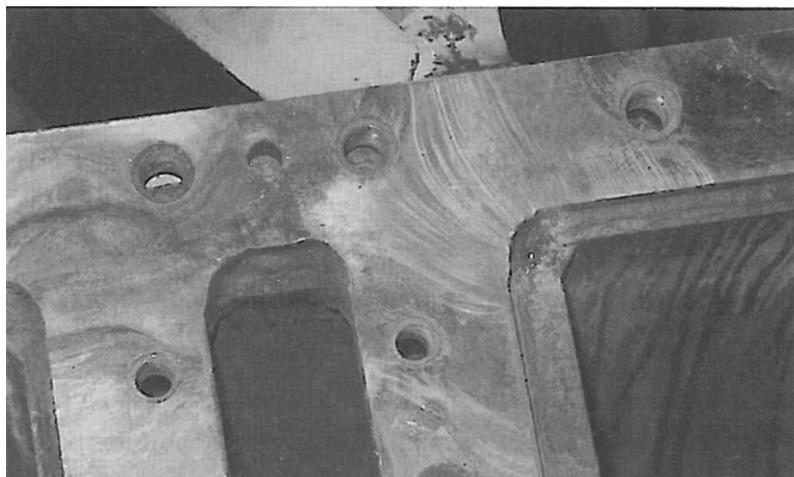


Figura 6-23. Trayectorias de fuga de agua/vapor desarrollada en una sección de baja presión.

Juntas horizontales de diafragma.



Figura 6-24. Erosión por estrangulamiento en la junta horizontal de un diafragma.

Diafragma y caras de los sellos de vapor de la carcasa interior.



Figura 6-25. Erosión por estrangulamiento en la superficie de los sellos de vapor.

6.6 Erosión por lavado

La erosión por lavado es una forma de pérdida de material superficial que se produce como resultado de la existencia de flujo de agua a alta velocidad sobre una superficie metálica en las partes internas de la turbina. A medida que el agua fluye a través de las superficies metálicas de las partes internas de la turbina, existen mecanismos que causan o contribuyen a las microrroturas de la superficie del material. Existen varias consideraciones relacionadas con esta pérdida de material en la superficie que pueden incluir:

- Irregularidades tempranas en una superficie, como resultado de una serie de eventos operativos, y posiblemente incluyendo procesos de fabricación. Estos pueden hacer que se desarrollen fuerzas de alto impacto entre las películas de agua que fluyen. La superficie eventualmente sufrirá una pérdida de material.
- La película de agua en las secciones de baja presión de una turbina contiene cantidades significativas de gases disueltos, como lo demuestra la necesidad de utilizar continuamente eyectores de vapor para eliminar estos gases del condensador. A medida que se reduce la presión ambiental, estos gases disueltos "salen disparados" de su estado disuelto en el agua y, al hacerlo, provocan que se produzcan microrroturas en las superficies de la trayectoria del vapor.
- El agua puede contener una pequeña cantidad de iones corrosivos que atacarán la estructura del material, rompiendo la unión entre los cristales metálicos. El posterior lavado de la superficie hace que estos granos con un límite de grano debilitado se liberen.

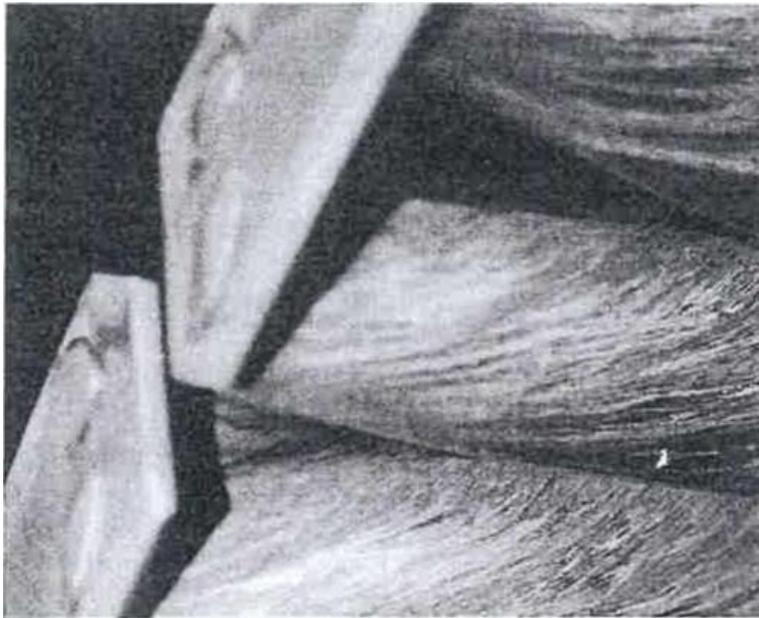


Figura 6-26. Marcas de flujo de agua en una fila de álabes giratorios.

7 CONCLUSIONES

Como es bien sabido, actualmente, las turbinas de vapor tienen muchas aplicaciones técnicas, gracias a su robustez y versatilidad, además, es una tecnología que, aunque ha ido evolucionando en las últimas décadas, no ha sufrido grandes cambios.

En la industria moderna, las turbinas de vapor se utilizan sobre todo en compresores y bombas, si bien la aplicación más importante tiene que ver con la generación de energía eléctrica. La mayor parte de la electricidad que se produce en el mundo en la actualidad se genera mediante centrales eléctricas de turbinas de vapor convencionales (carbón, gas, biomasa, etc.), centrales nucleares y en las centrales de ciclo combinado entre otros. Hoy en día, se estima que las turbinas de vapor intervienen en el 70% de la energía eléctrica producida en el mundo, Asimismo, se utilizan como motores de propulsión de buques que requieren mucha potencia.

Queda claro entonces que, por su amplia utilización y su relativa complejidad, es de suma importancia para los encargados de su operación y mantenimiento tener conocimientos suficientes como para no caer en errores que, con un conocimiento y atención moderados, se podrían haber evitado.

Los errores de operación y mantenimiento en el caso de una turbina de vapor de una planta termoeléctrica se pagan caros, sobre todo, se debe tener especial cuidado con los transitorios, especialmente en las paradas y arranques en frío. Con estos errores, como se ha visto, no solo se incurre en una pérdida económica debido a que se precise de una reparación o sustitución de ciertos elementos, sino que, además, puede suponer una importante penalización económica si es necesario una parada forzada para corregir la situación de disconformidad por el hecho de dejar de producir.

Es por ello que resulta muy interesante para el personal encargado de la operación y el mantenimiento de la turbina poseer conocimientos sobre el mantenimiento, las causas y los mecanismos de daño del paso del vapor de turbina ya que, al fin y al cabo, este conocimiento se traduce en mayor fiabilidad y horas de funcionamiento de la unidad que, en última instancia resulta en mayor beneficio económico.

REFERENCIAS

- [1] Díaz Rodríguez, J., & Ordoñez Guerrero, A. Operación y mantenimiento de turbinas de vapor en ciclo térmico para generación de energía eléctrica : diagnóstico de averías por análisis de vibraciones. s.n.], 2011.
- [2] Domínguez García, V., & Estévez Urra, A. Diagnóstico de daño en turbinas de vapor Trabajo Fin de Grado . El autor], 2017.
- [3] Dubbel, H. Máquinas y turbinas de vapor. Calpe, 1992.
- [4] Cotton, K. C. Evaluating and improving steam turbine performance (2nd ed.). Cotton Fact, 1998.
- [5] Jiménez Castaño, M., & Sánchez Lencero, T. Predicción del comportamiento de grandes conjuntos alternador-turbina de vapor Método de General Electric . s.n.], 2004.
- [6] Liu, H. Concrete foundations for turbine generators : analysis, design, and construction . American Society of Civil Engineers, 2014.
- [7] Kearton, W. J. Steam turbine theory and practice : a textbook for engineering students (6th ed., repr.). Pitman, 1994.
- [8] Sánchez García, L., Pérez Trujillo, F. J., Hierro de Bengoa, M. del P., & Trilleros Villaverde, J. A. Efecto de elementos reactivos en recubrimientos base aluminuros de hierro mediante CVD-FBR para aplicaciones en turbinas de vapor supercríticas. Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones, 2008.
- [9] Sanders, William P. A Review of Steam Turbine Blade Operating Problems, I. Mech. E., Toronto, 1981
- [10] Sanders, William P. Moisture Damage in the Turbine Steam Path and its Impact on Life Extension, Turbomachinery International, Vol. 33, 1992
- [11] Sanders, William P. Water Droplet Formation and Flow Leading to Bucket Erosion in Steam Turbines, Canadian Electrical Association Meeting, Winnipeg, 1967
- [12] Sanders, William P. Turbine Steam Path Maintenance and Repair Volume One / William P. Sanders, P.E.
- [13] Sanders, William P. Turbine Steam Path Maintenance and Repair Volume Two / William P. Sanders, P.E.