

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Análisis de Fallos en Turbinas de Vapor: Causas, Mecanismos y Prevención.

Autor: D. Alejandro Hernán Luque

Tutor: Prof. Dr. D. Antonio Muñoz Blanco

Grupo de Máquinas y Motores Térmicos
Departamento de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



GMTS | GRUPO DE MAQUINAS Y MOTORES
TÉRMICOS DE SEVILLA

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Análisis de Fallos en Turbinas de Vapor: Causas, Mecanismos y Prevención.

Autor:

D. Alejandro Hernán Luque

Tutor:

Prof. Dr. D. Antonio Muñoz Blanco

Catedrático de Universidad

Grupo de Máquinas y Motores Térmicos

Dpto. de Ingeniería Energética

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Trabajo Fin de Grado: Análisis de Fallos en Turbinas de Vapor: Causas, Mecanismos y Prevención.

Autor: D. Alejandro Hernán Luque

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, 2018

El Secretario del Tribunal

Resumen

Durante la vida útil de una turbina de vapor perteneciente a un ciclo térmico de potencia, las condiciones del vapor suelen variar introduciendo inestabilidades en el funcionamiento que puede concluir en el fallo catastrófico de sus componentes. Este documento pretende ser una guía de identificación de los fallos más comunes ocasionados en las turbinas de vapor usadas en plantas de combustible fósil, nuclear y aquellas que utilizan vapor geotérmico. Entre los fallos más comunes analizados se encuentran, los aspectos operacionales que que modifican las condiciones del vapor, la degradación de los materiales del paso del vapor, los daños inducidos por el agua y la deposición de impurezas. Para cada uno de estos, se identifica el mecanismo por el cual se produce y en el caso de que sea posible, se estudian las acciones correctivas o preventivas oportunas, asumiendo cualquier solución que respete la viabilidad económica de la planta.

Índice

Resumen	viii
Índice	x
Índice de Tablas	xiii
Índice de Figuras	xiv
1 Introducción	1
2 Aspectos operacionales que modifican el paso de vapor	3
2.1 <i>Introducción</i>	3
2.2 <i>Daño por impacto de objetos no identificados (FOD)</i>	3
2.2.1. Procedencia de los objetos que impactan contra el paso del vapor	5
2.2.2. Clasificación del daño por impacto	9
2.2.3 Erosión por impacto de partículas sólidas. Abrasión	13
2.3. <i>Formación de escamas</i>	14
2.4. <i>Mecanismos de erosión</i>	15
2.4.1. Mecanismos	15
2.5. <i>Patrones de pérdida de material debido a la abrasión</i>	19
2.4.2. Influencia de la erosión por partículas sólidas en el funcionamiento del escalonamiento	28
2.4.3. Roce entre los componentes del paso del vapor	29
2.6. <i>Corrosión por fricción</i>	33
3 Daño del paso de vapor debido a la degradación de las propiedades de los materiales	39
3.1 <i>Introducción</i>	39
3.2 <i>Fluencia</i>	40
3.2.1 Estructura del material.	40
3.2.2 Fluencia a alta temperatura	40
3.2.3 Deformación por fluencia	41
3.2.4 Mecanismo de fluencia	42
3.2.5 Tasa de fluencia	42
3.2.6 Fluencia en los componentes del paso de vapor	43
3.3 <i>Fatiga de alto ciclo</i>	49
3.3.1 Fenómeno de alto ciclo	50

3.3.2	Tensiones vibratorias sobre álabes del rotor	52
3.3.3	Propiedades de los materiales	57
3.3.4	Tensiones a fatiga	60
3.4	<i>Desarrollo y apariencia de las grietas</i>	62
3.4.1	Crecimiento	62
3.4.2	Apariencia superficial con fallos a alto ciclo	62
3.5	<i>Fatiga por fluencia</i>	63
4	Daños introducidos por el agua en el paso de vapor	65
4.1	<i>Introducción</i>	65
4.2	<i>Condensación en el vapor expandido</i>	65
4.2.1	Formación de las gotas	66
4.2.2	Distribución radial de la humedad	67
4.3	<i>Deposición de la humedad</i>	67
4.3.1	Deposición en la superficie del álabe.	67
4.3.2	Deposición sobre las paredes laterales	70
4.3.3	Flujo de agua a través de la carcasa	71
4.4	<i>Daño inducido por la humedad</i>	71
4.4.1	Erosión por impacto de la humedad	71
4.4.2	Erosión de los bordes de estela	80
4.4.3	Erosión por lamiado	85
4.4.4	Erosión por partículas de agua (¿agua de lavado?)	88
4.4.5	Ingesta de agua en el paso del vapor	93
4.5	<i>Eliminación del agua del paso del vapor</i>	95
4.5.1	Eliminación externa (ciclos de vapor saturado)	97
4.5.2	Control de las condiciones del vapor.	97
4.5.3	Ciclos de vapor sobrecalentados.	97
4.5.4	Ciclos de vapor saturado.	98
4.5.5	Condiciones del vapor a la salida.	98
4.5.6	Efecto de la eliminación interna de la humedad en los conductos del paso de vapor.	98
4.5.7	Efecto del contenido de humedad en la eficiencia del paso de vapor.	99
5	Deposición de contaminantes en el paso de vapor	100
5.1	<i>Introducción</i>	100
5.2	<i>Introducción de impurezas en el paso de vapor</i>	101
5.2.1	Fuentes de las impurezas del paso de vapor.	102
5.3	<i>Deposición de impurezas en el paso de vapor</i>	104
5.3.1	Modificación del medio corrosivo en el paso del vapor.	107
5.3.2	Cambio en las condiciones del paso del vapor.	109
5.3.3	Parada de la unidad.	110
5.3.4	Patrones de deposición.	111
5.3.5	Deterioro de la eficiencia del paso del vapor.	114
5.3.6	Acabado superficial: influencia en el comportamiento de los álabes.	115
5.3.7	Deposiciones asociadas a la caldera de plantas de combustible fósil.	117
5.4	<i>Corrosión del paso de vapor</i>	119
5.4.1	Localización de recovecos en los elementos constructivos de la turbina.	119
5.4.2	Tipos de corrosión	121
5.4.3	Efecto de las impurezas en el fallo de los álabes.	123
5.4.4	Factores que afectan a la relación de crecimiento de la grieta.	130
5.5	<i>Prevención y mantenimiento</i>	131
5.5.1	Métodos de limpieza del paso de vapor	132
5.5.2	Directrices para el tratamiento del agua de alimentación de la caldera	134
5.5.3	DIRECTRICES PARA LA QUÍMICA DE UNA PLANTA NUCLEAR	139
	Referencias	141

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Consumo mundial de combustible en los últimos 25 años.	1
Figura 1.2 Porcentaje Mundial de combustible utilizado en los últimos 50 años	2
Figura 2.1 Álabes desprendido del escalonamiento de control	6
Figura 2.2 Daño por impacto en álabes del estator	6
Figura 2.3 Malla con restos de partículas metálicas	7
Figura 2.4 Muesca del impacto de restos de soldadura sobre un escalonamiento de control	7
Figura 2.5 Daños en escalonamiento de control debido al fallo del asiento de una válvula	8
Figura 2.6 Álabes del rotor del escalonamiento mostrado en la Figura 2.5	8
Figura 2.7 Daño causado aguas abajo del escalonamiento de la Figura 2.5	8
Figura 2.8 Daño por impacto en el borde de ataque de álabes del rotor	9
Figura 2.9 Borde de ataque dañado por impacto	11
Figura 2.10 Cráteres de impacto sobre el borde de ataque de álabes del rotor	11
Figura 2.11 Pérdida de parte de la cubierta del L1	12
Figura 2.12 Daño causado por el impacto de la cubierta desprendida en la Figura 2.11	12
Figura 2.13 Daño por impacto sobre el borde de estela en una corona de álabes estacionarios	13
Figura 2.14 Cráteres sobre el borde de estela de álabes estacionarios fijos	13
Figura 2.15 Daño por impacto causado sobre el vástago de una válvula	15
Figura 2.16 Paso de las escamas entre los álabes	16
Figura 2.17 Triángulos de velocidades para el vapor y las secmas en la descarga de los álabes estacionarios	16
Figura 2.18 Flujo radial de las escamas	18
Figura 2.19 Escamas que rebotan por la superficie interior de la carcasa	18
Figura 2.20 Escamas que rebotan entre los álabes del rotor y del estator fuyendo por los cierres	18
Figura 2.21 Parte del escalonamiento de control que ha sufrido el corte del borde de estela de sus álabes	20
Figura 2.22 Flujo de las escamas por el arco de admisión parcial	22
Figura 2.23 Efecto del ángulo de entrada	22
Figura 2.24 Erosión en la parte exterior de la corona estacionaria	23

Figura 2.25 Pérdida de material de reparación del álabe	24
Figura 2.26 Variación de la sección del perfil	25
Figura 2.27 Representación del excavado	25
Figura 2.28 Excavado en la cara de presión de un álabe	26
Figura 2.29 Cubierta susceptible de sufrir daños	27
Figura 2.30 Paso de las escamas por encima del teton	27
Figura 2.31 Sello de estanqueidad radial de un escalonamiento de control	28
Figura 2.32 Deformación tangencial del álabe debido al roce intenso	30
Figura 2.33 Fricción de la cubierta integral del álabe	31
Figura 2.34 Fallo de la cubierta debido a las altas temperaturas alcanzadas por la fricción	32
Figura 2.35 Daño por fricción causado por un objeto desconocido	32
Figura 2.36 Roce sobre la superficie interior de la carcasa	33
Figura 2.37 Desalineamiento entre el agujero y el alambre antivibración	34
Figura 2.38 Agujero del alambre deformado por el contacto.	35
Figura 2.39 Gritas causadas por la fricción de la raíz del álabe con el bloque	36
Figura 2.40 Daño por fricción sobre la cara vertical del bloque	36
Figura 3.1 Curva característica de la fluencia	41
Figura 3.2 Raíz de álabe del escalonamiento de control que ha sufrido daño por fluencia	43
Figura 3.3 Esquema de la deformación de la figura 3.1	44
Figura 3.4 Fluencia en el rotor	44
Figura 3.5 Esquema del desalineamiento de agujero	45
Figura 3.6 Desviación del diafragma, máxima en el diámetro interior sobre la junta horizontal	46
Figura 3.7 Desviación del escalonamiento de un diafragma influenciado por el tiempo de exposición	47
Figura 3.8 extensión de los álabes, para mejorar la fuerza axial	48
Figura 3.9 deformación radial de diafragma debido a la fluencia	48
Figura 3.10 Superficie interior de la carcasa donde la fluencia ha provocado el roce entre el sellado de los álabes del rotor	49
Figura 3.11 Cargas cíclicas aplicadas sobre una carga constante	50
Figura 3.12 Las tres alternativas de aplicación de cargas cíclicas	51
Figura 3.13 Variación de las fuerzas del vapor	52
Figura 3.14 Diagrama de fuerzas para una revolución del álabe del rotor mostrando los arcos activos	53
Figura 3.15 Modificación del diagrama de fuerzas del vapor para reflejar el efecto de la entrada y la salida	54
Figura 3.16 Efecto de la entrada sobre un arco activo	54
Figura 3.17 Efecto de la entrada en arco inactivo	55
Figura 3.18 Rangos seguros de frecuencia en reposo para los álabes	56
Figura 3.19 Diagrama de Campbell	56
Figura 3.20 Tensión "S" a "N" ciclos para fallar, dos formas diferentes de representarlo	58
Figura 3.21 Diagrama de Goodman	60
Figura 3.22 Efecto de la concentración de tensiones en el diagrama de Goodman	61

Figura 3.23 Efecto de la temperatura del medio en la modificación de las propiedades de los materiales	62
Figura 3.24 Rotura de alabe por fatiga de alto ciclo	63
Figura 4.1 Diagrama de Mollier de la expansión del vapor	66
Figura 4.2 Gradiente de presiones en el escalonamiento	67
Figura 4.3 Líneas de corriente a través de álabes del estator	68
Figura 4.4 Trayectoria de la partícula de humedad	68
Figura 4.5 División del flujo en el ataque del perfil	68
Figura 4.6 Condiciones del vapor a la entrada del álabe	69
Figura 4.7 Flujo del vapor por el borde de descarga y recogida en la cara de succión	69
Figura 4.8 deposición de la humedad y flujo hacia las paredes laterales exteriores de una corona de álabes estacionarios	70
Figura 4.9 Patrón de deposición de la humedad y su flujo a la carcasa en álabes del rotor	71
Figura 4.10 Formas de la capa protectora de metal resistente	72
Figura 4.11 Erosión concentrada secundaria	74
Figura 4.12 erosión por encima de la capa protectora	75
Figura 4.13 Erosión por debajo de la protección contra erosión	75
Figura 4.14 Erosión sobre el material base del álabe después de la pérdida de la capa de protección	76
Figura 4.15 Erosión sobre la cubierta	77
Figura 4.16 Erosión sobre los tetones	77
Figura 4.17 Relación entre la penetración de la erosión y el tiempo	78
Figura 4.18 Niveles de profundidad causados por el impacto de la erosión	79
Figura 4.19 Efecto de variar la presión en el condensador	79
Figura 4.20 Erosión del borde de estela de un escalonamiento L-0	80
Figura 4.21 Erosión en el borde de estela con muescas características	81
Figura 4.22 Cara de presión del álabe de la figura 4.21 en el que se visualiza la grieta mediante un tinte rojo	81
Figura 4.23 Líneas de corriente cuando pasa completando la sección	82
Figura 4.24 Flujo cuando se trabaja a cargas parciales	82
Figura 4.25 Patrón de flujo de agua del agua del espray	83
Figura 4.26 Diagrama de velocidad de las partículas que vuelven a entrar	83
Figura 4.27 Agua que impacta con en el punto Q	84
Figura 4.28 Erosion por fugas de agua en una sección de baja presión	86
Figura 4.29 Erosión por agua en las juntas horizontales del diafragma	87
Figura 4.30 Erosión de los huecos del diafragma	88
Figura 4.31 Erosión de las juntas horizontales del diafragma	88
Figura 4.32 Erosión por lavado entre los álabes de la sección	89
Figura 4.33 Erosión de lavado en la sección de la raíz	90
Figura 4.34 Marcas del flujo en los álabes de la corona del rotor	90
Figura 4.35 Erosión por lavado del anillo exterior del diafragma	91
Figura 4.36 Erosión profunda en el diafragma con marcas de erosión en el borde de estela	91

Figura 4.37 Erosión por lavado donde se tiene eliminación de material	91
Figura 4.38 Erosión por lavado en la carcasa entre álabes estacionarios	92
Figura 4.39 Esquema de la reparación	92
Figura 4.40. Diafragma reparado	93
Figura 4.41 Alabes torcidos y desprendidos causados por la ingesta	94
Figura 4.42 Recogedor de agua interno	96
Figura 4.43 recogedor de agua	96
Figura 4.44 Ciclo sobrecalentado	97
Figura 4.45 Diagrama de Mollier de un ciclo nuclear	98
Figura 4.46 Efecto de la separación interna de humedad	99
Figura 5.1 Álabes que han sufrido corrosión durante su almacenamiento	104
Figura 5.2 Expansion del escalonamiento	107
Figura 5.3 Corrosion por picadura en los sellos del final del eje de una turbina pequeña industrial	108
Figura 5.4 Efecto de la reducción inicial del vapor	109
Figura 5.5 Efecto de reducir la eficiencia en E-D	110
Figura 5.6 Alabe de reacción de alta presión con deposiciones en su superficie	111
Figura 5.7 Escalonamiento de impulso con deposiciones en su superficie	112
Figura 5.8 Depositiones fuerte sobre el borde de ataque de un álabe estacionario	112
Figura 5.9 Depositiones duras en la cara de presión	113
Figura 5.10 Depositiones en la cara de presión de los álabes del rotor	114
Figura 5.11 Depositiones duras debajo de la cubierta de una corona de álabes del rotor	114
Figura 5.12 Escalonamiento de acción	116
Figura 5.13 Escalonamiento de reacción	116
Figura 5.14 Recovecos en los componentes del paso de vapor	120
Figura 5.15 Pérdidas del alambre antibibración	120
Figura 5.16 Alambre para ataduras soldado	120
Figura 5.17 Junta horizontal sin uso durante un gran número de años	122
Figura 5.18 Álabes del rotor que han sufrido picadura en la superficie	123
Figura 5.19 Corrosión or picadura del tambor del eje	124
Figura 5.20 Corrosión en el soporte de los álabes	125
Figura 5.21 Grietas causadas por la corrosión bajo tensión	126
Figura 5.22 Grieta transgranular en la raíz del álabe	127
Figura 5.23 Apariencia de la grieta en la raíz del álabe	127
Figura 5.24 Eficacias de Grietas producidas por la corrosión bajo tensión	128
Figura 5.25 Porción de un disco que ha fallado. Se observan las grietas radiales	129
Figura 5.26 Álabes con elementos fracturados en la zona de sustentación	130
Figura 5.27 Borde de estela dañado por un control pobre del proceso de lavado	133

1 INTRODUCCIÓN

Después de más de 150 años en el desarrollo de la producción de potencia, las plantas alimentadas por combustibles fósiles y nucleares siguen siendo las más utilizadas en el mundo, siendo la producción de estas fuentes, un 32% del total producido, con 4.327,9 toneladas equivalente de petróleo producidas. Una tendencia del consumo de energía dependiendo de la fuente se observa en la Figura 1.1, donde se tiene el claro predominio del carbón a nivel mundial.

World consumption
Million tonnes oil equivalent

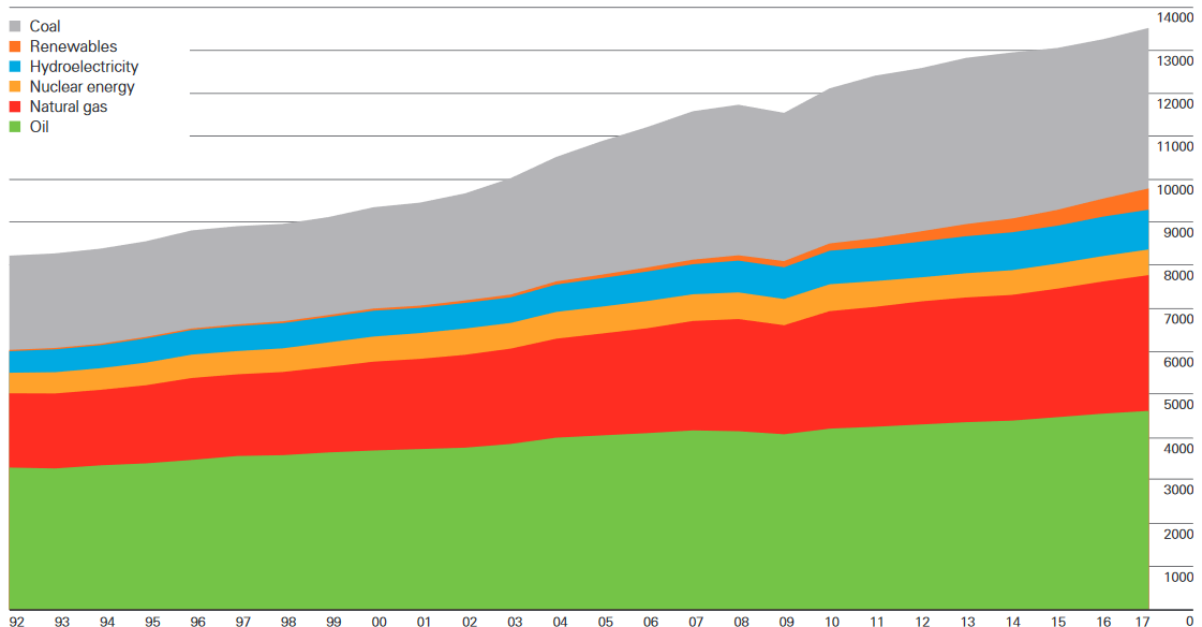


Figura 1.1 Consumo mundial de combustible en los últimos 25 años.

La tendencia del uso del carbón como fuente de energía, ha permanecido entorno al 30% durante los últimos 50 años, como se observa en la Figura 1.2, siendo el petróleo el combustible más utilizado históricamente, aunque sigue una tendencia decreciente en los últimos 40 años, quedando en la actualidad su uso en torno al 35%.

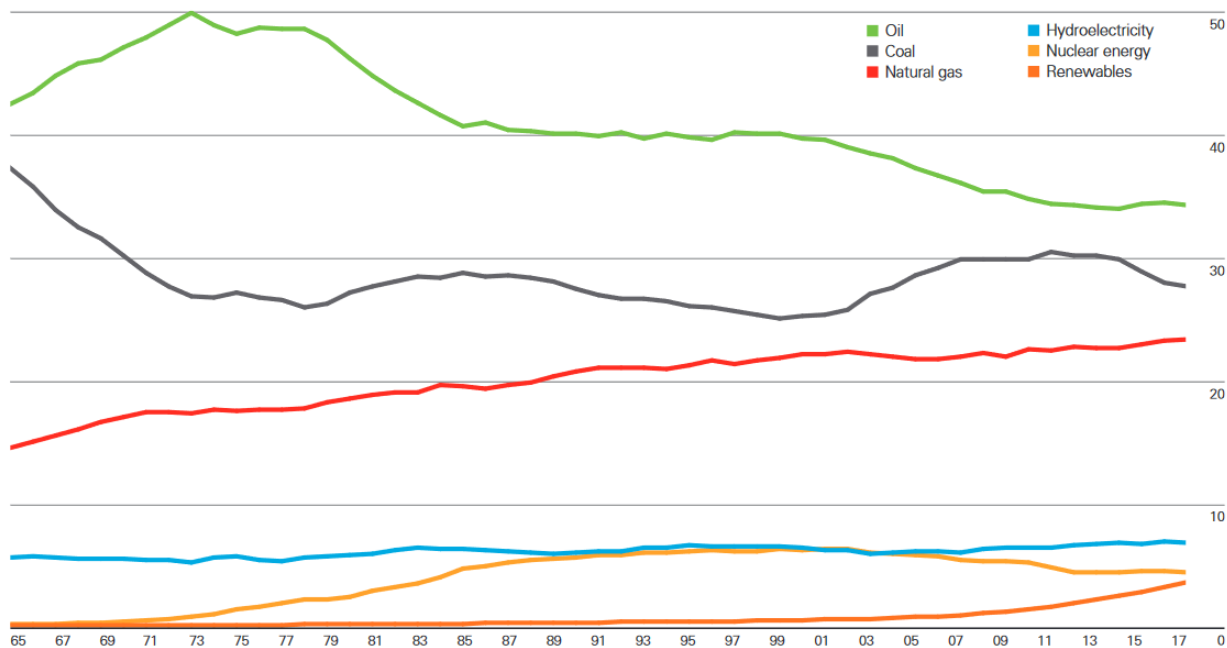


Figura 1.2 Porcentaje Mundial de combustible utilizado en los últimos 50 años

El incremento del uso del carbón y la energía nuclear como combustible, se debe en parte a la fiabilidad del ciclo de vapor y en particular de la turbina, ya que consigue una alta eficiencia en la conversión de energía, siendo esta, entorno a un 42%, llegando hasta el 60% en plantas de ciclo combinado, en la que junto a la turbina de vapor se utiliza una turbina de gas.

Por lo tanto, el uso masificado de las turbinas de vapor ha hecho posible su desarrollo tecnológico, así como posible, la evaluación e identificación de los fallos producidos por sus componentes según las diferentes condiciones de operación del vapor, la disposición del ciclo y las propiedades de sus materiales.

2 ASPECTOS OPERACIONALES QUE MODIFICAN EL PASO DE VAPOR

2.1 Introducción

El paso del vapor está sujeto a una gran cantidad de eventos operacionales que modifican la calidad de la unidad, con la posibilidad de degradar el funcionamiento en términos de eficiencia y disponibilidad. Bajo ciertas circunstancias los mecanismos de daño pueden ser lo suficientemente importante para forzar el funcionamiento de la unidad resultando en un gasto excesivo para el propietario.

No toda la maquinaria está sujeta a cada uno de los mecanismos de daño que siguen. Pero pueden aparecer si se dan las condiciones operacionales oportunas para ello.

En este capítulo se examinarán las más comunes, y donde sea posible, una explicación de sus características, una breve explicación de las circunstancias que los permiten aparecer y por último proporcionar algunas directrices para evitarlos en el caso de que sea posible.

2.2 Daño por impacto de objetos no identificados (FOD)

Hay algunas ocasiones en las que el cuerpo del álabe del rotor y del estator, son dañados por el impacto de sólidos que han sido generados dentro o han tenido acceso al paso del vapor. Hay numerosas fuentes de estos objetos, que pueden ser de varios tamaños dependiendo de su origen. El daño que causan estos objetos dependerá de su masa, su localización en el paso del vapor, y la temperatura del medio, que proporciona al material diferentes propiedades mecánicas.

Estos objetos tienen la capacidad de modificar la operación de la unidad, por lo que deben ser considerados. Estos objetos incluyen:

- Los objetos más grandes, si son generados en el paso del vapor, pueden ser el propio álabe, que, habiendo sufrido el fallo en la sección de la raíz, se desprende y rebotan con el resto de los álabes.

Esto puede tener como consecuencia daños importantes, así como la destrucción de una parte importante de los álabes del escalonamiento, algunos de estos se desprenderán también. Este tipo de fallos, cuando los álabes más grandes se ven involucrados en este tipo de daños, afecta al balance dinámico de la unidad, introduciendo niveles peligrosos de vibración en el rotor, forzando así su trabajo.

A menudo, cuando fallan los elementos más pequeños de los álabes, no afectan al balance y no se encuentra indicio de que este tipo de fallos ha aparecido. La perturbación captada por cualquier dispositivo de grabación de las vibraciones será tan pequeña que podría no ser detectada, y la unidad trabajará de la misma manera sin evidencias de fallo. Este fallo no se detecta hasta que la unidad es abierta en la siguiente inspección o parada de mantenimiento.

- Los objetos, si afectan o no al balance y si se requieren paradas para llevar a cabo acciones correctivas, provocarán de forma segura daño mecánico si se encuentran libres en el paso del vapor.

La excepción aparece con el posible fallo de cualquier pieza del escalonamiento, como las cubiertas o el anti vibrador. Cuando esta pieza se desprende, puede quedarse retenidas en la superficie interior de la carcasa, posiblemente en el diafragma o la ranura de extracción de condensado y no volviendo a entrar en el paso de vapor. Esto es raro, pero puede aparecer. Otra posible excepción a la aparición de daño se produce cuando los álabes del último escalonamiento (o una parte de alguna pieza del último escalonamiento de cualquier sección) falla y el proyectil generado es transportado directamente hacia la salida. Para secciones de baja presión, este proyectil puede ser transportado directamente hacia el tubo del condensador.

Cuando una parte de estos restos vuelven a entrar en el paso del vapor e impacta con los álabes, puede causar daños denominados como picaduras por impacto con la capacidad de causar la rotura del material. La forma y grado del daño depende del tamaño de la parte, la temperatura de la superficie con la que impacta, y la parte del álabe con la que impacta.

Si el impacto aparece en la parte más delgada del perfil del álabe, la deformación resultante será más severa y dañina para la forma aerodinámica que si sucediese en una parte más robusta.

Cuando se generan objetos demasiado largos para pasar a través de los álabes, se atascarán entre los escalonamientos de álabes estacionarios. A menudo, los álabes móviles cortan estos objetos demasiados largos en un gran número de piezas más pequeñas, que rebotan en direcciones axiales entre los escalonamientos hasta que han reducido su tamaño lo suficiente para pasar aguas abajo. Esta acción de cortar el material realiza un daño considerable en el borde de ataque o el borde de estela del álabe. Esto suele tener como resultado la sustitución de la corona entera de álabes. La partícula más pequeña, resultante del corte que pasa aguas abajo causará daño en los siguientes escalonamientos.

- La aparición de rugosidad en la superficie y la pérdida de eficiencia son consecuencias del impacto de los objetos en la superficie del cuerpo del álabe.

Esta no es, sin embargo, la única forma de pérdida causada por el impacto de algún objeto. Se encuentran otros tipos que causan daños en el funcionamiento de la unidad. Los factores más influyentes en la pérdida de eficiencia son los siguientes:

- Por impacto con el conducto de entrada, que puede ser relativamente estrecho en muchos diseños, sobre todo en aquellos más antiguos, provocando la deformación del conducto.

Esto modifica el ángulo de entrada causando una pérdida del ángulo de incidencia. El impacto puede causar el daño suficiente para cegar la entrada, imposibilitando la entrada del vapor en este paso por los álabes.

- Impacto en el borde de estela de objetos que existen en la dirección axial entre el borde de estela de escalonamientos estacionarios y el borde de ataque de los álabes del rotor, suele causar el cegado de una parte de la descarga del escalonamiento.

Esto modificará la presión del escalonamiento, así como su entalpía y la relación de velocidad del álabe. También se modificará el ángulo de descarga. El daño del borde de estela del álabe puede modificar el área de descarga, el flujo del vapor y la distribución de temperaturas a través del paso del vapor.

- Residuos cercanos a la punta de los álabes pueden dañar y deformar los sellos o cualquier dispositivo para controlar las fugas incrementándolas.

Los objetos grandes y libres en el paso del vapor, independientemente de su origen, son destructivos y tienen la capacidad de degradar la eficiencia y causar el funcionamiento forzado de la unidad. Estos objetos introducirán condiciones en el sistema que lo deteriorarán, causando fallo posteriormente en el tiempo, o

ampliando las paradas cuando se requiere el cambio de alguna parte del paso del vapor.

2.2.1. Procedencia de los objetos que impactan contra el paso del vapor

Para causar daño en el paso del vapor de la turbina, los proyectiles deben ganar acceso al sistema o estar presentes de alguna manera. La forma más probable de que ganen acceso son las siguientes:

El resultado de fallo mecánico de cualquier parte del paso del vapor

Por ejemplo, cuando un componente o parte del componente se desprende y queda suelto dentro del sistema, los residuos resultantes serán centrifugados hacia la carcasa y se redondearán, pudiendo entrar en el paso del vapor y causar daño por impacto antes de que sus efectos cesen. Este tipo de residuos se pueden encontrar en varias partes de la unidad:

- Alojados en la carcasa en la alimentación de la línea de extracción de calor o parte similar.
- Alojados en el diafragma o escalonamientos de álabes estacionarios.
- Cortado en partes más pequeñas y distribuidas a lo largo del paso del vapor.
- Siendo transportados a la sección de baja presión y transportados al condensador. En un gran número de casos, las piezas más grandes transportadas al condensador provocarán la fisura o daño severo de las tuberías. Esto causará posiblemente otros problemas asociados con la ingesta de agua de refrigeración, con las respectivas impurezas que dificultan el trabajo de los componentes del paso del vapor.
- Siendo transportados a través de la entrada del calentador, las tuberías de extracción de vapor u otras líneas de extracción.

Residuos transportados en la unidad desde la caldera. Mientras este material consiste normalmente en cordones de soldaduras (o incluso rebabas procedentes de la construcción inicial y problemas después de la reparación), se pueden encontrar también otras piezas en las líneas de vapor. El daño causado puede ser minimizado por el uso de mallas finas durante periodos cortos de tiempo, después de la puesta en marcha inicial y después de la vuelta a servicio, cuando se ha realizado la reparación. Se encuentra una pérdida de presión adicional y consecuente deterioro de la eficiencia asociados con el uso una malla fina, pero la eliminación de estos objetos pequeños es necesaria. La malla fina será necesaria durante seis u ocho semanas.

Residuos que entran en la unidad por fuentes externas Esto no es probable, pero hay ocasiones en las que los propios componentes externos al sistema pueden fallar y entrar en el sistema de álabes.

Partes dejadas en la unidad durante las paradas. Unas buenas prácticas de mantenimiento hacen esto infrecuente, pero normalmente las pequeñas piezas como tuercas, pernos y pequeñas herramientas que pueden ser dejadas en la unidad durante la parada cuando ha sido inspeccionada y posiblemente renovados. Estas piezas suelen ser metálicas, y tener la capacidad para causar daños importantes una vez la unidad ha vuelto a operar.

De todas las fuentes de residuos del paso del vapor, la generación de los proyectiles desde los propios componentes del paso del vapor es el más común y causa daños estructurales severos en términos de requerimiento de recambio de componentes. Este tipo de proyectiles son resultado del daño en su escalonamiento, y causarán daño posterior que será mayor que el daño inicial sufrido por el escalonamiento.

Formados internamente

Esta es probablemente la mayor fuente de objetos capaz de causar daños importantes, ya se pueden ser de una masa considerable.

La importancia del daño depende del tamaño del componente centrifugado en el paso del vapor. El proyectil puede causar cuantiosos daños en el primer escalonamiento de los elementos impactados y ser posteriormente cortados en un gran número de elementos pequeños, que causarán menos daño (desde el punto de vista de la integridad estructural) mientras son transportados por el paso del vapor. La Figura 2.1 muestra un escalonamiento de control que ha sufrido el fallo de la raíz del álabe. Este se ha desprendido y convertido en un proyectil en el interior de la unidad (se encuentra poco daño en los álabes relativos). Los álabes adyacentes necesitan ser reemplazados, pero los otros elementos, a simple vista, se encuentran en unas condiciones

aceptables. Una examinación no destructiva confirma que estos elementos no han sufrido daños graves.

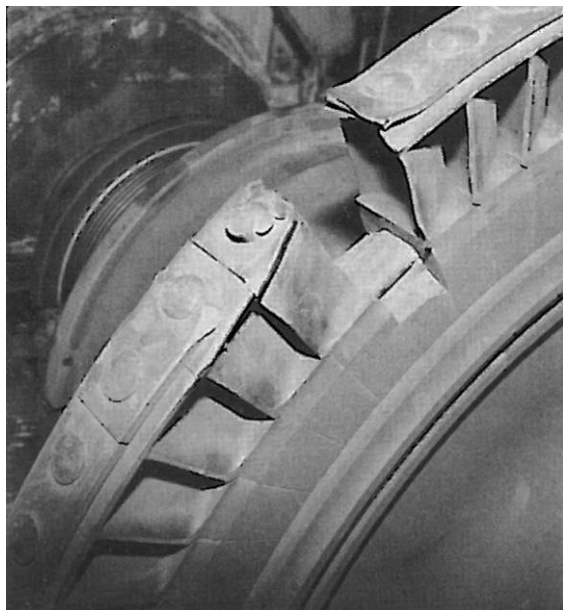


Figura 2.1 Ábabe desprendido del escalonamiento de control

En este escalonamiento se encuentra un gran espacio axial entre esta corona y la entrada del siguiente escalonamiento. Sin embargo, el ábabe desprendido fue centrifugado en la cámara de vapor donde no volvió a entrar en el flujo principal de vapor.

Comparando, es posible para un ábabe de mucha menos masa fallar y causar daños importantes porque no hay espacio axial para ser retenido en el interior del escalonamiento.



Figura 2.2 Daño por impacto en álabes del estator

Los objetos grandes pueden causar un daño suficiente para forzar el funcionamiento de la unidad durante largos periodos. Si el rotor sale de su posición de balance puede aparecer un amplio daño por fricción, que será más difícil de corregir que el fallo de los componentes de 1 paso del vapor. La Figura 2.2 muestra una corona de álabes de estator de un escalonamiento que ha sufrido un daño considerable. Aquí el cuerpo del ábabe ha sufrido daño por el impacto de un ábabe del rotor atrapado en el espacio axial entre los escalonamientos, causando esa forma de lágrima adyacentes al anillo exterior de diafragma.

Formados en la caldera

La caldera es la fuente más importante de partículas pequeñas (por ejemplo, cordones de soldaduras) que son depositados en las tuberías y finalmente quedarán libres y serán transportadas al sistema de válvulas de la turbina. Las mallas montadas alrededor de la entrada de las válvulas capturan las partículas más grandes, pero las más pequeñas pasan a través de esta e impactan contra el paso del vapor. La Figura 2.3 muestra una malla que ha sido sustituida en el que se pueden ver los restos de soldaduras. La figura 2.4 muestra el daño típico resultante de pequeños restos de soldadura transportados a través de un filtro de vapor.

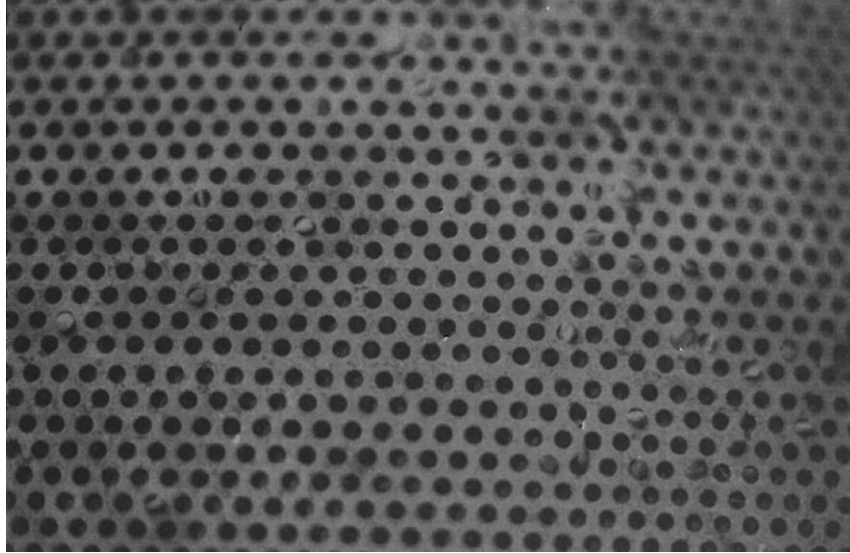


Figura 2.3 Malla con restos de partículas metálicas

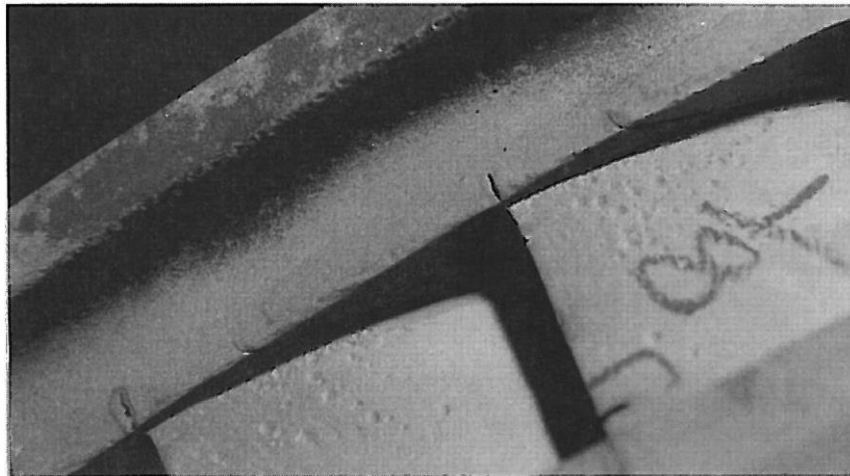


Figura 2.4 Muesca del impacto de restos de soldadura sobre un escalonamiento de control

Externas al paso del vapor

Para los proyectiles generados de forma externa al paso de vapor, la entrada no es común, pero puede aparecer. Si se encuentra el fallo de cualquier válvula o componente de los filtros, existe una alta probabilidad de que ganen acceso al paso del vapor, e impactarán en los elementos del álabe si pueden pasar a través de los álabes del primer escalonamiento.

La figura 2.5 muestra el resultado del fallo del asiento de una válvula en el escalonamiento de control. Aquí una parte del asiento de la válvula ha sido encajado entre los elementos del álabe estacionario. Los elementos móviles se muestran en la figura 2.6. Este daño ha sido el suficiente para formar partículas más pequeñas, que viajan aguas abajo, causando daño en los posteriores escalonamientos, como se muestra en la figura 2.7. El daño de estos impactos se hace progresivamente menos severo con el aumento de la distancia con respecto al escalonamiento de control.

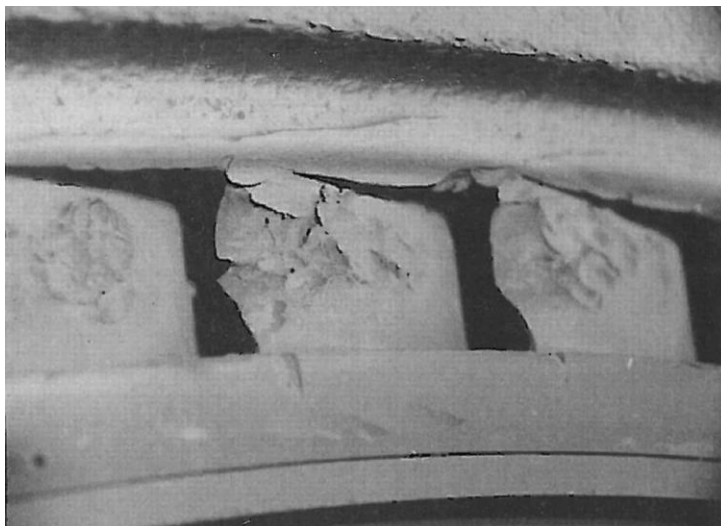


Figura 2.5 Daños en escalonamiento de control debido al fallo del asiento de una válvula

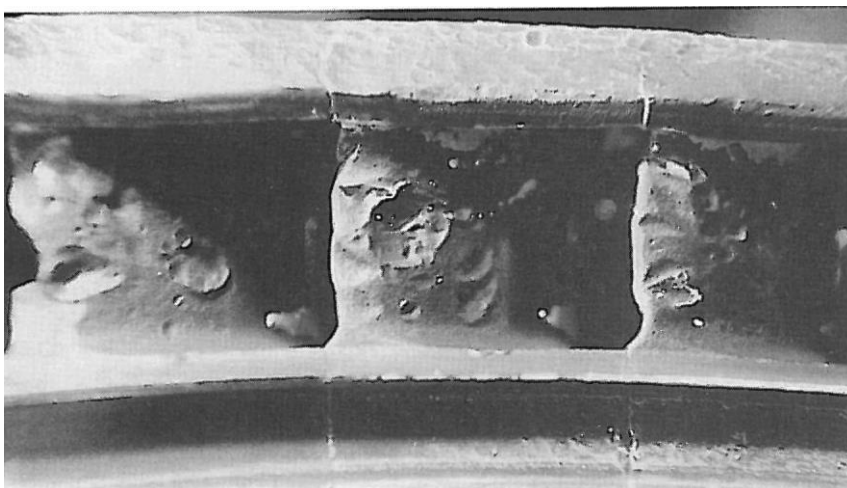


Figura 2.6 Álabes del rotor del escalonamiento mostrado en la Figura 2.5

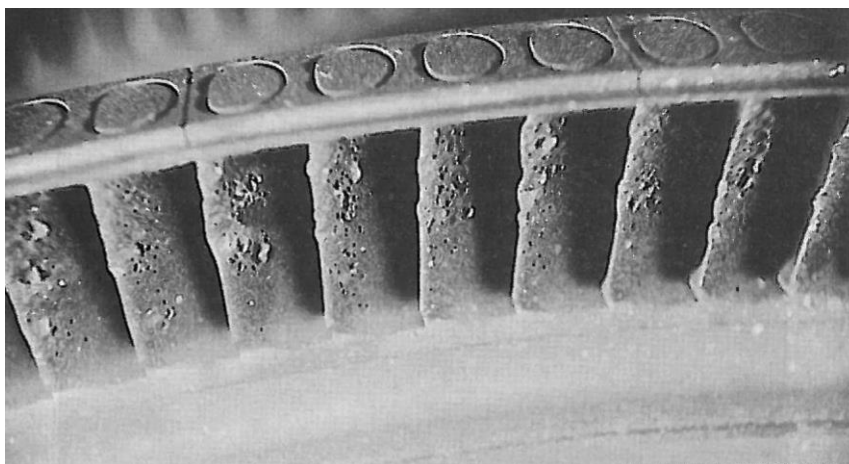


Figura 2.7 Daño causado aguas abajo del escalonamiento de la Figura 2.5

Elementos dejados en el interior

Los problemas asociados con las piezas metálicas dejadas dentro de la unidad durante paradas pueden ser los más importantes para muchos usuarios. Estos elementos pueden ser de cualquier tamaño, limitados solo por su habilidad de pasar a través de los componentes que previenen su capacidad para causar daños.

2.2.2. Clasificación del daño por impacto

Los daños sobre el paso de vapor se establecen según el nivel de deterioro sobre los elementos de la turbina.

Daño de tipo endurecimiento por impacto.

Este tipo de daño aparece cuando pequeños restos que han sido transportados por el vapor en el paso del vapor colisionan con la superficie de los álabes. Las velocidades relativas altas entre el álabe y los objetos metálicos son las suficientes para causar deformación plástica (cráteres de impacto) en la superficie del álabe. Esta forma de daño aparece cuando los elementos móviles y estacionarios, indican que los objetos han alcanzado velocidades altas en el vapor.

La figura 2.8 muestra la región del borde de estela de una corona de álabes del rotor que sufre este tipo de daño. Se encuentran también pequeñas cantidades de este en las llantas. Esto no se considera amplio, pero reducirá la efectividad global del sellado. Este daño consiste en el impacto de pequeñas partículas, formadas en los primeros escalonamientos, que intentan ganar acceso a la corona de álabes. Se puede observar que este daño no se extiende demasiado por el paso.

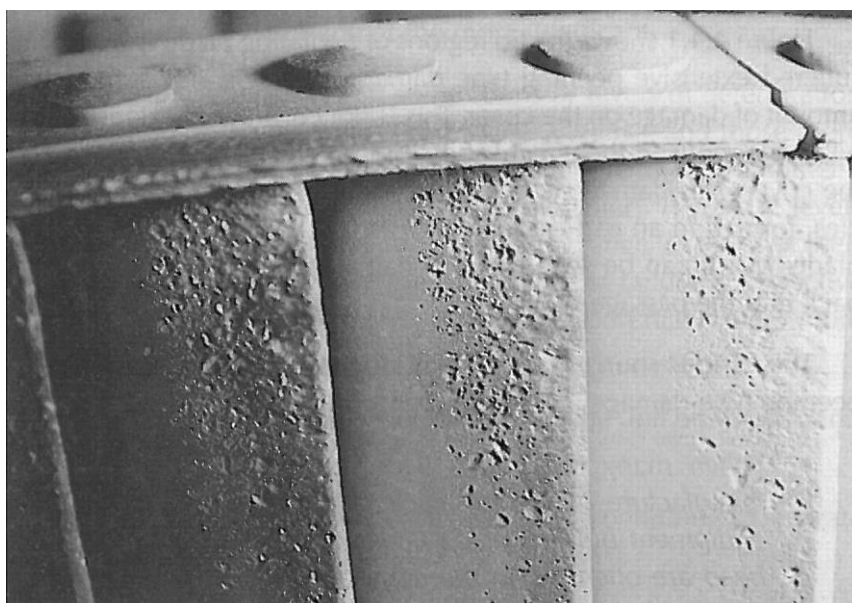


Figura 2.8 Daño por impacto en el borde de ataque de álabes del rotor

Las fuentes de los pequeños objetos capaces de causar daño por perdigonado incluyen los siguientes:

- Cuando varios procesos de fabricación usados en la elaboración del equipo térmico del ciclo se han completado (equipo construido in situ), cantidades considerables de rebabas de soldadura permanecen en los componentes y tuberías.

Muchos de estos cordones son unidos mediante fusión a la superficie metálica. Este tipo de fusión no es una unión metálica, y por lo tanto son capaces de desprenderse durante la operación.

Es por lo tanto común encontrar este tipo de cordones de soldadura en el interior de la caldera y tuberías. Algunos quedan libres y otros se quedan en la superficie de los componentes. De hecho, no habrá forma posible, para el fabricante, de eliminar la mayoría de estos restos de forma económicamente. Durante la operación estos cordones de soldadura sufrirán la presión y la temperatura del vapor en expansión, causando el desprendimiento de la superficie a la que está unida. Estas condiciones, normalmente en la puesta en marcha, no tienen la importancia suficiente para que los cordones de soldadura se desprenden de forma inmediata. Bajo estas circunstancias, la unidad puede operar durante largos periodos antes de que las condiciones sean las adecuadas para que se desprenda.

Es una práctica común para la mayoría de los fabricantes de turbinas de vapor suministrar mallas finas para su uso durante la puesta en marcha de la unidad, y también después de cualquier reparación in situ que requiera soldadura de difícil acceso. Este tipo de mallas se utiliza sobre la malla de la válvula de entrada principal. Después de un tiempo, normalmente algunas semanas o meses, estas mallas finas se

eliminan, suprimiendo así, todos los restos de soldaduras y residuos que ha conseguido retener. A partir de aquí, la unidad sigue funcionando en condiciones normales solo con el filtro de malla principal.

Esta malla fina no permanece en la unidad de forma prolongada, ya que provoca una caída de presión excesiva asociada a su uso y la consecuente pérdida de eficiencia. La economía de la operación de la planta dicta que esta fina malla se debe eliminar después de seis semanas desde la puesta en marcha inicial. En este momento, la mayoría de estos restos de soldadura y otros materiales finos que entran en el sistema serán expulsados. Existe la posibilidad de que una parte de estos cordones de soldadura continuarán adheridos a la superficie del equipamiento durante periodos mayores, llegando a desprenderse una vez la malla ha sido retirado. Por lo tanto, estos residuos tendrán libertad para entrar en el paso del vapor de la turbina, con la posibilidad de causar daño por perdigonado.

- Los componentes que se desprenden del paso del vapor impactarán con los componentes móviles presentes en sus proximidades.

Estos impactos cortan (o parten) las piezas desprendidas en objetos pequeños de un tamaño capaz de causar daños, que son libres para pasar a través del paso del vapor y causar cráteres de impacto en el siguiente escalonamiento.

Los álabes móviles tienen la capacidad de cortar dependiendo de la temperatura del escalonamiento. A mayor temperatura, el componente desprendido se rompe con facilidad en objetos de menor tamaño. Sin embargo, el material de los álabes del rotor es también más blando con el aumento de la temperatura y sufrirán por tanto impactos más dañinos.

- Existe también la posibilidad de que los residuos presentes en otras partes del sistema sean capaces de migrar a la turbina y ser transportado a través del paso del vapor.

Estos residuos pueden incluir pequeñas partes dejadas en la unidad durante las paradas y otros materiales desconocidos que ganan acceso a través del funcionamiento de la unidad. Por esta razón, se necesitará personal de mantenimiento para procurar que no se deja ninguna parte o componente en la unidad durante la reparaciones o mantenimientos. Es menos caro recuperar estas partes de la unidad que dejarlas en la unidad.

Cuando los restos de partículas sólidas que se encuentran en la turbina (independientemente de la forma en la que entra o se genera), golpea el álabe, llevará tanta fuerza que causará daños en el cuerpo del álabe. También puede impactar en la cubierta, tetones y otros dispositivos que limitan el flujo localizados alrededor de los álabes. Este daño suele tomar la forma de pequeños cráteres en la superficie de los componentes, causando una pérdida importante por fricción.

No hay procedimientos generales para el modo y cuando se debe reparar. Cada caso debe ser evaluado individualmente, basado en:

- La capacidad para perder eficiencia de la unidad.
- La posibilidad que el tipo de daño pueda deteriorar en gran medida la integridad de la unidad.

El daño debido a la pérdida de material tiende a producirse en los álabes del rotor, por lo que, los álabes estacionarios serán aquellos que sufran impacto de objetos, causando muescas superficiales, grietas e incluso fallo catastrófico.

Deformación de los bordes de entrada al cuerpo

Los objetos grandes en el hueco axial entre las coronas de álabes estacionarios y móviles siempre tienen la posibilidad de deformar y cerrar parcialmente la salida del álabe. Esto se muestra en la figura 2.9, donde la entrada de la corona de álabes entera ha sido dañada y taponada parcialmente. Esta unidad ha sufrido altos niveles de vibración debido a varios fenómenos (no necesariamente el fallo que cierra la entrada de los álabes) se muestra por la presencia de marcas de fricción en la entrada de la llanta.

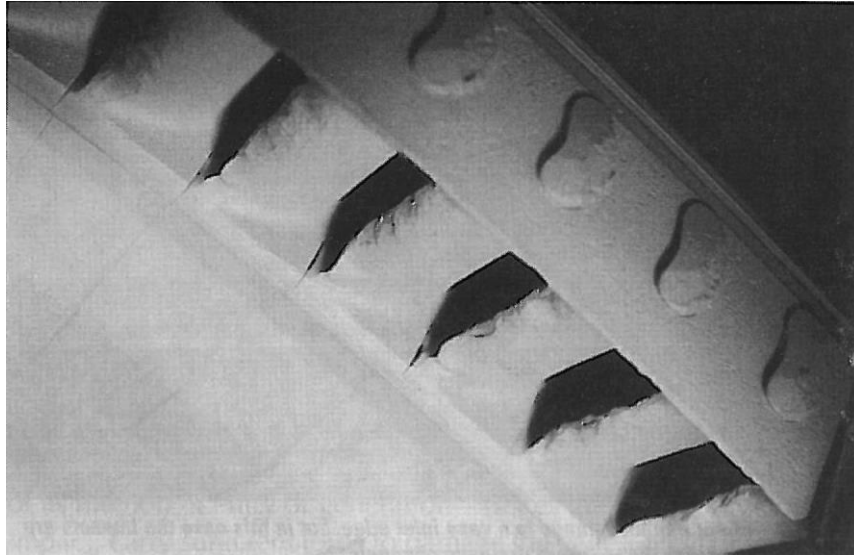


Figura 2.9 Borde de ataque dañado por impacto

Cráteres grandes superficiales

Ocasionalmente, las fracturas mecánicas que aparecen en el paso del vapor no son de la magnitud necesaria para forzar el funcionamiento de la unidad. De hecho, la mayoría no son detectados hasta que se realizan las paradas de mantenimiento. Estas roturas, por lo tanto, permanecen sin detectar y la unidad continúa funcionando durante largos periodos con condiciones favorables para la aparición de daños. Aunque este tipo de daño causará la reducción de la eficiencia de la unidad, no será detectado hasta que no se compruebe con algún dispositivo complejo para medir la eficiencia de la sección y la salida de la unidad.

A menos que la evolución del daño sea rápida hasta un nivel inaceptable, esta situación es aceptada (a veces por la ignorancia de su existencia) y a menos que los alabes en otros escalonamientos hayan sido dañados como consecuencia de la situación, no es un gran problema para el funcionamiento de la unidad. Sin embargo, cuando estas condiciones son descubiertas durante las paradas planeadas, se debe realizar una evaluación y corrección para prevenir los fallos futuros.

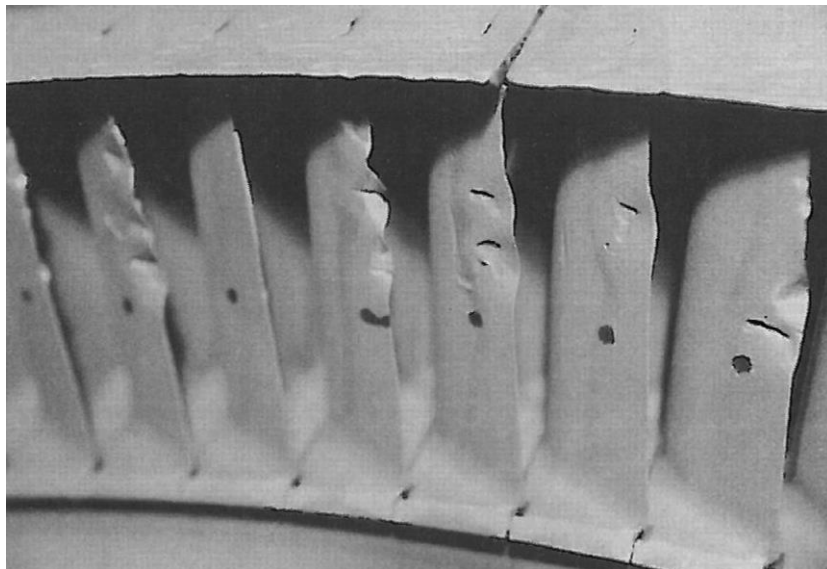


Figura 2.10 Cráteres de impacto sobre el borde de ataque de álabes del rotor

Este tipo de situación se muestra en la Figura 2.10. Los cráteres grandes y los desgarros aparecen en el borde de ataque de la corona de álabes, y muchos de estos cráteres, hendiduras y desgarros, si no son corregidos forzarán el funcionamiento de la unidad. La decisión de no abordar estas acciones correctivas y devolver la unidad al funcionamiento solo se puede tomar reconociendo el riesgo que involucra. Un fallo similar se muestra en la Figura 2.11. Después de la separación, el objeto desprendido se ha cortado en pequeños objetos. Una parte de la cubierta del escalonamiento L-1 se ha desprendido después de verse sometido a fallo por fatiga de alto ciclo de

los tetones. Este tipo de fallo probablemente no será percibido, aunque se encontrará un aumento marginal en los niveles de vibración en los apoyos cercanos al escalonamiento dañado, que no delatará al fallo. Sin embargo, las consecuencias de este desprendimiento se pueden observar en la Figura 2.12, en la que aparece daño en el borde de ataque del siguiente escalonamiento del rotor. Este se presenta de forma leve en ese momento, pero siempre existe la posibilidad de que la grieta se propague conforme aumenta el funcionamiento de la unidad.

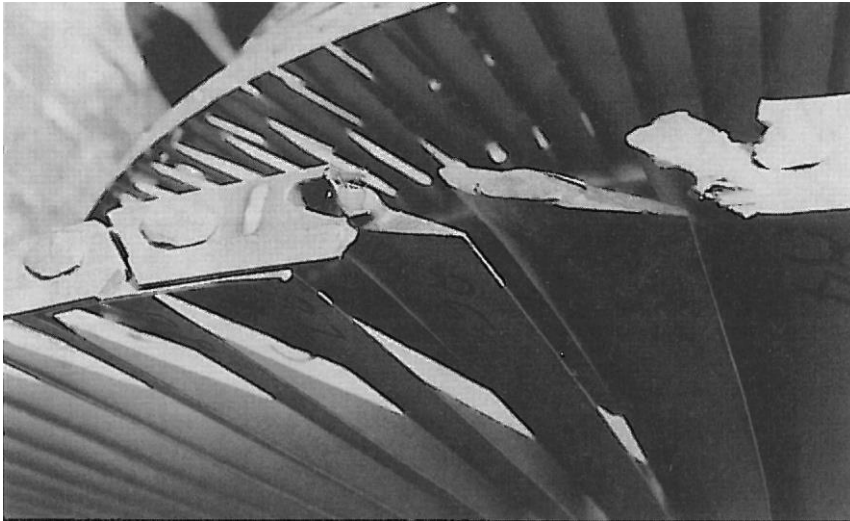


Figura 2.11 Pérdida de parte de la cubierta del L1

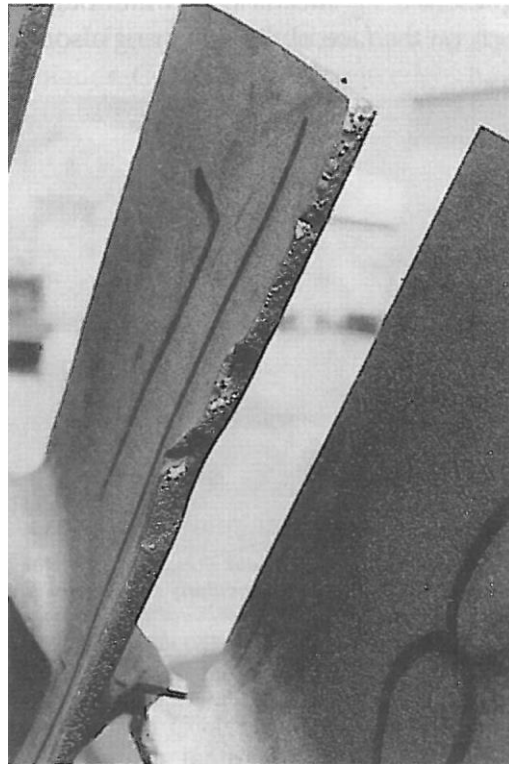


Figura 2.12 Daño causado por el impacto de la cubierta desprendida en la Figura 2.11

Cuando aparecen roturas menores, representan el desprendimiento de partes del sistema de álabes y la aparición de material perdido en el paso del vapor. Este material es libre para ser cortado y rebotar entre los componentes, donde normalmente se cortan en pequeños objetos del tamaño suficiente para pasar por los álabes con el flujo principal de vapor. Durante su paso a través del paso de vapor, estos escombros impactarán en el cuerpo de los álabes móviles y estacionarios, dañándolos o deformándolos y, por tanto, causando una pérdida de eficiencia, producida por daño mecánico.

Cráteres grandes y daños

Cualquier fallo de componente (rotura mecánica) que aparece en el paso del vapor tiene la capacidad de generar una gran cantidad de residuos metálicos. Estos residuos a menudo serán cortados por los álabes móviles en partes más pequeñas y pasarán a través de las partes restantes del paso del vapor, causando probablemente un daño mecánico menor que el discutido con anterioridad. Debido a esta acción de corte y durante su paso a través del sistema de álabes, estas piezas inicialmente grandes pueden causar daño por impacto grave en los componentes, dependiendo principalmente de su tamaño, su dureza y la velocidad relativa del impacto.

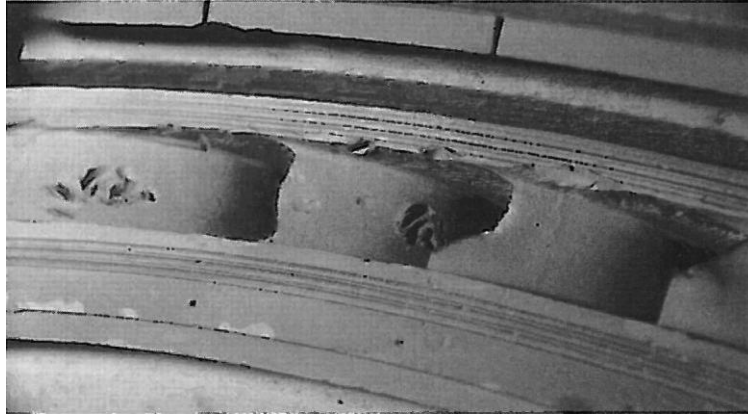


Figura 2.13 Daño por impacto sobre el borde de estela en una corona de álabes estacionarios

Aunque los álabes móviles son más susceptibles a este tipo de daño, los álabes estacionarios también pueden sufrir este tipo de daños. Esto se muestra en la figura 2.13 para una corona de álabes estacionarios. Otro ejemplo de esta forma de daño importante es en la corona de álabes estacionarios de la sección de alta presión que aparecen en la figura 2.14, donde se han perdido la parte del borde de estela de los álabes y aparecen cráteres grandes de filo afilado en la cara de succión.

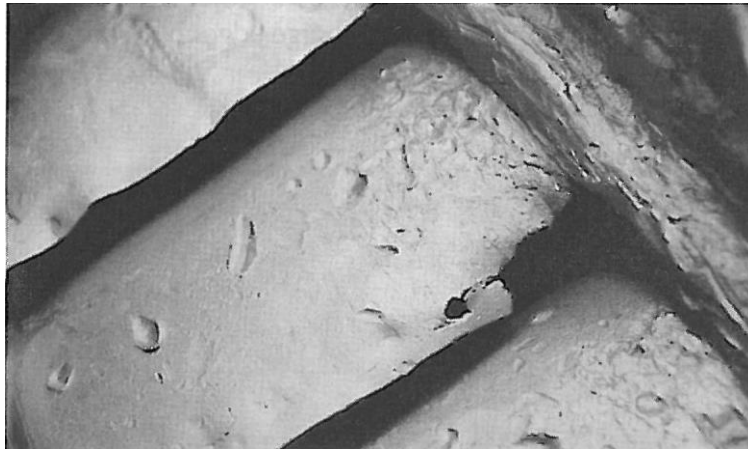


Figura 2.14 Cráteres sobre el borde de estela de álabes estacionarios fijos

2.2.3 Erosión por impacto de partículas sólidas. Abrasión

Hoy en día, las turbinas de las plantas de combustible fósil trabajan bajo condiciones de presiones y temperaturas mayores y se espera que estas soporten paradas y puestas en marcha más frecuentes. Esto lleva a un aumento de la erosión por partículas sólidas, un tipo de daño que provoca una pérdida importante de material de varios componentes en los escalonamientos seguido de la entrada inicial o reentrada de vapor caliente del sobrecalentador de la caldera o sección de recalentamiento.

El daño es introducido por la acción de escamas duras que se forman en el lado del agua de los tubos de la caldera, que son transportadas hacia el paso de vapor de la turbina, donde tiene contacto con las superficies de algunos componentes y eliminan material de ellos. En estas instancias, el primero o los dos primeros escalonamientos de la unidad sufren patrones de pérdidas de material reconocibles en varias regiones después de la entrada del vapor. Este tipo de daño puede ser muy grave, ya que la pérdida de material aparece en regiones donde puede afectar a la eficiencia y a la integridad estructural de la unidad.

Este tipo de daño aparece principalmente en las caras de presión de los álabes del estator y del rotor, en los

bordes de entrada y de descarga. Sin embargo, este tipo de daño también se encuentra como pérdida de material en la cubierta y la cabeza de los tetones.

Estos efectos dañinos han sido determinados como consecuencia de escamas de partículas duras, que han sido exfoliadas del interior de los tubos de la caldera. Estas escamas son transportadas en forma de pequeñas partículas hacia los primeros escalonamientos de la unidad, donde, tras alcanzar altas velocidades contactan con los álabes estacionarios y móviles. Las escamas están compuestas principalmente por magnetita, que es extremadamente dura y tendrá, desde el principio, bordes puntiagudos o irregulares. Este tipo de daño puede afectar a los escalonamientos de alta presión y secciones de recalentamiento de la unidad. Se cree que hay dos mecanismos básicos que contribuyen a este daño:

- Una acción de raspado y corte que aparece en materiales dúctiles de los álabes. Este daño es mucho más grave cuando el ángulo de impacto es de 20° a 40°. Los daños para impactos oblicuos son función de la velocidad de la partícula elevada a la enésima potencia, donde n puede tener los valores desde el 2.0 al 4.0.
- Un mecanismo de tipo astillado, en el que las pequeñas partículas de rompen del borde de estela. Este es un tipo de fallo frágil encontrado comúnmente en materiales austeníticos.

Los mecanismos de eliminación de material pueden ser abrasivos o tener un efecto importante en las escamas, o una combinación de ambas. Sin embargo, cualquier mecanismo de eliminación debe tener en cuenta las pérdidas de material en las superficies erosionadas y cómo reaccionan al aumento de las altas temperaturas en las que opera el acero.

Una vez las escamas entran en el paso del vapor, el vapor las transportará hasta la entrada del primer escalonamiento. Después de impacto inicial, una parte de las escamas serán centrifugadas a la carcasa, donde podrá acceder a un gran número de rutas a través de la expansión de los restantes escalonamientos, en algunos casos colisionan y dañan otras partes del paso del vapor. Otras partes de estas escamas rebotarán en el hueco axial entre las coronas de álabes estacionarias y móviles, pasando finalmente a través de los álabes del rotor, causándoles cierto nivel de daño. Por último, todas estas escamas migrarán al flujo de la sección exterior del álabe. Un impacto continuado sobre los álabes y las fuerzas centrífugas inducido a estas escamas, ayuda a estas escamas a depositarse en diferentes partes de la carcasa donde permanecerán.

Las escamas se forman en los tubos de la caldera como resultado de la operación continuada a de esta a altas temperaturas y son adheridas a los tubos. Sin embargo, una vez la temperatura de los tubos cambia (especialmente en las paradas y puestas en marcha), las escamas se exfoliarán quedando libres en el interior del propio tubo. De esta observación queda claro que la unidad funcionando con el ciclo requerido, o sujeto a un gran número de paradas en frío, sufre exposición a este tipo de daño, por lo que será necesario un gran nivel de monitorización de la unidad y si se requiere un nivel mayor de mantenimiento.

2.3. Formación de escamas

Los tubos de la caldera son normalmente producidos de acero de baja aleación (perlita), lo que le permite una fácil formación de escamas de óxido en las superficies internas.

Durante la puesta en marcha y paradas, cuando la temperatura en la caldera y los tubos del recalentador cambia (o cuando la variación de temperatura aparece en las vasijas debido a un disparo imprevisto u otras condiciones), el tubo y las escamas, se expanden y se contraen a velocidades diferentes, debido a que el tubo y la escama tienen diferentes coeficientes de expansión, por lo que se desarrollan fuerzas de cizallamiento a lo largo de la superficie de contacto con la variación de la temperatura. Estas fuerzas son de una magnitud tal que, con un aumento importante de temperatura, causarán la rotura de esta superficie, permitiendo a la escama de desprenderse.

Incrementando las velocidades del flujo a través de los tubos de la caldera se favorece al desprendimiento de las escamas. Cuando estas escamas quedan sueltas, son transportadas hacia los escalonamientos de la turbina, dañando aquellos componentes con los que entra en contacto. LA figura 2.15 muestra un vástago de una válvula

de parada que ha estado expuesto a impacto de escamas durante dos años. Se pueden observar la pérdida de materia debido al pinzamiento de la escama. Una vez a través de las válvulas, las escamas entran en el paso principal del vapor.

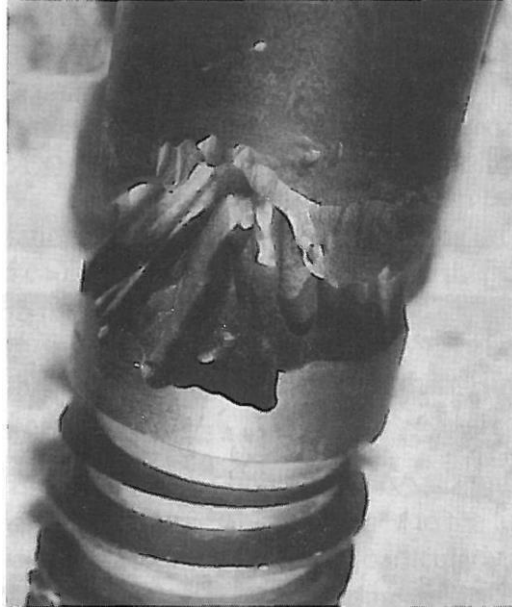


Figura 2.15 Daño por impacto causado sobre el vástago de una válvula válvula

2.4. Mecanismos de erosión

Para considerar los mecanismos de corte y acción abrasiva que eliminan material de los escalonamientos, es necesario revisar los diagramas de velocidades de los escalonamientos y considerar los posibles caminos que las partículas puedan seguir en el interior del paso del vapor.

La pérdida de material actual depende principalmente de la geometría y el ángulo de curvatura del álabe, por lo que se tiene especial cuidado en el diseño. Sin embargo, la explicación general del funcionamiento de los dos tipos de escalonamientos se puede desarrollar y observando las unidades individuales, se pueden entender mejor los diferentes tipos de desarrollo.

2.4.1. Mecanismos

Corona de álabes estacionarios

Considerando el perfil de velocidades de las coronas de álabes mostrado en la figura 4.7.1. en este tipo de coronas de álabes, el vapor que transporta pequeñas partículas de escamas que entran en el paso entre los álabes, ya que este vapor es de una masa menor, se pueden acelerar por la liberación de la energía térmica reflejado por el ángulo de curvatura del cuerpo del álabe. Tanto la cara de presión como la cara de succión del álabe adyacente influyen en esto. En la descarga, el vapor sale de la corona con el ángulo de diseño.

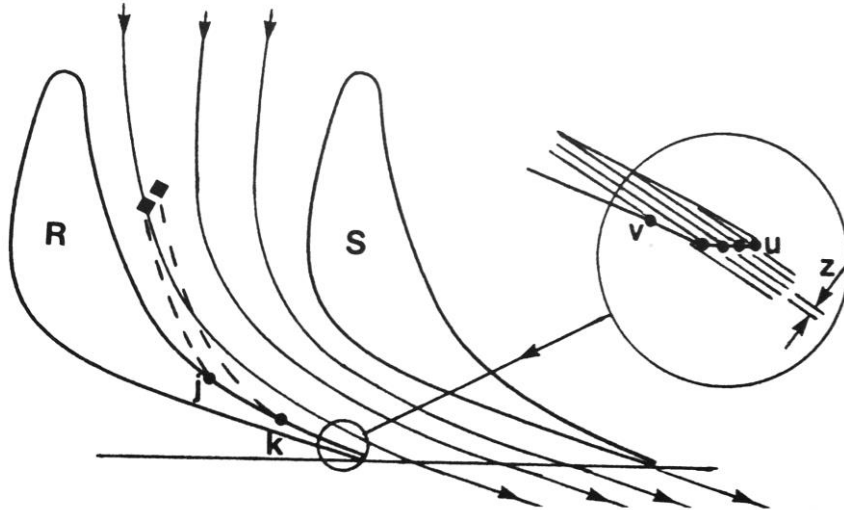


Figura 2.16 Paso de las escamas entre los álabes

Sin embargo, debido a que las escamas transportadas poseen una masa mayor, estas no se pueden acelerar por completo en el paso del vapor entre los álabes ni cambiar su dirección con el ángulo de curvatura del perfil, aunque se desviará cierto grado por su paso. Algunas de estas escamas impactan contra la cara de presión del álabe estacionario ("R"), causando el corte o la acción abrasiva en esta superficie. El tipo de contacto de la escama en el punto "j" será de tipo impacto, en cambio el contacto de tipo "k" será de tipo raspado. Sin embargo, toda escama que tenga contacto causará impacto y raspado.

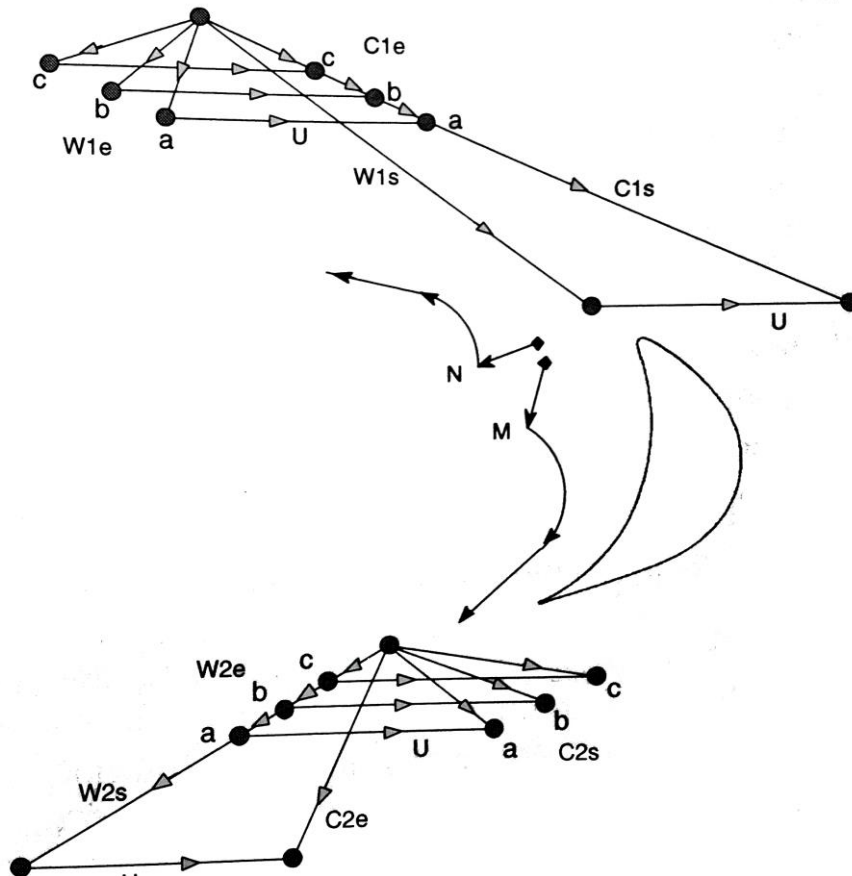


Figura 2.17 Triángulos de velocidades para el vapor y las secmas en la descarga de los álabes estacionarios

Cuando se tiene contacto con la cara de presión del álabe "R", la escama reaccionará y eliminará material. Esta eliminación de material continuará eliminando más superficie hacia el borde de estela debido a la gran cantidad de escamas presentes a lo largo de la superficie del álabe. Todo esto se muestra con más detalle en la figura 2.16

donde se representa el efecto de los diferentes niveles de penetración “z”. La cantidad de material del álabe restante después de este nivel de penetración será visible solo cuando se inspecciona la posición donde el material ha sido eliminado. En este punto aparecen los patrones de pérdida más característicos.

Corona de álabes del rotor

El camino que siguen las escamas en los álabes móviles se ve influenciado por la fuerza ejercida sobre ellos por el flujo del vapor y por el efecto centrífugo de la rotación. Esto quiere decir que para la corona de álabes del rotor es necesario considerar que la escamas se mueven en un plano axial/tangencial y en dirección radial, lo que, es más, en este tipo de coronas, el mecanismo de pérdida de material es más complejo, teniendo la complicación de que los componentes de flujo alto radiales introducidos por las fuerzas centrífugas, impuestas en las fuerzas de sustentación que mueven las escamas en el flujo principal de vapor.

Los planos axiales/tangenciales. Considerando el triángulo de velocidades en el plano axial/tangencial para el vapor y las escamas en un escalonamiento típico del rotor en la figura 2.17 donde el triángulo de velocidades del vapor y las escamas que entran y salen de la corona de álabes se pueden observar.

Como se muestra en el diagrama, el álabe móvil, con velocidad “U”, se encuentra dispuesto a aceptar el vapor de entrada de la corona de álabes del estator con velocidad “W1s”. Este vapor fluye por el paso de expansión entre el cuerpo del álabe y la descarga (con una velocidad axial importante) en la siguiente corona del estator. La escama tiene esencialmente el mismo ángulo de descarga del vapor que ha dejado la corona de álabes estacionarios. Se debe reconocer que puede haber diferencias en el ángulo de descarga para este tipo de contacto de las escamas con el borde de estela del álabe estacionario. Este tipo de escamas puede rebotar o deflectar del ángulo del vapor. La relativa gran cantidad de partículas de escamas dejarán de estar influenciadas por la corona del álabe estacionario con velocidades menores “C1e”.

En el diagrama de la figura 2.17, con el triángulo de velocidades para tres diferentes partículas (a, b, y c con velocidades “W1e”). Los diferentes triángulos de velocidades muestran los posibles rangos de velocidades de descarga para las escamas, con las velocidades actuales influenciadas por su tamaño, forma e historia previa al impacto. Por lo tanto, las escamas que entran en la corona de álabes móviles se pueden dividir en dos grupos:

- Las escamas que pasan a través de las coronas de álabes estacionarios sin colisionar con los álabes estacionarios. Tienden a ser de menor tamaño y poseer unas velocidades más altas, ya que no pierden energía en el impacto.
- Las escamas que impactan con los álabes estacionarios. Se perderá por tanto energía y se tendrá una menor velocidad, por último, se romperán en partes más pequeñas a causa del impacto.

Es imposible considerar todos los factores que tienen la capacidad de desarrollar un modelo detallado, sería suficiente asumir que la velocidad de descarga puede tener unas velocidades entre “W1e.a” hasta “W1e.c” como se muestra en la entrada del triángulo de velocidades.

Será necesario considerar las posibles trayectorias de las escamas a la salida en el rango de posibilidades. Considerando primero las escamas que entran a una velocidad “W1e.a” (la escama que han pasado a través de los álabes estacionarios sin impactar y será posiblemente las de menor tamaño). Estas escamas entraran como se muestra en la figura 2.17 golpeando la cara de succión de los álabes móviles a la posición “M”, a causa del impacto la partícula se fracturará en partes de menor tamaño, que rebotarán en el flujo de vapor principal. Es probable por tanto que la mayoría de estas escamas (o partículas más pequeñas) serán transportadas a través del paso del vapor para entrar en la siguiente corona de estator. Las escamas entran en el rotor con una velocidad “W1e.c”, golpeando el álabe en la posición “N” y rebotando. Debido a que la mayoría de las escamas impactan con los álabes del estator, serán de gran tamaño y la mayoría rebotará en el hueco axial entre la corona del estator y del rotor. Estas escamas se considerarán en más detalles en la siguiente sección, que trata el efecto radial del flujo.

Estas escamas transportadas a través del paso por la expansión hacia la descarga, saldrá de la corona de álabes del rotor con velocidad y direcciones como las indicadas en “C2e”, que pueden tener el rango de valores de velocidad y los ángulos de descarga. El vapor saldrá de la corona a una velocidad predicho en el diseño “C2s” en dirección axial.

El plano radial. Debido al efecto centrífugo en el fluido de trabajo en el paso por lo álabes móviles, las escamas a su paso por el álabe experimentarán una fuerza centrífuga que las empujará hacia el exterior, donde se encuentran las llantas que las retendrán impidiendo que sean centrifugadas radialmente hacia la carcasa. La

figura 2.18 muestra el paso de las escamas indicando el flujo radial hacia la parte inferior de la llanta, aunque la llanta impide a estas partículas abandonar la corona. Sin embargo, una vez abandone el álabe, la partícula tendrá una gran componente radial debido a su masa, que causara que una parte importante de estas partículas fluya hasta la carcasa. Algunas de estas escamas rebotarán por la carcasa y volverán a entrar en el flujo principal de vapor. Una parte será retenida en algunos recovecos o cavidades. Normalmente, cuando se abre la unidad, se pueden eliminar algunas de las escamas presentes en la parte inferior de la carcasa. En las figuras 2.18 y 2.19 se muestran diferentes patrones que pueden seguir las escamas en los álabes del rotor al igual que los efectos de la fuga del vapor en la llanta.

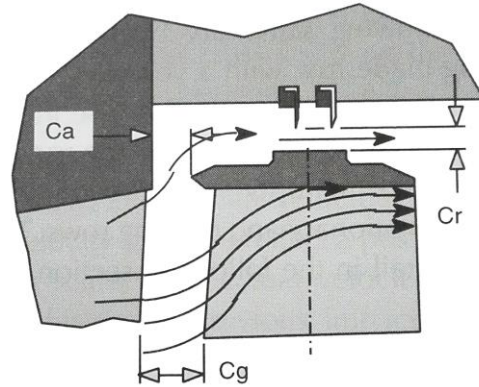


Figura 2.18 Flujo radial de las escamas

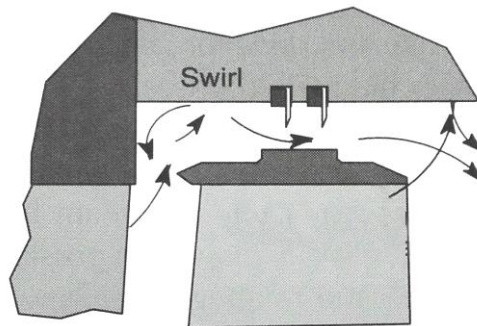


Figura 2.19 Escamas que rebotan por la superficie interior de la carcasa

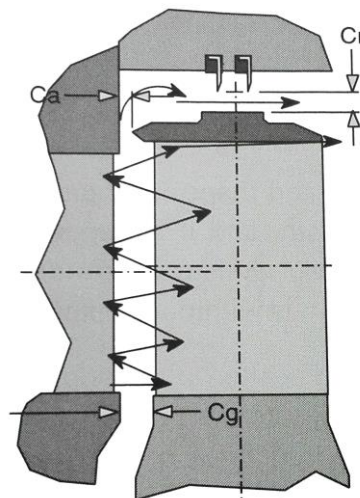


Figura 2.20 Escamas que rebotan entre los álabes del rotor y del estator fugando por los cierres

La cantidad de vapor fugado sobre las llantas tiene un efecto directo en la cantidad de escamas que alcanza la carcasa a través del sellado, tanto axial como radial. La figura 2.19 muestra los efectos de las fugas y la interferencia que aparecerá en la cabeza de los álabes. También se muestra los posibles caminos que pueden seguir las escamas. Una vez ha pasado a la carcasa en la parte de entrada del álabe del rotor, puede impactar en la carcasa y aparecerá una espiral en el espacio radial por encima del álabe. Estas escamas, en última instancia, pasarán el sellado radial e interactuarán con la descarga de vapor de la corona de álabes del rotor. Puede ser influenciado, en un menor grado, por las escamas que han sido centrifugadas a la carcasa desde los álabes del rotor. Otra consideración en términos de la influencia del sellado es que como los sellos rozan, el espacio donde se crean las espirales se abrirá, produciendo grandes cantidades de vapor fugado y vapor forzado que afectará a estas partículas. Una mayor fuerza del vapor tiende a suprimir el flujo radial de las escamas y permitir menos escamas centrifugadas a la carcasa. Las escamas con consiguientes acceder a la carcasa quedarán retenidas en la carcasa y serán transportadas al siguiente escalonamiento.

Se consideran ahora más detalladamente los posibles caminos extremos que puede tomar la partícula desde “a” hasta “c” en la figura 2.17 La partícula representada por las condiciones de “a” con velocidad “ $W_{1e.a}$ ” entra en el paso de vapor a alta velocidad y penetra el paso de expansión hasta el punto “M” antes de que impacte en la superficie de la cara de succión. La mayoría de estas partículas son transportadas a través del paso de la corona. Aunque serán centrifugadas hacia el exterior hasta la carcasa, una parte de ellas pasarán a la siguiente corona de álabes estacionarios, y posiblemente, impactarán con la superficie interior de la carcasa. La acción centrífuga en el paso del vapor entre los álabes se muestra en la figura 2.18.

Otra cuestión de gran importancia en términos de la pérdida de material y daño, es que las escamas (partículas “c” que entran con una velocidad “ $W_{1e.c}$ ”) que rebotan en el hueco axial “Cg” entre la corona de álabes estacionarios y móviles en la figura 2.18, que causaran cierto nivel de daño en el álabe con un impacto inicial y el consecuente rebote cierta distancia atrás en el hueco axial “Cg”, volverá a entrar en el flujo de vapor principal y será libre de volver a entrar en la corona de álabes del rotor con la posibilidad de causar daños.

Una vez se ha abandonado el álabe después de impactar en el punto “N”, esta escama tendrá cierta componente radial pequeña. En el momento en el que entre en el hueco axial, tenderá a fluir o migrar radialmente hacia el exterior con cierta velocidad. Dependiendo del tamaño y dirección de la escama, retornará golpeando la corona de álabes estacionarios, donde rebotará y será transportado por el campo de fuerzas del vapor de nuevo hacia la corona de álabes del rotor. Este tipo de daño y el consecuente daño, se puede repetir tantas veces como las que la partícula sea forzada por el vapor a volver al paso de expansión entre los álabes. La figura 2.20 muestra el posible paso de una partícula que entra en la corona de álabes del rotor en una zona cercana a la raíz del álabe. Se producen un gran número de impactos hasta que la partícula llega finalmente a la cabeza del álabe, donde podrá pasar por encima de la llanta o a través de la corona de álabes. Es posible también que cualquier escama, tras el impacto se divida en partes más pequeñas, que seguirán caminos diferentes debido a su tamaño y la relación de este con el campo de velocidades del vapor. De forma similar, las escamas que tienen otras fuentes de ingreso rebotarán y fluirán hacia el exterior de la sección de la cabeza, en esta zona, por tanto, se encontrará una acumulación de escamas hacia la cabeza del álabe. Se esperará que el daño se haga progresivamente más duro hacia la cabeza.

En la puesta en marcha de la unidad, la cantidad de vapor y la fuerza que admite el vapor es relativamente pequeña. En este momento es cuando una pequeña parte de las escamas formadas se exfolian y fluyen con el vapor hacia la turbina. Sin embargo, puede presentarse cierto retardo en la entrada de estas escamas en el paso del vapor, ya que las partículas grandes tendrán problemas para acceder debido a los filtros de malla, serán atrapadas en cavidades y recovecos en las tuberías de entrada de las válvulas, por lo que se requiere cierto tiempo para que estas escamas se puedan dividir en partículas lo suficientemente pequeñas para pasar a través de las mallas, y otras escamas podrán a la larga, volver al paso del vapor desde los recovecos y pasar hacia la turbina. Por lo tanto, aunque las escamas sean transportadas hacia la turbina en la puesta en marcha, su entrada en la turbina y la provocación de daños será retrasada mediante varios mecanismos y el proceso de daño continuará cierto tiempo después de que la unidad vuelva a operar.

2.5. Patrones de pérdida de material debido a la abrasión

Los patrones de pérdida de material que aparecen en los álabes del rotor y del estator son familiares para la mayoría de los operarios, por lo que son inmediatamente reconocidos. Este tipo de daño se caracteriza por la

modificación que produce en ambas caras del paso del vapor y las paredes laterales, y el efecto que tienen en el sistema de sellado sobre los álabes del rotor. Eliminando este material, se modificará la forma del paso de expansión, y su capacidad de ser influenciado de forma adversa en la eficiencia de la expansión del paso de vapor y la fiabilidad de la unidad.

Estos patrones de pérdidas de las coronas del rotor y del estator tienen ciertas similitudes, pero el daño causante en las dos coronas puede ser bastante diferente. Esto es debido a la influencia de las diferentes fuerzas que ejercen sobre el camino de las escamas cuando esta atraviesa las coronas.

La dureza de las escamas y la forma puede causar daño por erosión antes de que entre en el paso del vapor, y será necesario para el operario examinar el sistema de válvulas de control para asegurar que el nivel de daño que aparece se encuentre dentro de unos valores aceptables.

El daño rápido de la turbina, después de la admisión inicial o después de que el vapor pase de la sección de recalentamiento de la caldera, puede acarrear daños graves como consecuencia de estas escamas. Como la erosión por partícula sólida en la unidad normalmente es un proceso lento, aunque este efecto y la presencia de las escamas puede ser derivado de la distribución de presiones a través de la unidad y las medidas del estado de la línea de eficiencia. Esto se debe a que un proceso gradual se debe monitorizar con instrumentación cualificada. Es con frecuencia difícil, inmediatamente después de la puesta en marcha de la unidad, diferenciar entre los efectos de este daño por erosión y los daños debidos a la deposición de impurezas en las superficies del paso del vapor.

La eliminación de material aparece, en primer lugar, en la puesta en marcha, y si se admite vapor al paso de vapor a través del arco de admisión parcial, por lo que será frecuente que en estas partes donde se produce la primera admisión del vapor sean las primeras en sufrir daños extremos. Esto se puede observar de la revisión del escalonamiento de control. La figura 2.21 muestra una parte del escalonamiento de control, en el que la pérdida de material se ha sufrido en el cuerpo de los álabes estacionarios en el borde de estela, mostrando la naturaleza irregular de la erosión. Este tipo de pérdidas en el borde de estela afectan a el área y ángulo de descarga. Si no se corrige, causará un acentuado deterioro de la eficiencia de la expansión.

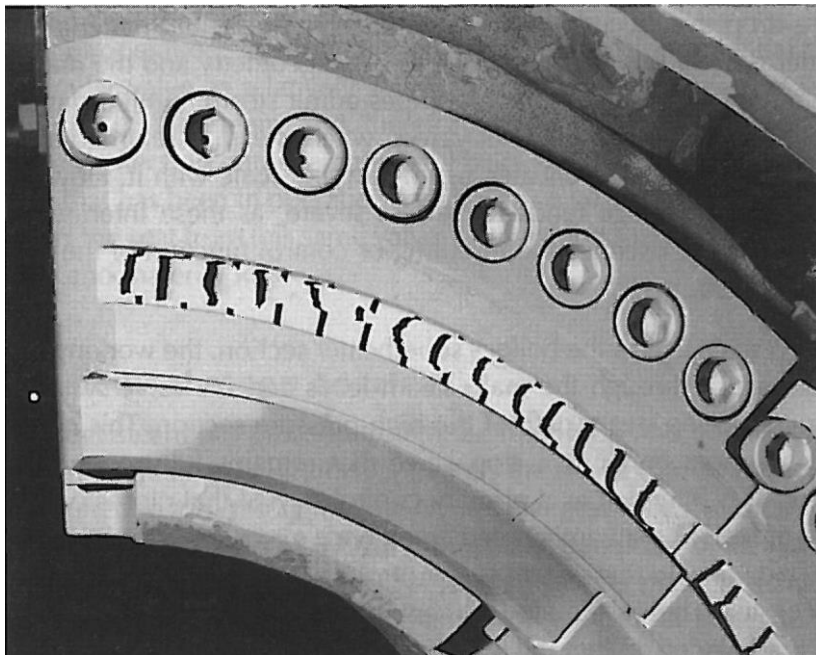


Figura 2.21 Parte del escalonamiento de control que ha sufrido el corte del borde de estela de esus álabes

Sistema de válvulas de la turbina

Las escamas transportadas en la turbina son capaces de causar daño a todas las superficies metálicas con las que tienen contacto, incluyendo las válvulas. Sin embargo, la erosión es sensible a la velocidad, y tendrá un efecto más importante en aquellas superficies que están sujetas a las altas velocidades del flujo del vapor y de las escamas a través de ellas.

Estas unidades que sufren daños en el sistema de válvulas, el daño aparece antes de que el vapor entre en el paso

del vapor. Sin embargo, el daño puede afectar al funcionamiento de la unidad, y se debe prevenir desde el progresivo hasta el mayor posible, incluso si requiere la sustitución de alguna de las partes. Las escamas que entran pueden erosionar los asientos y los vástagos, de hecho, cualquier superficie en la que el vapor alcance altas velocidades mientras se acelera a través de la superficie por la caída de presión que aparece en el sistema de válvulas. Los patrones de pérdida de material actual son función de la geometría propia de la válvula y la dirección con la que las tuberías de entrada admiten el vapor. Cambios similares se producen en las válvulas de entrada, donde el vapor vuelve a la unidad desde el recalentamiento de la caldera, transportando otra vez, escamas en ella. Sin embargo, este tipo de daño tiende a ser más tolerable una vez las válvulas intermedias dejen de ejercer función de control en el sistema de entrada principal.

Una vez las escamas abandonan la sección de recalentamiento de la caldera, el fluido de trabajo lo transporta a través del vapor principal y el sistema de válvulas hasta el paso de vapor de la sección de alta presión. Esta válvula de control contiene una válvula de parada que permanece abierta a cualquier carga, esta, tiene la función de primer dispositivo de control que se cierra solo en pérdidas de la carga y cuando la unidad presenta unas condiciones de emergencia de sobre velocidad. La segunda válvula en el sistema de control es una válvula que controla la cantidad de vapor que entra en la turbina en respuesta de la demanda de la unidad. Es normal para una de las válvulas principales de parada que contengan una válvula piloto diseñada para ser abierta en la puesta en marcha de la planta en contra de la presión inicial del vapor. Esta válvula piloto admite el vapor suficiente para iniciar el movimiento de la unidad y superar la rotación preventiva de la fuerza de fricción inicial. Esta válvula también proveerá de una cantidad de vapor suficiente para alcanzar la carga baja del generador. La válvula piloto es por lo tanto la primera candidata para sufrir erosión, ya que está sujeta a la mayor parte de las cargas iniciales del vapor que contiene escamas una vez entre en la unidad. Un ejemplo de esto aparece en las figuras 2.15

El método de arranque preferido cuando las escamas se encuentran presentes, la concentración es alta y las cargas son bajas (aproximadamente el 5%), se admite vapor a través del arco completo de admisión, esto supone que las válvulas de control operen en paralelo en lugar de secuencialmente, permitiendo una distribución más uniforme de las escamas a través del anillo de entrada completo.

La predisposición de las válvulas a ser dañadas es independiente de su geometría de diseño. No todas las válvulas sufren erosión, aunque tengan patrones de operación similares. Es difícil, por tanto, predecir la capacidad de erosión de una válvula en concreto como cambios pequeños relativos en la geometría que afecta a los patrones de flujo del vapor y por lo tanto en la distribución de las escamas tiene un efecto importante en los patrones de daño. La figura 2.15 muestra un vástago de la válvula piloto que ha estado operando durante dos años, mostrando patrones intolerantes de daño y pérdida de material.

Toberas del escalonamiento de control

Una vez el vapor ha pasado a través de la válvula de parada principal y el sistema de válvulas (incluyendo los filtros), entra en la cámara de vapor donde se requiere que gire relativos grandes ángulos, axiales y tangenciales, para alcanzar la entrada a las toberas del escalonamiento de control. Debido a la masa de las escamas transportadas, estas no se pueden acelerar alrededor del pleno de la entrada de la caja de toberas hasta la misma velocidad que el vapor, por lo tanto, tenderá a concentrarse hacia una región de la cámara, esto es, las escamas no se distribuirán alrededor del perímetro de las toberas servidos por las válvulas.

Este efecto se muestra en el diagrama de la figura 2.20. La primera válvula de las cuatro presentes en la admisión de vapor "1" (con entrada vertical de vapor). Aquí el vapor entrará y se repartirá por toda la circunferencia desde "u" hasta "v". Debido a que las escamas tienen una mayor masa, estas fluirán, predominantemente hacia la porción inferior "v". Por esta razón, la erosión incrementará en las partes de las toberas hacia la junta horizontal "HJ". La erosión será más grave en el segmento "1", que es el que se encuentra más cercano a la admisión de la unidad. Este contiene la válvula piloto y llevará la unidad del 5 hasta el 25% de la carga.

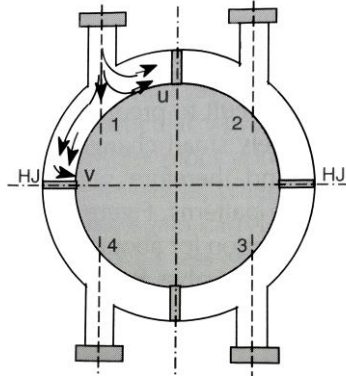


Figura 2.22 Flujo de las escamas por el arco de admisión parcial

La corona de álabes estacionarios

Después de pasar a través del escalonamiento de control, las partículas encontrarán una distribución uniforme alrededor de la circunferencia, por lo tanto, del diafragma del segundo y subsiguientes escalonamientos. Se anticipa que cualquier erosión será espaciada de forma uniforme alrededor de la circunferencia de la corona. La experiencia muestra que, en este caso, se tiene una menor variación debido a desigualdades en el flujo posibles introducidas por la cantidad de flujo de vapor con escamas atrapadas, a través de los pasos individuales; y la posibilidad de que los dilos de descarga individuales puedan tener una diferencia menor de espesor, particularmente después de la reparación y del revestido.

Se encuentra una excepción a estas observaciones del daño uniforme anteriormente mencionadas, siendo visible en estos escalonamientos que han sido empleados en la mayoría de las partes de los álabes para añadir mecanismos de dureza al diagrama y limitando y limitando su deflexión axial. La figura 2.23 muestra la sección a través de una corona de álabes estacionarios con la partición “s” y “t”. Si el vapor y las escamas entran de forma axial, no se encontrará diferencias en la cantidad de escamas que entran en por las entradas individuales. Sin embargo, si la escama entra con cierto ángulo ψ en la dirección tangencial, la distribución de las escamas no será uniforme. La figura 4.8.3 muestra un paso “K” que experimentará la ingesta de escamas igual a un paso tangencial. En el paso “L” se formarán pocas o ninguna escama, ya que está protegido en su mayoría por el álabes “t”. El paso “J” recibirá escamas del paso “J” y “H”. Las escamas que deberían entrar en “H” son desviadas hacia “J” y proporciona una protección similar al paso “H” al igual que el paso “L” por la partición “t”.

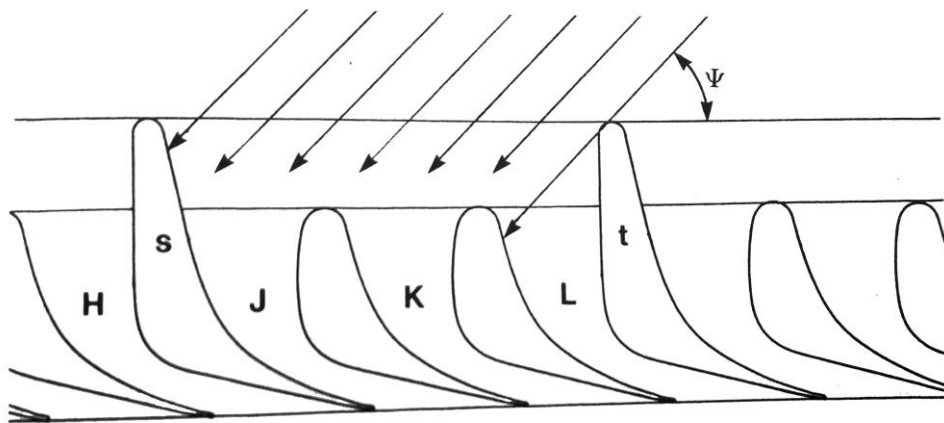


Figura 2.23 Efecto del ángulo de entrada

De hecho, este modelo es puramente teórico, con hipótesis infundadas. El patrón actual depende del ángulo de la entrada, que variará aleatoriamente en cada partícula. Sin embargo, el principio presentado puede ser observado del examen del diafragma con amplios álabes cuando son eliminados.

En la dirección radial, las escamas que entran en el diafragma se concentrarán hacia la sección exterior. Se observa normalmente más pérdida de material por erosión sobre la sección de la cabeza de los álabes como es mostrado en la figura 4.24.

Procedente de la entrada del álabes estacionario. En la sección previa se ha discutido la pérdida de material sufrida

por los álabes del diafragma. Además de este daño, ciertos escalonamientos sufrirán pérdida de material de la entrada del álabe, daño que tiende a concentrarse en los diámetros exteriores.

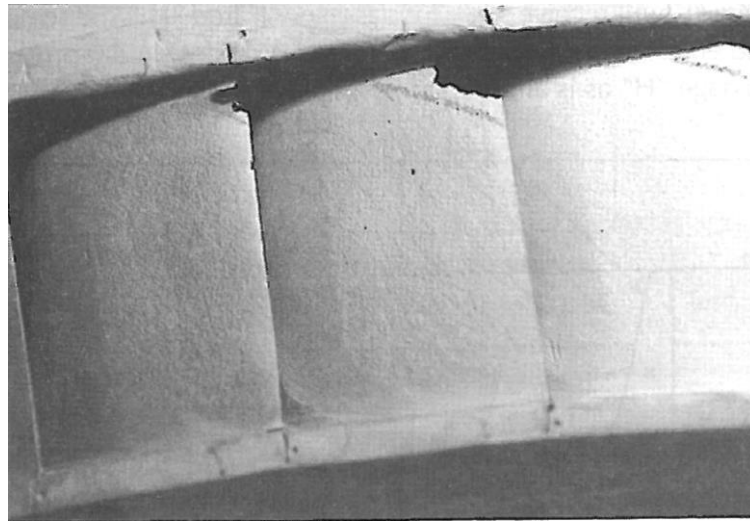


Figura 2.24 Erosión en la parte exterior de la corona estacionaria

Las escamas que entran en la corona de álabes estacionarios lo hacen a una velocidad relativamente bajas. Sin embargo, ya que el vapor tiene una velocidad baja en el punto “C2s” de la figura 2.17, que será capaz de acelerar la escama, que entra a una velocidad “C2e” (unido por el rebote de las escamas de la carcasa en direcciones aleatorias) y acelera hasta una velocidad y dirección aceptable. Estas escamas entrarán en el escalonamiento influenciadas en primer lugar por la dirección con la que entra en el hueco axial por delante del anillo de los álabes estacionarios. Estas escamas a relativa baja velocidad tenderán a concentrarse en el diámetro exterior.

Cuando aparece esta forma de corrosión no es normalmente grave debido a las bajas velocidades involucradas. Aunque este tipo de daño es improbable que cause daño, se debe corregir si presenta cierto progreso hasta cierta profundidad en la que se debilite la fuerza axial, y su capacidad para resistir la presión axial causando excesiva distorsión de la red interior.

Procedente del borde de estela de los álabes del estator

La pérdida de material que aparece en el borde de estela de los álabes por uno de los dos mecanismos distintos, o una combinación de los dos. Sin embargo, estas pérdidas son el resultado de la circulación de las escamas, o el impacto de estas con el material fino del borde. El mecanismo que afecta a cada borde de estela son en realidad función de las propiedades del material del álabe y su susceptibilidad al daño. Se encuentran dos modos de daño:

- Acción de raspado o desbaste que elimina material mediante abrasión.

Este proceso es relativamente lento, y elimina material a relaciones razonadamente uniformes como función de las puestas en marcha. Este tipo de pérdida de material se muestra en la figura 2.24. En la figura 2.25 se muestra una relación alta de pérdida de material, donde en la reparación, el material de relleno no ha ejercido la resistencia suficiente para aguantar la erosión por partícula sólida. Debido a que la densidad del flujo de las escamas es mayor en los diámetros exteriores, estas regiones tienen una relación mayor de eliminación de material que las partes interiores.

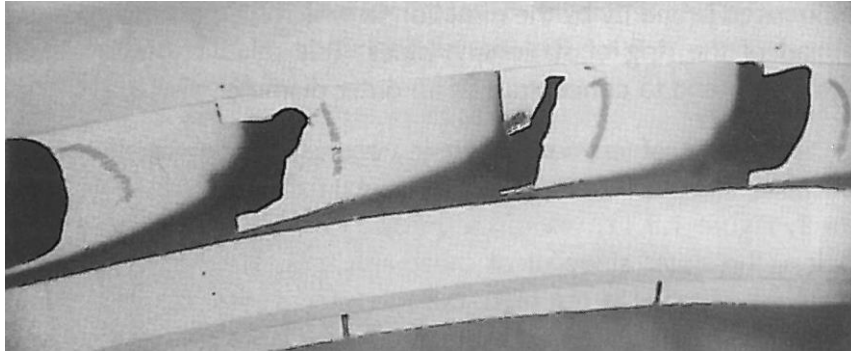


Figura 2.25 Pérdida de material de reparación del álabe

- Fractura de tipo frágil que aparece comúnmente en los álabes fabricados con acero austenítico.

Esta condición, en inglés conocida como “chipping”, puede acelerar la pérdida del borde de estela de los álabes, y puede aparecer rápidamente durante la operación de los componentes que posteriormente se erosionan debido a la acción de las partículas abrasivas. La figura 4.8.1 ilustra la pérdida parcial por las condiciones del corte. Este problema se resuelve con el uso de un borde de estela más estrecho (unos 10.12 cm).

Es imposible que este tipo de fallo sea causado por el debilitamiento inicial del borde de estela por abrasión, resultando en un cambio gradual de la sección. Estos cambios producidos en la frecuencia natural del álabe, introduce vibraciones que provocan la pérdida de pequeñas partes de material.

Para acero martensítico, el daño más comúnmente encontrado es el de raspado o abrasión. Debido a que la martensita es lo suficientemente dúctil puede absorber el efecto de los impactos sin acabar causando la rotura. Aunque se elimine el material del borde de estela, se producirá una frecuencia natural (que terminará causando el fallo), la ductilidad del material es suficiente en estos altos niveles de tensión que no son introducidos por el efecto de los impactos o la erosión. El material austenítico, sin embargo, es menos dúctil y representa niveles superiores de tensiones inducidas por el impacto. Terminará fallando por el efecto de los impactos repetidos. Los modos de fallos en los materiales austeníticos y martensíticos son capaces de ser reparados, sin embargo, el tipo de material para la soldadura y los requerimientos de alivio de tensiones serán diferentes.

Procedente de las paredes laterales de los álabes estacionarios. Las escamas tienen tendencia a entrar en las coronas de álabes estacionarias y móviles para migrar por la acción de las fuerzas centrífugas hacia los diámetros exteriores de la corona, donde pueden causar daños más importantes. La concentración de estas partículas en las regiones exteriores del flujo causaran daño de tipo raspado en las paredes laterales exteriores.

Esta área incrementará debido a que la pérdida de material de la pared lateral será relativamente pequeña, pero para escalonamientos con alturas radiales pequeñas puede ser un incremento importante del área de descarga total. También se permitirá el paso del vapor por encima de la sección de la cabeza, debido a que se ha eliminado parte de la llanta.

Corona de álabes del rotor

Cuando la unidad es examinada, las pérdidas de materiales más acentuadas aparecen en la parte de los álabes estacionarios de la unidad. Estos requieren atención inmediata. La reparación se puede realizar durante las paradas programadas, una vez se ha decidido donde se deben realizar las reparaciones. También será necesario determinar el grado y alcance de las operaciones de alivio del estrés que son requeridas.

Sin embargo, los álabes del rotor también sufren pérdida de material. Aunque no sufren el mismo nivel de pérdida que en la corona de álabes estacionarios, también pueden estar bajo riesgo debido al estrés inducido por el efecto de la rotación. Cuando un álabe sufre pérdida de material, necesitan ser monitorizados:

- Como una estimación de la relación de deterioro.
- El punto en el que será necesario la sustitución de los álabes.

Se encuentran tres áreas a examinar distinta, donde se puede producir el daño.

La sección de entrada de los álabes móviles. Las partículas descargadas desde la corona de álabes estacionarios, entra en esta corona con diferentes ángulos y velocidades, como se muestra en la figura 2.17, donde el impacto de las escamas elimina material en ciertos puntos del borde de ataque del álabe. Como se ha descrito con anterioridad, la concentración de partículas incrementa hacia la sección exterior de los álabes móviles. El efecto creciente de las pérdidas hacia la sección exterior se muestra en la figura 2.24. En términos de la eficiencia, el efecto principal del daño es la modificación del ángulo de entrada del álabe, decreciendo o eliminando el radio de entrada del borde de ataque y modificando por tanto el ángulo de entrada principal.

Estructuralmente, esta pérdida de material no supone una debilitación importante del álabe en las primeras instancias del fallo, pero a la larga serán debilitados y reemplazados en la medida de lo posible. Esta pérdida modificará la frecuencia natural de los álabes, pero no es considerado de mucha importancia.

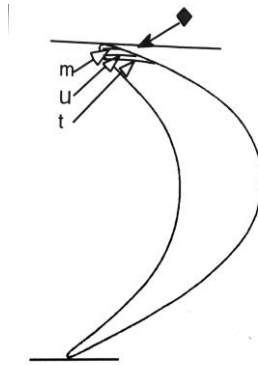


Figura 2.26 Variación de la sección del perfil

Excavado

Cuando se encuentra erosión por partículas sólidas en la corona de álabes del rotor, se recomienda examinar la parte de la cara de presión justamente por debajo de la cubierta. Muchos escalonamientos de alta presión y recalentamiento tienen cubiertas integrales, otras en cambio son unidas por remaches. Las escamas presentes en la corona de álabes del rotor son centrifugadas hasta la parte inferior de la cubierta donde causará abrasión en la cara de presión del álabe, y puede causar erosión en los tetones en el caso de que el álabe posea tetones para unir la cubierta al álabe.

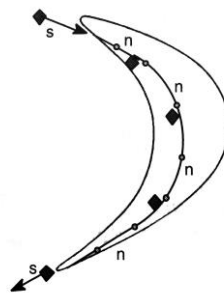


Figura 2.27 Representación del excavado

Este “rebaje” del cuerpo del álabe en la parte de la cabeza, justo por debajo de la cubierta se denomina excavado. La erosión del perfil reduce su sección, y podrá, en última instancia, debilitar la sección permitiendo en cierto modo que aparezca el fallo. La figura 2.27 muestra una representación de la sección de corte de un álabe con este problema. Se puede observar que se han producido sobre el álabe cargas de tensión centrífuga causadas por la cubierta, y una vez que la sección es reducida, incrementa la intensidad de la tensión. En la figura 2.28 se ha eliminado un álabe de un escalonamiento de alta presión con cubierta integral, que muestra “caving”. Esto tendrá poca influencia en la eficiencia del escalonamiento.

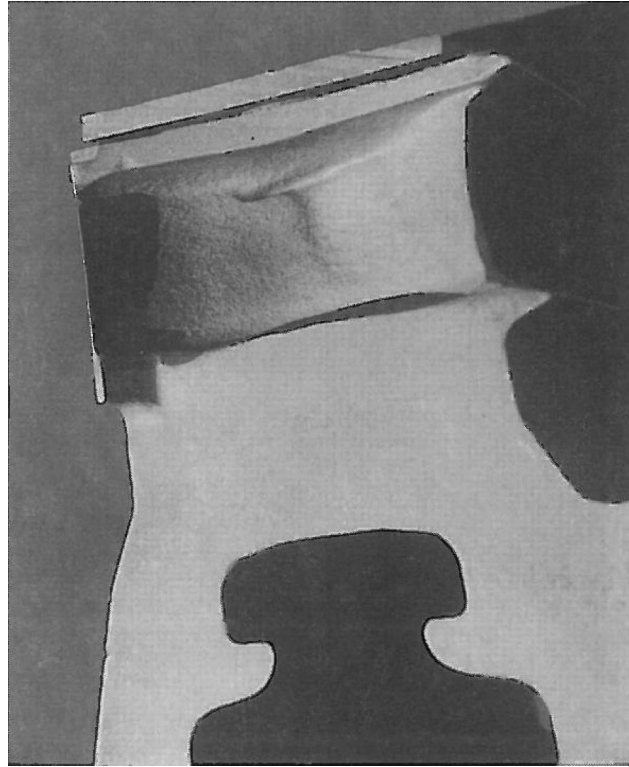


Figura 2.28 Excapado en la cara de presión de un álabe

Del borde de estela de la corona del rotor

Cuando aparece este tipo de daño, es un síntoma de cavitación y representa una extensión de la cavidad de la posición de máximas pérdidas hasta el borde de estela.

Esta pérdida de material causa la aparición de una región sensible a la tensión en la cabeza del álabe. Esto no se considera importante si el escalonamiento contiene una cubierta remachada, pero en este caso, tiene una mayor importancia la integridad del tetón en la superficie interior de la cubierta. Sin embargo, si la corona de álabes móviles contiene una cubierta integral que aplique cargas de tensión centrífugas en la sección de la cabeza del álabe, por lo tanto, deberá ser examinada en busca de pruebas de deterioro.

Componentes del escalonamiento

Debido a las escamas presentes en las coronas y el efecto de las fuerzas centrífugas sobre las escamas, una parte encontrará acceso a la parte interior de la superficie de la carcasa, las cubiertas, los tetones y los sellos. Cuando se dañan estos componentes, exhiben patrones de pérdida de material en el radio exterior. Este daño debe ser controlado y si es necesario corregirlo antes de que aparezcan daños irreparables o que solo puedan ser corregidos con un coste alto.

Se deben considerar los siguientes componentes de la corona de álabes del rotor:

Las cubiertas

Las figuras 2.18, 2.19 y 2.20 muestra como las escamas se transportan y pasan a por encima de la cubierta del vapor que fuga sobre la corona de álabes del rotor. Además, como se ha discutido en una sección anterior, la cantidad de vapor que fuga por encima de la cubierta es dependiente del área de fugas en la parte de los sellos. Así mismo, las escamas alcanzan la parte interior de la carcasa después de los impactos repetidos entre las coronas de los álabes estacionario y del rotor mostrados en la figura 2.19. Por lo tanto, debido a la presencia de escamas por encima del álabe, la capacidad para que aparezcan daños en estas regiones, y la capacidad del daño por el incremento del roce del sistema de sellado, aumentan con la operación continuada de la unidad. El mantenimiento del sellado es por lo tanto importante en los escalonamientos de entrada en la unidad.

Las escamas tienen la capacidad de causar erosión partículas sólidas en las cubiertas. Para que aparezca este tipo de daño, las escamas tienen que impactar en la superficie de la cubierta (antes o después de impacto con la carcasa) o el flujo que atraviesa la superficie con velocidades suficientes para causar pérdidas de material por

abrasión. La cabeza de los álabes se mueve a velocidades tangenciales lo suficientemente altas para causar pérdida de material por abrasión. Las escamas, como se muestra en la figura 2.18, entrarán en el espacio radial por encima de la cubierta a velocidades y ángulos diferentes. Por lo tanto, puede aparecer pérdida de material en muchas superficies dependiendo sobre todo de la sección de paso de la cubierta. Aunque las pérdidas de material aparecen en estas superficies, hasta la fecha no se ha demostrado que sea importante.

En las posiciones finales de las cubiertas, como se ilustra en la figura 2.29, la discontinuidad de la llanta incluye un espacio tangencial ("g") que permite el movimiento de la cubierta en el transitorio térmico. En muchos de estos diseños, es necesario eliminar parte del material para reducir el riesgo de que se ondule la cubierta. En estas partes que se han eliminado se encuentran daños como consecuencias del impacto de las escamas. Este daño no suele tener mucha importancia, por lo que no hace falta acción correctiva.

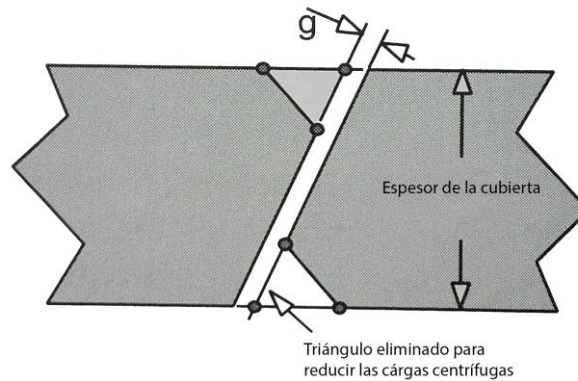


Figura 2.29 Cubierta susceptible de sufrir daños

Los tetones

Las escamas que son centrifugadas fuera de la corona de álabes estacionarios son transportadas hasta el hueco radial por encima de la cubierta, que causarán pérdida de material por erosión en los tetones de la superficie exterior de la cubierta. La figura 2.30 muestra la disposición de un tipo de tetón, indicando como la cubierta protege al tetón.

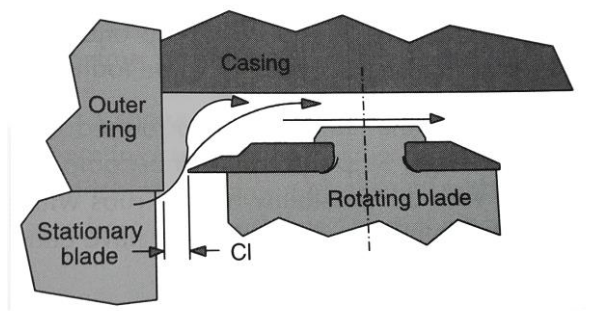


Figura 2.30 Paso de las escamas por encima del tetón

Si la pérdida de material de los tetones aparece en una corona que no tiene una cubierta integral, esta se puede asegurar soldando la cubierta. Si se aplica correctamente puede mejorar la dureza de la unión y permitir al rotor volver al funcionamiento.

El sistema de sellado radial. Este se muestra en las figuras 2.18, 2.19 y 2.20 donde se representa una barrera para el sistema de sellado. Ya que las escamas se mueven en la misma dirección que el vapor, esto también representa una barrera para el paso de las escamas por encima de la cubierta. Se podría esperar que los sellos sufran erosión, de hecho, los sellos tienden a permanecer intactos; sin embargo, hay ocasiones en las que aparece pérdida del material de los sellos. Esto suele ocurrir en forma de astillado y se encuentran piezas semicirculares.

La figura 2.31 muestra el sello radial alrededor del escalonamiento de alta temperatura del escalonamiento de control. El material se ha vuelto frágil debido a exposición prolongada con la posibilidad de roce débil en la cubierta. Los siguientes impactos de las escamas causarán una combinación de pérdida de material por raspado

y astillado.

Se encuentran regiones dentro de la entrada de los escalonamientos de alta presión y secciones de recalentamiento donde se puede perder material. Una gran parte de estas regiones dañadas afectarán en la eficiencia de la expansión y tienen la capacidad de causar daño mecánico que fuerza el funcionamiento de la unidad. Cuando se identifica el daño y las pérdidas de material se tiene la capacidad de comprometer el funcionamiento de forma importante, debe ser monitorizado y se deben tomar las decisiones oportunas para modificar o sustituir las partes afectadas antes de que provoquen fallos más graves.

La figura 2.31 muestra el sello radial por encima del escalonamiento de control de una unidad con una temperatura de entrada del vapor de 538 C, donde se ha encontrado pérdida de material debido a la combinación de la fragilización y los impactos continuos de las escamas provenientes de la caldera.

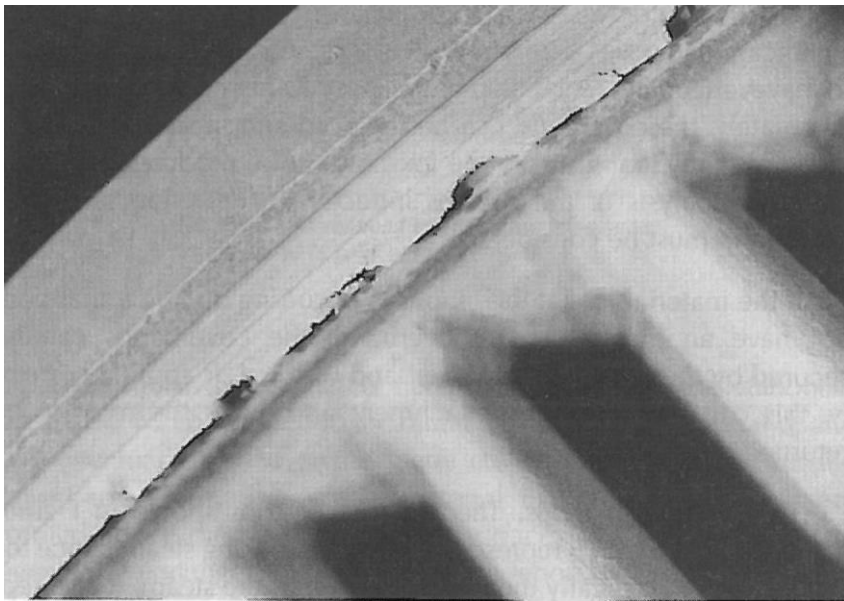


Figura 2.31 Sello de estanqueidad radial de un escalonamiento de control

2.4.2. Influencia de la erosión por partículas sólidas en el funcionamiento del escalonamiento

Las capacidades de causar daño de la erosión en la fiabilidad de varios componentes del paso del vapor se han descrito con anterioridad. También puede afectar a la eficiencia del escalonamiento.

Efecto del cambio del área

La pérdida de material de los álabes estacionarios y móviles puede tener efecto en la eficiencia del escalonamiento debido a la modificación de la forma del álabe y el área de descarga.

Pérdida de material del álabe

Una vez el material ha sido eliminado del borde de estela de los álabes del estator y del rotor, el paso formado entre los álabes cambia, por tanto, como los álabes son convergentes, se modificará el área de descarga y cambiará la presión de descarga. La caída de entalpía del escalonamiento cambia la relación de velocidad “Rho”.

Perdida de material de las paredes laterales

La pérdida de material de las paredes laterales tiene efecto sobre las paredes laterales de la tobera formada por los álabes. Eliminando el material de estas partes, el vapor será descargado con un diámetro mayor y dependiendo de la llanta, se puede dirigir hacia la carcasa para pasar por encima de la cubierta. Las ranuras formadas en las paredes laterales exteriores fomentarán que las escamas fluyan en la medida de lo posible causando la erosión del sistema de sellado alrededor de la cabeza del álabe.

Ángulos de descarga del vapor

La pérdida de material del borde de estela de las coronas del álabe modifica el efecto de ángulos de descarga del

vapor. Esta modificación hace que el vapor entre en la siguiente corona de álabes con un ángulo para el que el álabe no estaba diseñado, por lo que se encontrará una pérdida de la incidencia y una reducción de la eficiencia del escalonamiento.

Incremento del área y presión loca

Una vez se elimina material de la descarga del álabe, la distribución de presiones a través de la unidad es modificada. La presión en varios escalonamientos es alterada, como los que tienen vapor disponible para la extracción, calor de alimentación regenerativo y otros requerimientos del ciclo. Esto afectará al funcionamiento del ciclo y por lo tanto a la relación de calor de la unidad.

Escalonamientos de enfriamiento

Hay algunos diseños de doble flujo en las secciones de las turbinas donde se tiene una pequeña diferencia de presiones desde el flujo final de la descarga de la turbina hasta el flujo final del generador en los primeros escalonamientos. Esto se hace para proteger el rotor del sobrecalentamiento a través del fomento del enfriamiento del flujo de vapor desde un final hasta el otro. Se pretende que este flujo de vapor transporte el vapor fuera del material del rotor, este calor es generado por fricción del vapor en las cámaras o espacios muertos que existen entre los dos flujos.

Una vez el área de descarga cambia debido a la erosión es posible que este flujo cese y por lo tanto el vapor generado en estos espacios muertos caliente el rotor, cambiando las propiedades de sus materiales, con la consecuencia de que el rotor mantendrá ciertos niveles de daño reduciendo la vida de la operación.

2.4.3. Roce entre los componentes del paso del vapor

Los espacios axiales y radiales del paso del vapor se suelen mantener con tolerancias estrechas con la intención de minimizar la cantidad de vapor que fuga por los escalonamientos o sale del paso del vapor por el sistema de sellado. Debido a estas tolerancias estrechas y las inevitables perturbaciones del sistema que causan la vibración de los ejes y otros transitorios, estas situaciones favorecerán que se cree contacto entre las partes estacionarias y móviles de la unidad mientras se encuentra a velocidades operacionales. Cuando este tipo de contacto aparece fricción entre los componentes. Este contacto, o fricción causa un exceso de calentamiento. Los componentes del paso del vapor se encuentran inmersos en fluido de trabajo, así que cuando el aumento de la temperatura debido a la fricción es demasiado alto son enfriados.

Este tipo de enfriado puede introducir cambios complejos en la estructura del material y si la fricción es fuerte y prolongada, se puede depositar material de un componente al otro.

El calor generado por la fricción entre los componentes representa la destrucción de una parte de la energía disponible por los componentes que rotan. Sin embargo, el vapor seguirá expandiéndose a través de los álabes, incluso si han cesado las condiciones que causan la fricción y la unidad se ha desconectado del sistema. Desafortunadamente, surgen muchas situaciones en las que la unidad continúa admitiendo vapor en la unidad a menos que la situación produzca una auto protección contra la fricción, esta continuará, causando daños irreparables.

Pueden aparecer condiciones en las que se genere suficiente calor por fricción para que la temperatura del metal de los componentes móviles aumente por encima de la temperatura austenítica. El material es después enfriado. Debido a que este calentamiento y enfriamiento aparecen de forma simultánea, el cambio en la estructura del material tiende a aparecer en la superficie del componente. Sin embargo, la profundidad final del cambio de estructura dependerá del calor generado (la presión del roce), y del tiempo que permanece en estas condiciones. Sin embargo, la fricción, si es persistente formará una ranura en el rotor causando pequeños cambios en la superficie del material.

En muchos de los diseños que se pueden encontrar, los cierres se producen de forma integrar con las partes móviles y estacionarias. Se pretende que estos cierres proporcionen sello radial o axial. Este tipo de cierre son dimensionado de forma que, si aparece fricción, aumentan el hueco. Mientras que esto representa una pérdida de eficiencia, no se causará endurecimiento de los materiales de los componentes importantes, por lo que el daño será menor.

Otras situaciones en las que se producen roce pueden aparecer por el contacto de material desprendido, que puede ser generado por una gran variedad de fuentes, por ejemplo, aquellas partes del paso del vapor que se han desprendido u otros componentes más importantes. Este material puede ser dejado durante las paradas, donde

de alguna forma puedan llegar a alguna posición donde se cause el roce. Esta acción no causa daños importantes en la carcasa debido a que el escalonamiento no tiene sellos radiales.

Varios tipos de daños pueden aparecer como consecuencia del roce en la unidad, esto puede afectar a varios componentes del paso del vapor. El tipo de daño se discute a continuación.

Fricción en el rotor

La fricción del rotor es provocada normalmente como consecuencia de las altas vibraciones que aparecen en las puestas en marcha y en las paradas, durante los transitorios de sobre velocidades, o cuando un fallo importante aparece en la unidad causando desequilibrio dinámico. La fricción puede aparecer como consecuencia del “humping” de la carcasa. Esto sucede si el sistema se para y se eleva el calor de la carcasa, causando que la mitad superior se encuentra a una temperatura mayor que la mitad inferior. Si esto aparece, cualquier esfuerzo prematuro de iniciar la unidad causará roce entre el rotor y la parte inferior de la carcasa. De hecho, cualquier condición que cause una diferencia de temperaturas entre las mitades superior e inferior de la carcasa tiene la capacidad de causar daños.

La figura 2.32 muestra una parte de la corona de álabes en la que la carcasa se ha encorbado debido a que el aislamiento inferior ha sido eliminado, causando un enfriamiento rápido de la mitad inferior y la deflexión hacia arriba. En este caso, los álabes móviles han tenido contacto con la parte inferior de la carcasa, donde se han deformado.



Figura 2.32 Deformación tangencial del álabe debido al roce intenso

Desafortunadamente, se encuentran ocasiones, que aun infrecuentes, cuando aparecen fricciones intensas en el rotor, permitiendo la curvatura del cuerpo central del rotor. Esta situación debe ser corregida antes de que la unidad vuelva al servicio, de lo contrario sería imposible o extremadamente difícil balancearlo, y el alineamiento radial del paso de vapor sea destruido. Situaciones típicas en las que se producen este tipo de fricción son:

- Ingesta de agua: cuando una parte del rotor se enfría, causando un cambio en la estructura del material, produciendo la curvatura en el cuerpo del rotor.
- La pérdida de una parte importante de la masa del rotor, como el fallo de uno o más álabes largos: estas pérdidas de masa producen desbalance dinámico, que puede inducir fricción fuerte entre el rotor y la parte estacionaria.
- El desbalance y las vibraciones fuertes con grandes deflexiones del rotor en los arranques y por debajo de la primera velocidad crítica: si se realizan esfuerzos para incrementar la velocidad cuando estas condiciones existen, la amplitud de la vibración incrementará, agravando la situación, y causando fricciones intensas y arqueado permanente.

Cuando se provoca arqueado permanente en el rotor, es a menudo ajustar el balance por la adhesión o eliminación

de material para balancearlo. Bajo estas circunstancias es necesario considerar el enderezado de la unidad. También será necesario cuantificar la cantidad de la curvatura para proporcionar alguna indicación del grado y la media a corregir que será más efectiva.

Muchos de los rotores sufren rozaduras leves entre los componentes del sistema de sellado, que son raramente causa de preocupación y para todos los sistemas de seguridad de la unidad son ignorados. Esta fricción puede ser ocasionalmente más grave en la región de sellado, aquí, no es importante en términos de la modificación del material del rotor debido a la sección fina de los sellos.

Fricción en los álabes del rotor

Hay situaciones en las que el cuerpo de los álabes y los bloques de la raíz se encontrarán sujetos a roces graves contra los elementos estacionarios. Este es un caso particular cuando aparece la pérdida de los cojinetes de sustentación y se encuentran presente grandes movimientos axiales del rotor.

Un fallo similar, debido al fallo de los cojinetes de sustentación, se muestra en los álabes de la figura 2.33, donde se muestra desde la parte trasera, que la cubierta ha sido deformada. En este caso, se ha encontrado un daño importante en los sellos radiales fabricados íntegramente con la cubierta.

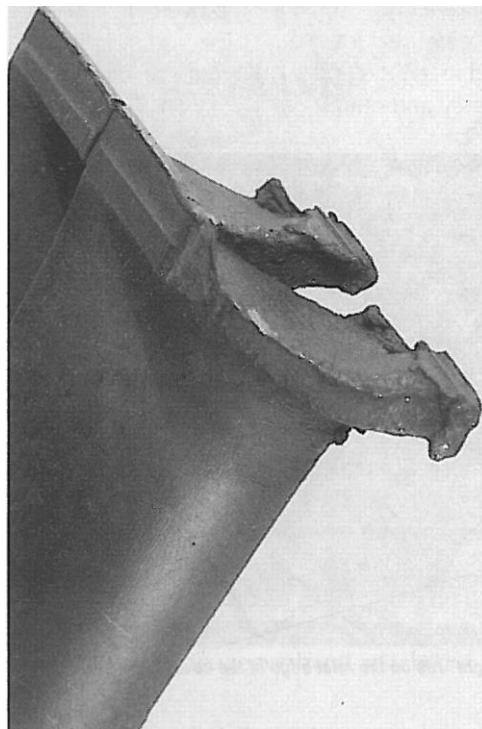


Figura 2.33 Fricción de la cubierta integral del álabe

Esta forma de roce axial aparece si la unidad es enfriada o calentada demasiado rápidamente, con una diferencia importante en la relación de expansión axial entre los componentes móviles y estacionarios de la unidad. Este calor generado por la fricción es parcialmente disipado a través de varios componentes que tienen contacto, pero principalmente disipado por el vapor. Este efecto aparece si la fricción es sostenida durante largos periodos de tiempo. Sin embargo, una vez los componentes son enfriados, esta acción introduce dureza y fragilidad en el material. Debido a que los álabes móviles están sujetos a altos niveles de tensión directa y oscilante, el incremento de la fragilidad del material tiene una alta probabilidad de introducir grietas en los álabes que pueden causar futuros fallos.

Fricción de la cubierta

En la mayoría de los escalonamientos, las cubiertas son diseñadas con espacios axiales y radiales pequeños, particularmente aquellos que se encuentra en las regiones de alta presión y temperatura de la unidad. Por lo tanto, los álabes que se encuentran en estas zonas son susceptibles al daño de las condiciones transitorias que afectan a estos espacios por el movimiento relativo entre las partes móviles y estacionarias, si se inician estas temperaturas o vibraciones. La fricción puede destruir los huecos axiales, incrementando las fugas y consecuentemente empeorando la eficiencia.

Una fricción más grave aparece en la dirección radial que aparece en la figura 2.34. Aquí, el transitorio del sistema ha causado que la cubierta friccione contra los sellos que han sido fabricados de acero al cromo endurecido. El roce produce unas huellas profundas en el borde de descarga de la cubierta y producirá un aumento importante del calor, una vez la cubierta se ha endurecido, se hace más frágil y acaba fallando en ese borde. Aunque este tipo de daño puede ser tolerado, se puede reconocer que la cubierta (o una parte grande de ella) se puede desprender y causar daños en los componentes aguas abajo.

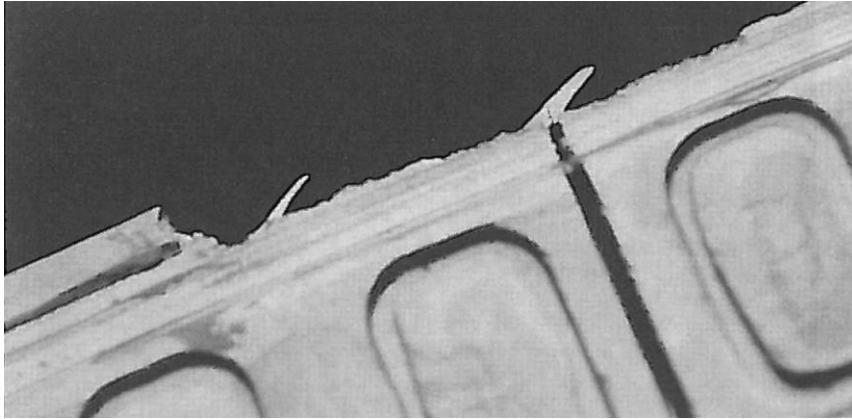


Figura 2.34 Fallo de la cubierta debido a las altas temperaturas alcanzadas por la fricción

Fricción en los álabes del diafragma

Cualquier tipo de fricción que aparece entre las coronas de álabes estacionarios y móviles tienen la capacidad de causar daño el cualquiera de las coronas. Este tipo de daño fue discutido y mostrado en la figura 2.35. La entrada del diafragma muestra una pieza larga de un material desconocido, generado en el paso del vapor, que ha sido atrapado en la entrada de la corona de álabes estacionarios en el paso de vapor, con evidencias de fricción intensa de estos residuos atrapados.



Figura 2.35 Daño por fricción causado por un objeto desconocido

Cuando este tipo de fricción aparece, la entrada del álabe es destruida. Debido a esto, se produce una interrupción del flujo de entrada una separación de la capa límite, y, por lo tanto, una pérdida importante de energía en el escalonamiento.

Fricción en el soporte del rotor del diafragma.

La fricción al mantener contacto entre las partes móviles y estacionarias de la unidad puede afectar al diafragma causando futuras distorsiones. Para que el diafragma sea dañado, la fricción debe aparecer en el interior de este y debe ejercerse una elevada presión axial. Un daño más importante aparecerá en los álabes móviles. La acción correctiva para el diafragma requiere la renovación para recuperar el paso del vapor. Pueden aparecer dos tipos diferentes de distorsión:

- El diafragma se expandirá fuera de los álabes en los que aparece la fricción.

El movimiento será mayor en el diámetro interior adyacente al rotor, y la aparición de la fricción puede aparecer en cualquier dirección radia en el diafragma, dependiendo de la geometría del escalonamiento,

y la fatiga térmica que puede aparecer durante la operación de la unidad.

El diafragma se encorvará, las mitades superior e inferior se abrirán o cerrarán en la junta horizontal, modificando el alineamiento del paso del vapor.

Fricción de la superficie interior de la carcasa.

La superficie interior de la carcasa puede sufrir fricción bajo ciertas condiciones de operación, incluyendo las vibraciones intensas durante el transitorio de sobre velocidad, y posiblemente cuando se joroba la carcasa.

Esto no es tan serio como la mayoría de las fricciones que aparecen en la unidad, sin embargo, si esta fricción es continuada, puede aparecer cierto grado de distorsión en la carcasa. Pero otra vez, la cantidad es pequeña y en la mayoría de los casos puede ser ignorada. Pueden surgir situaciones en las que se requiera cierto grado de corrección, aunque los componentes móviles son los que sufren daños más graves. Las causas posibles de este tipo de fricción son:

- Sobre velocidad excesiva. La parte del rotor de la unidad crece radialmente debido a los efectos de las cargas centrífugas que causan contacto radial.
- Niveles altos de vibración de la unidad, causando contacto radial. Si aparecen este tipo de condiciones, aunque la unidad atraviese condiciones críticas durante el arranque o las paradas, suelen durar poco tiempo y el daño causado es mínimo.
- Cuando la carcasa se deforma o distorsiona (de forma elíptica). Esto puede consumir el espacio radial por encima de la cabeza de los álabes.

No es común para la fricción axial aparecer en la superficie interior de la carcasa, pero se debe examinar cada unidad por su geometría particular, en los escalonamientos diseñados, y cuando el escalonamiento es abierto durante las paradas. Esta revisión se debe tomar durante el diseño para determinar si este tipo de problemas puede aparecer.

El que aparezca este tipo de fricción depende del diseño del espacio axial por encima del álabe y la forma de la cubierta. Es posible para la distorsión de la carcasa influenciar en el espacio radial, y esto necesitará ser monitorizado conforme la unidad vaya envejeciendo. Es normal que cuando aparezca la fricción, la parte del rotor sostenga daños importantes en la carcasa, que, aunque sufran pérdida de material no sufrirá daños importantes. En la figura 2.36 aparece una fricción leve de los álabes con cubierta en la superficie interior de la carcasa, donde los agujeros de extracción de vapor para la alimentación del vapor pueden ser identificados. Esta fricción no ha sido lo suficientemente grave para causar la distorsión de la carcasa, por lo que no se requieren acciones correctivas.

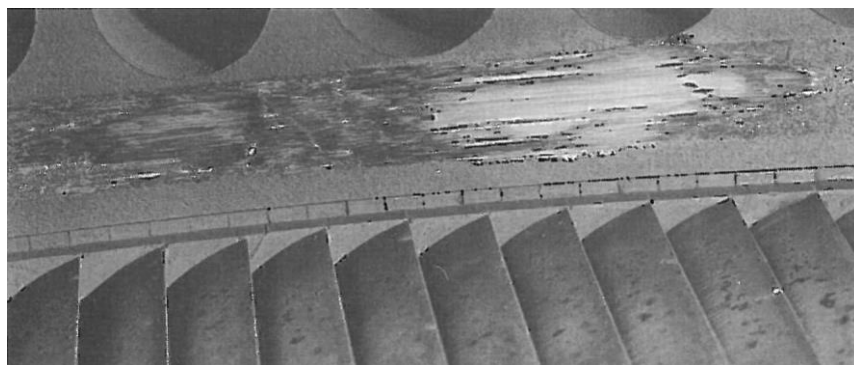


Figura 2.36 Roce sobre la superficie interior de la carcasa

2.6. Corrosión por fricción

Este tipo de corrosión con la subsiguiente fátiga por contacto puede aparecer cuando existe la capacidad para el movimiento relativo entre dos superficies unidas mediante ajuste. Este movimiento puede ser repetido en contacto de alta frecuencia entre las superficies o deslizarse repetidamente a alta frecuencia de una superficie con respecto a la otra. Este golpeo o movimiento de deslizamiento induce altas temperaturas en la zona de

impacto o de fricción, teniéndose como resultado la oxidación en los puntos donde se tiene la temperatura más alta, temperatura que puede convertir el acero en óxido de hierro. Este tipo de daño no es común en los escalonamientos de la turbina, pero cuando aparece, es capaz de acabar en fallos importantes. El daño causado es normalmente en forma de picadura u otro mecanismo discontinuo sobre la superficie del material, produciendo la concentración de tensiones y el inicio del fallo por fatiga a alto ciclo.

Este tipo de corrosión es un mecanismo que induce el fallo sobre superficies que han perdido material, pero no depende de la presencia de agentes corrosivos, por lo tanto, es un tipo de daño bastante distinto.

El rápido y repetitivo movimiento que induce el contacto es normalmente producido por movimientos que producidos por la fatiga de ciclo alto. Por lo tanto, cuando aparece corrosión por contacto en la turbina de vapor, este puede ser precedido de fatiga de ciclo alto. Por lo tanto, cuando aparece corrosión por contacto en el paso del vapor, puede también encontrarse fallo por fatiga de alto ciclo. El contacto aparece en superficies en constante movimiento repetitivo, no movimiento continuo.

Dos mecanismos que causan este tipo de mecanismo de oxidación son el desgaste por oxidación y las teorías de oxidación por desgaste. La diferencia es la fusión inicial fría entre las partículas desgarradas del material de la superficie y produciendo calor, o el calor producido por el efecto de la fricción e introduciendo oxidación. La diferencia es cuestionable por los ingenieros, aquellos que concierne el daño que causa, la profundidad de la picadura que se forma y su capacidad para causar fallos importantes.

El proceso de contacto depende del movimiento relativo de una superficie metálica con respecto a otra con la que mantiene contacto (impacto o deslizamiento repetido), y contacto bajo alta presión entre ellas. Las consecuencias de este movimiento es producto del excesivo calentamiento superficial y la transformación en óxido de hierro. Estas condiciones pueden existir a través del paso del vapor, por lo que se debe de anticipar la detección de este tipo de fallos.

La construcción del paso del vapor de la turbina puede producir un gran número de huecos donde puede ocurrir el contacto. Muchos de estos pueden ser eliminados por el control de las tolerancias de fabricación, sin embargo, pueden existir como consecuencia de las condiciones de operación más allá del control de los ingenieros. Las regiones más afectadas por este fenómeno son las siguientes.

Contacto del alambre antivibración con el agujero.

Para que aparezca el contacto ente estos elementos, es necesaria la presencia de altas presiones localizadas en el contacto entre el alambre antivibración y la parte interior del agujero, una condición que aparece cuando hay un desalineamiento entre el alambre y el agujero. La figura 2.37 es la representación de estas condiciones, en las que la mitad del álabe sufre desalineamiento y el álabe se ha torcido para permitir la penetración del alambre.

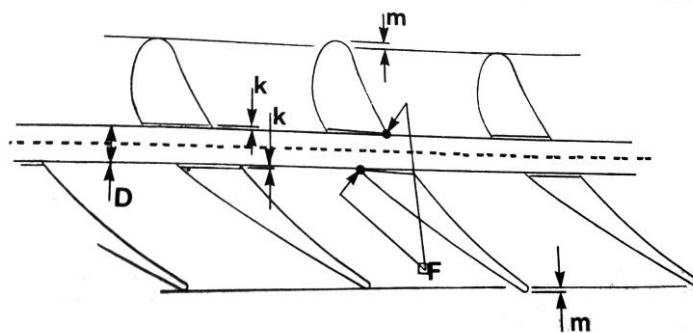


Figura 2.37 Desalineamiento entre el agujero y el alambre antivibración

Con estas nuevas condiciones, la distancia radial “k” será consumida, requiriendo un giro del álabe para permitir que el alambre sea ensamblado. Consecuentemente se encontrará un contacto de alta presión en los dos puntos de contacto “F” y el álabe se distorsionará de los bordes de ataque y estela una distancia “m”, que no será necesariamente el mismo en los dos bordes. Con este tipo de diseño, dependiendo de la presión centrífuga para mantener el contacto del alambre y el álabe, existe la posibilidad deslizamiento repetitivo bajo la acción de las fuerzas vibratorias del vapor. Este tipo de deslizamiento es particularmente evidente solo cuando se tienen pequeñas áreas de contacto, por ejemplo, aparece cuando el álabe es retorcido y el contacto que se tiene es puntual. Este roce proporciona las condiciones para que sean inducidos el contacto y las grietas.

Un ejemplo de rozamiento que no a concluido en fallo se muestra en la figura 2.38. Aquí, un pobre alineamiento del alambre y el álabe un mayor desalineamiento hasta un excesivo desgaste del álabe, como se puede ver en el cuerpo de los dos álabes. La pérdida de material que ha causado que el agujero entre en la dirección axial en las direcciones opuestas del agujero. El pobre alineamiento radial de los álabes puede ser medido de la revisión de la variación del paso en la imagen.

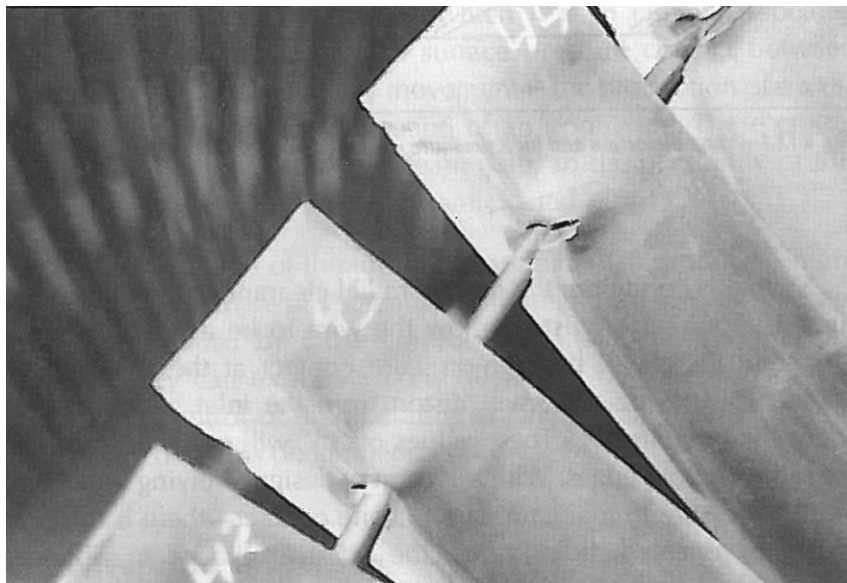


Figura 2.38 Agujero del alambre deformado por el contacto.

Aunque el fallo no ha aparecido en el momento de esta revisión, se puede deducir que ha sido reparado, por el uso de tres casquillos entre los álabes.

Contacto en los cierres de la cubierta.

En algunos diseños, la cubierta se produce de forma integral con los álabes y montados en el rotor. En este tipo de casos, se encuentran en contacto con las caras tangenciales de la cubierta. Para disuadir el desarrollo de la corrosión por contacto, estas superficies deben permanecer en contacto lo suficientemente duro para que el movimiento relativo no sea posible.

Estos segmentos de la cubierta deben tener el suficiente contacto de presión en la superficie para ayudar a asegurar el desarrollo de las fuerzas de vibración en los álabes no es suficiente para que aparezca el roce.

Una particularidad del diseño que se usa en coronas con cubierta integral es el concepto de “pre-giro”. Este tipo de álabe es fabricado con ángulos de cuña en la raíz y la cubierta algo distintos, el necesario para provocar un pequeño “pre-giro” y contacto duro en la superficie en la cubierta. Muchas de estas coronas de álabes se encuentran en servicio tienen las fuerzas suficientes desarrolladas entre ellos que el movimiento no es posible. Sin embargo, las coronas que no han sido cargada previamente pueden sufrir este tipo de daño.

Contacto en las superficies de la raíz de los álabes.

La función principal de la raíz del álabe es transferir carga desde el álabe al rotor. El área de transferencia de carga está sujeta a la carga que pueden producir el roce si no son dispuestos en el rotor de forma que el movimiento relativo no sea posible, esto es, se encuentra una presión elevada que es proporcionada por las cargas centrífugas y la torsión y se encuentran cargas cíclicas con la capacidad para proporcionar movimiento constante repetitivo.

Por lo tanto, el roce aparecerá si los álabes son dispuestos en el rotor de forma que a ciertas cargas y temperaturas pueda aparecer este movimiento, y la carga cíclica sea de una magnitud suficiente. La figura 2.39 muestra la superficie de la raíz con grietas desarrolladas por el roce a través de la cara de contacto.

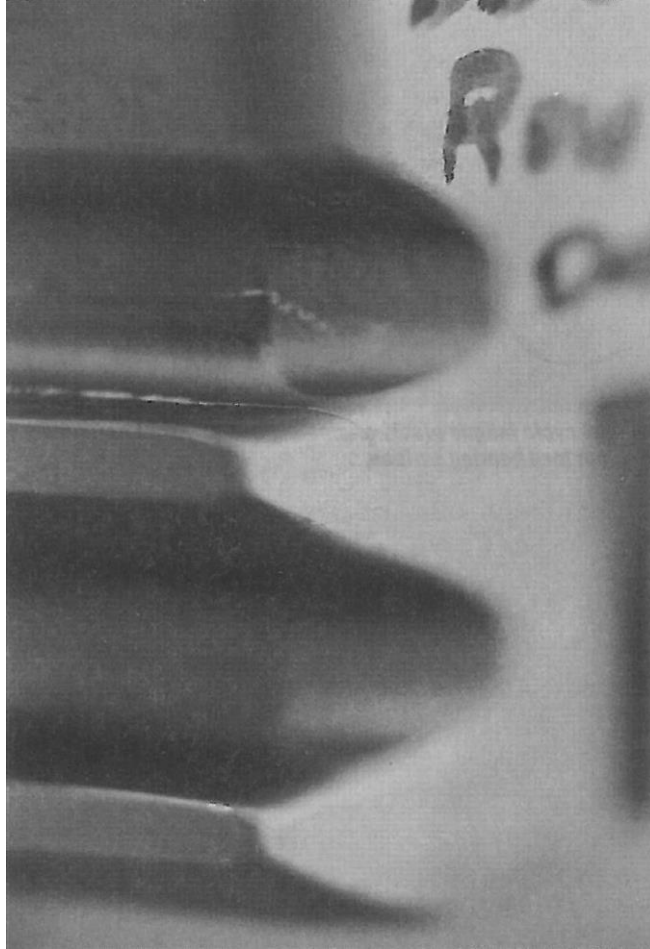


Figura 2.39 Gritas causadas por la fricción de la raíz del álabe con el bloque

Contacto en las superficies de contacto de la raíz.

Las cargas cíclicas que pueden producir contacto en las superficies de apoyo pueden producir la misma forma de daño en la superficie con el contacto con el álabe adyacente (álabes cargas altas de superficie de contacto). Esto es más común en las raíces de entrada tangencial, en las que son ajustadas en el rotor y requieren un ajuste especial para cerrar los álabes en la corona.

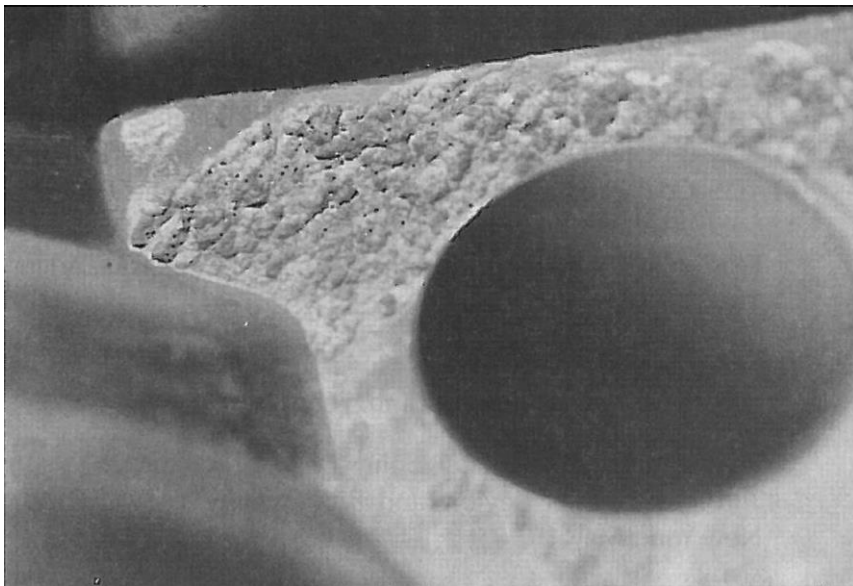


Figura 2.40 Daño por fricción sobre la cara vertical del bloque

Si los álabes son inicialmente ajustados holgados, o adquieren la holgura durante la operación, puede aparecer la fricción. Las coronas con cargas altas repetitivas (por ejemplo, el escalonamiento de control), son particularmente susceptibles a este tipo de daño. La figura 2.40 muestra este tipo de daño.

3 DAÑO DEL PASO DE VAPOR DEBIDO A LA DEGRADACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

3.1 Introducción

En la mayoría de los componentes del paso de vapor de la turbina, diferentes tipos de cargas dinámicas y mecánicas introducen tensiones mecánicas. Además, muchos de los componentes que operan bajo altos niveles de tensiones lo hacen también a elevadas temperaturas que cuando son razonablemente constantes y bajo ciertas condiciones cambiarán las relaciones con las que son capaces de producirse cambios en el material.

Bajo estas condiciones de carga, temperatura y variación de la temperatura, estos componentes son, o pueden encontrarse sujetos a varias formas de degradación de las propiedades del material. El diseño evalúa estas condiciones y pretende definir los componentes de forma individual para que se ajusten al a operación con tensiones inducidas por las condiciones de la operación, permitiéndolos soportarlas durante la vida de la unidad.

Sin embargo, este fenómeno es capaz de producir daños en los componentes hasta que aparezca el fallo. Las circunstancias pueden aparecer durante la operación, cuando se dan circunstancias donde la unidad se encuentra en condiciones por encima de sus límites de diseño. Estas, representan condiciones bajo las que la tensión es provocada por encima de los esperado. De forma similar, se pueden introducir propiedades de los materiales inferiores a las especificaciones de diseño. Aunque el fallo no será instantáneo, el daño se acumula forzando finalmente el funcionamiento de la unidad requiriendo una acción correctiva, inmediata o en futuras paradas.

Las turbinas de vapor se diseñan para que se mantenga su operación durante largos periodos de tiempo, normalmente ente seis y ocho años antes de una parada importante. Por lo tanto, las partes internas de la unidad, incluyendo las secciones calientes, no podrán ser evaluadas y corregidas durante estos periodos.

La degradación del material principal que puede afectar a los componentes del paso del vapor incluye la fluencia a alta temperatura y la fluencia a ciclos altos, que serán considerados en este capítulo.

3.2 Fluencia

3.2.1 Estructura del material.

Cuando el metal fundido realiza el cambio de fase del líquido al sólido, se consolida una distribución aleatoria de los núcleos una vez se alcanza el eutéctico. Estos núcleos crecen debido a la adhesión de otros átomos de metal puro a una matriz repetitiva. El número de núcleos que se forma en el metal fundido, así como el tamaño de los granos que crecen, dependen de la duración del enfriamiento. Si se enfría el metal de forma más lenta, se tienen más oportunidades para que los núcleos puedan crecer formando cristales.

Debido a que el enfriamiento se realiza de forma desigual, la formación inicial de núcleos aparece hacia el límite exterior, donde la temperatura desciende por pérdida de calor. Este proceso continúa hasta que el líquido se ha transformado en sólido por completo. La formación de los núcleos es aleatoria, así como la orientación y el crecimiento de los cristales individuales.

Debido a esta naturaleza aleatoria, en el sólido existirán cristales de aleación, con límites que rellenan la superficie entre los cristales. Este límite de grano representa una discontinuidad estructural que contiene impurezas de elementos y componentes presentes, pero que no son absorbidos por cristales individuales, además de elementos que no han sido capaces de ser eliminados del fundido original. Este material en el límite puede ser enriquecido o empobrecido por alguno de los elementos de la aleación, y por lo tanto tiene la capacidad de influenciar las propiedades físicas del material.

La fundición más utilizada para fabricar los componentes de la turbina posee dos características distintas, aquellos que son cristales puros metálicos y aquellos materiales presentes en los límites de grano. Para los componentes producidos por métodos modernos, la característica del límite de grano puede ser predicha y controlada. Este material en el límite puede proporcionar propiedades aceptables e incluso ventajosas para las propiedades totales.

3.2.2 Fluencia a alta temperatura

La fluencia es un fenómeno que aparece en el material presente en las regiones de alta temperatura del paso del vapor en los componentes expuestos a tracción o tensión de cizallamiento. De una forma más exacta, la fluencia se define como fluencia a alta temperatura, debido a que, aunque el material se puede encontrar bajo la tensión de la fluencia en cualquier temperatura, es solo en las temperaturas más altas en las que la deflexión, y finalmente la rotura debido a la tensión se hace importante. Es necesario reconocer que cuanto más alta sea la temperatura del componente, más rápido aparece la deflexión por la fluencia y más rápido aparece el fallo.

En el proceso de diseño se deben prever las zonas del paso del vapor que son más sensibles a la aparición de fluencia. Una vez se han identificado estas zonas, se evaluará el material, las dimensiones y otras características necesarias del componente susceptible de sufrir fluencia para establecer unos valores tolerables durante la operación. Sin embargo, es necesario considerar que la unidad puede operar por encima de las tolerancias de diseño. Bajo estas situaciones, la fluencia y la deflexión total puede aparecer por encima de los límites establecidos.

Para los componentes afectados por la fluencia, y para los que la deformación es importante, es necesario considerar las tensiones (unidireccional o multidireccional) y que son aplicadas durante largos periodos de tiempo. La tensión de la fluencia resultante puede aparecer con diferentes relaciones de variación, y es normal, por definición, dividido en fases primaria, secundaria y terciaria, esto significa que la relación de fluencia no es constante, varía con el tiempo. La fase primaria es rápida, pero una vez la fluencia entra en la segunda fase, la deformación es más lenta hasta casi valores constantes antes de que se acelere hasta el fallo en la fase terciaria. Sin embargo, en la mayoría de los casos en el paso de vapor, la presencia de fluencia se identifica de forma efectiva antes de que el daño provoque la rotura.

Para que aparezca una deformación importante en el paso de vapor de la turbina, no es necesario que aparezca la rotura o incluso que hayan aparecido grietas. Esto es debido a que en muchas posiciones de la unidad hay pequeñas distancias entre los elementos móviles y estacionarios, apareciendo fricción por la fluencia del material, por lo que pueden aparecer daños importantes en la mayoría de los componentes afectados. Aunque la

fricción no suele aparecer en la primera fase de fluencia, y la deformación de los componentes bien diseñados no deben entrar nunca en la tercera fase, por lo que es responsabilidad del diseñador elegir la geometría del componente para que la deformación en la segunda fase no cause este tipo de contacto.

La relación de fluencia de cualquier componente, bajo condiciones establecidas de operación, depende de dos parámetros fundamentales.

Niveles de tensión durante la operación.

Estos niveles de tensión sufridos por cualquier componente dependen de un gran número de variables, incluidas la caída de presión del vapor, la velocidad de rotación, y las relaciones del flujo del vapor. Cada parámetro puede variar durante la operación, y por lo tanto modificar el nivel de tensión local. El desarrollo de la tensión en los componentes variará durante la operación.

Una consideración que tener en cuenta con la variación transitoria de estos parámetros de operación será que causarán deformación plástica temporal local. Aunque no de forma permanente, se podrá iniciar deflexión o deformación durante el transitorio. Este tipo de fallo no aparecerá si la deformación plástica por fluencia no ha sido muy dura durante el transitorio.

Temperatura de operación.

La temperatura de los componentes influye en la capacidad de los estos para resistir las tensiones aplicadas, y, por lo tanto, la frecuencia con la que aparece la deformación por fluencia. Por esta razón es necesario controlar la temperatura de sobrecalentamiento y recalentamiento de la caldera con unos valores específicos del diseño. Estas restricciones impuestas por el diseño, aunque pueden parecer estrictas, pretenden aumentar la vida útil de cada componente individual de la unidad.

3.2.3 Deformación por fluencia

La fluencia es una deformación plástica, que aparece en cualquier componente sometido a tensiones durante largos periodos de tiempo. Esta tensión puede presentar valores constantes o fluctuar, pero debe ser en la misma dirección todo el tiempo para causar deformación. Esta tensión necesaria para deformar el material es mucha más pequeña que la necesaria para romper el material cuando se le aplica de forma instantánea.

En la Figura 3.1 se puede observar la curva característica de la fluencia en la que aparece la deformación en función del tiempo, donde se pueden reconocer las tres fases separadas. Esta curva se construye con la suposición de que la temperatura y la tensión durante el ensayo son constantes.

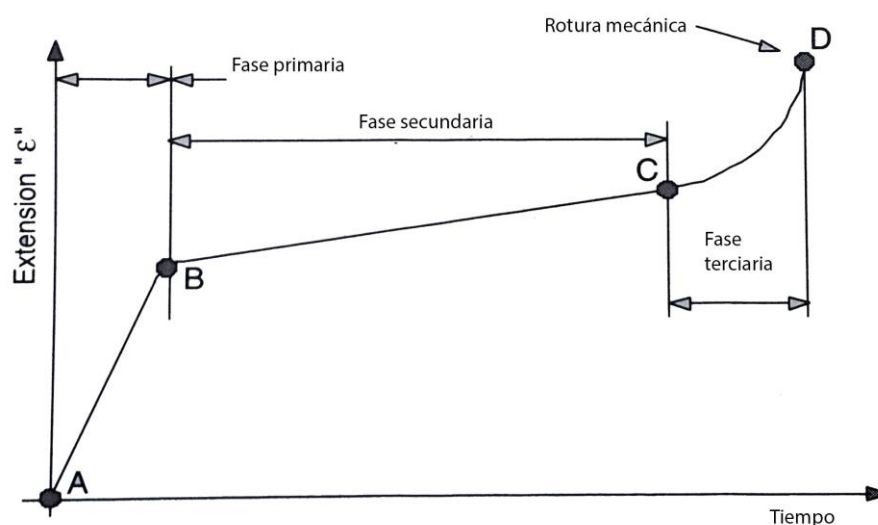


Figura 3.1 Curva característica de la fluencia

La deformación debida a la fluencia es la deformación plástica de material que no se recupera cuando la carga cesa. Al permanecer la carga constante, los diferentes comportamientos característicos de cada fase se deben a que la tensión crece con la disminución de la sección del material.

Las tres fases presentes son:

- Etapa primaria “A-B”. Durante esta fase inicial, aparece una deformación relativamente rápida con una aplicación constante de carga, el grado de deformación es inicialmente rápido debido a que la posición más débil de la capa límite falla a pequeñas cargas, la velocidad de deformación disminuye con el tiempo.
- Etapa secundaria “B-C”. la velocidad de deformación disminuye hasta permanecer relativamente constante. Después de que la primera capa límite fallara, aparece el fallo sucesivo de las sucesivas grietas límite que aparecen en los cristales metálicos. Durante este tipo la deformación continúa despacio.
- Etapa terciaria “C-D”. Cuando la deformación entra en la tercera fase, la velocidad con la que se deforma acelera hasta la condición “D”, en el que aparece la rotura. En estas condiciones, el material no es capaz de soportar la carga debido a la rotura de las capas límite.

Familias de curvas características

Considerando la representación de la fluencia para un tipo de material a diferentes temperaturas donde $T_1 > T_2 > T_3 \dots$, la variación de la deformación aumenta con el aumento de la temperatura., como se observa en la figura Para cada familia de curvas se puede observar las siguientes características.

- A mayores temperaturas, la fluencia es mayor en cada una de las tres fases.
- En todas las temperaturas, la cantidad de tiempo en la fase primaria es la misma, pero la deformación total es mayor a altas temperaturas.
- Cuanto más alta sea la temperatura de operación menor será la vida útil del componente.
- El tiempo en la segunda fase se reduce con el aumento de la temperatura, por lo que se entra antes en la tercera fase.

Una vez la curva deja una fase y entra en otra, la forma de la curva es difícil de definir debido al cambio de la velocidad de la deflexión debida a la fluencia. Ya que las curvas son el resultado de datos experimentales, no serán precisas, pero aportarán información importante para predecir el comportamiento del material con una exactitud considerable.

3.2.4 Mecanismo de fluencia

Se pretende tener controlados los componentes de la unidad que trabajan a altas temperaturas y altos niveles de tensiones, que, como se ha mostrado con anterioridad, son los componentes realmente susceptibles de sufrir fluencia.

La temperatura a la que la fluencia tiene un impacto considerable se considera aquella superior a un 50% de la temperatura de fusión del material.

Los componentes se eligen para favorecer una vida del componente de 200 000 horas, que representa una vida útil de 30 años con un factor de carga del 75%.

Como se ha expuesto con anterioridad, los componentes que se encuentran presentes durante largos periodos de tiempo en medios con temperaturas elevadas y tensiones relativamente bajas son susceptibles de sufrir fluencia. Bajo estas condiciones, los componentes se deforman gradualmente, empezando con una velocidad elevada en la primera fase, que disminuye al llegar a la segunda fase, donde aparecen microrroturas en la superficie y en el interior, que pueden crecer hasta que se entra en la zona terciaria. La velocidad de la fluencia es en realidad la velocidad con la que se deforma el material, siendo, por lo tanto, una medida de la velocidad con la que cambia la forma del componente en la dirección resultante de la aplicación de la tensión.

3.2.5 Tasa de fluencia

Como se ha comprobado con anterioridad, la tasa de fluencia no es constante con el tiempo de exposición, si no

que varía de formas diferentes durante las tres etapas destacadas. Es, por lo tanto, interesante considerar las características del material que producen cambios en la tasa de fluencia.

Cuando se aplican cargas al componente en un medio con una temperatura elevada, se produce un endurecimiento del material y un aumento de la fuerza mecánica como consecuencia de la deformación plástica. Esto aparece por debajo de la temperatura de recristalización, donde operan los componentes de la turbina, por lo que es posible que aparezca una recristalización lenta (los granos grandes se refinan formando un gran número de granos pequeños). El acero de las turbinas se consigue por trabajo en frío que cambia la estructura del material a ciertas temperaturas y tiende a aumentar la tasa de fluencia.

La forma en la que aparecen estos fenómenos que modifican la tasa de fluencia depende del tiempo de operación, así como el medio en el que opera. Durante cortos periodos de tiempo, mientras se aplica carga el predomina el endurecimiento por deformación, lo que significa que la tasa de fluencia inicial es alta, y la deformación rápida, en la dirección en la que la carga es aplicada. Sin embargo, una vez incrementa el tiempo que la carga se ha aplicado, este fenómeno tiende a reducir la tasa de fluencia es relativamente constante. Una vez que aumenta el tiempo de exposición, se acumulará el daño y la tasa de fluencia se acelerará una vez entra en la tercera fase, donde la relación con la que el material se deforma y la acumulación de daños aumenta hasta la rotura final.

3.2.6 Fluencia en los componentes del paso de vapor

En este apartado se considerarán los elementos del paso del vapor más susceptibles de sufrir fluencia.

Álabes móviles

Los álabes móviles están sujetos a cargas constantes durante la operación y en especial aquellos que trabajan en los escalonamientos de alta presión y las secciones de recalentamiento de la unidad, estas cargas se aplican a temperaturas suficientemente altas por lo que la deformación aparece. La acumulación de la deformación hará necesaria la sustitución de los álabes que viene como consecuencia de un gran número de factores, por ejemplo, de la magnitud de la carga y el tiempo que cada álabe ha estado operando. Figura 3.2 muestra un álabe del escalonamiento de control con una temperatura inicial del vapor alrededor de 594 C y que ha permanecido en servicio durante 160 000 horas. Este álabe se ha preservado considerablemente bien, pero bajo la influencia de las tensiones y las altas temperaturas durante largos periodos de tiempo, ha acabado sufriendo fluencia. En la Figura 3.3 se muestra la forma de la deformación por fluencia similar de la raíz del álabe, indicando las condiciones de operación inicial y final, y la deformación debida a la fluencia.



Figura 3.2 Raíz de álabe del escalonamiento de control que ha sufrido daño por fluencia

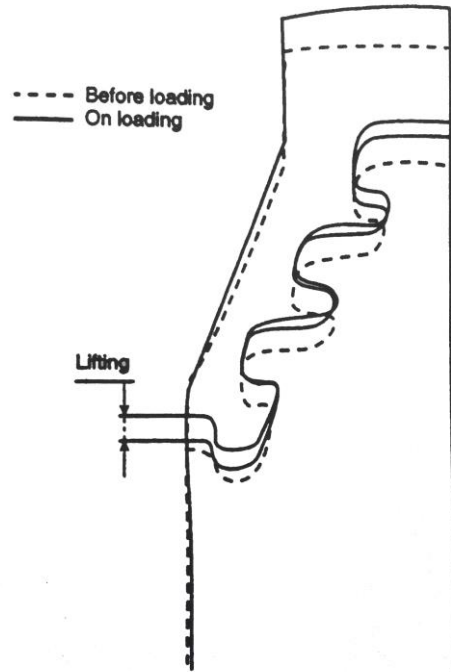


Figura 3.3 Esquema de la deformación de la figura 3.1

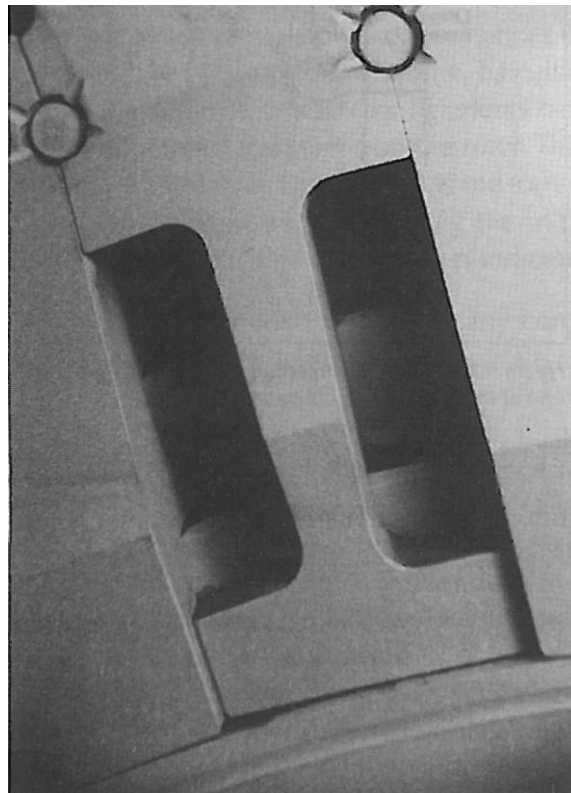


Figura 3.4 Fluencia en el rotor

Otro factor que puede inducir daño en cualquier componente, pero especialmente en los álabes móviles, es el fallo de las tolerancias dimensionales de algunos diseños. La Figura 3.4 muestra la corona del álabe del rotor de la sección de recalentamiento, con temperatura de recalentamiento en torno a 595 C, en el que un falso arranque se ha producido a la hora de realizar los agujeros de la raíz del álabe. La consecuencia se muestra en la figura

Figura 3.5, siendo esta la falta de superficie efectiva de transferencia de carga.

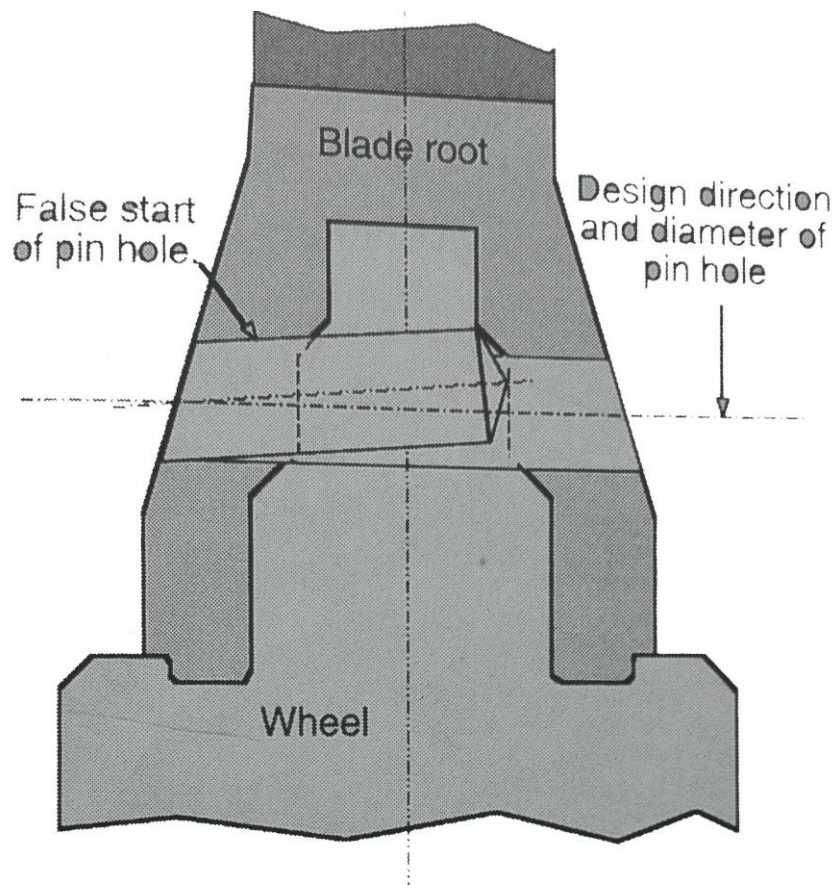


Figura 3.5 Esquema del desalineamiento de agujero

Cuando se remplazan los álabes del rotor en el rango de la fluencia, es preferible determinar toda la deformación por fluencia que haya aparecido.

Rotor

El rotor como otros componentes sujetos a altas temperaturas y presiones están sujetos a deformación por fluencia. El daño aparece normalmente en regiones donde las tensiones del rotor son altas. Estas son regiones donde la carga se transfiere desde la raíz del álabe hasta el rotor. 3.2 muestra el hueco del rotor donde la raíz del álabe se ha deformado y el álabe ha acabado desprendiendo. El hueco del rotor se deforma por fluencia.

Las altas temperaturas del rotor se distribuyen de formas complejas. Las temperaturas y tensiones pueden aparecer en la misma zona del material, teniendo una alta probabilidad de aparecer, si se encuentra a pequeñas relaciones.

Diafragma

Los diafragmas se producen en tres partes, el anillo exterior, los álabes y el soporte interior. Cada uno de estos componentes está sujeto a la presión diferencial de la corona de álabes estacionarios. El anillo exterior se encuentran sujetos en las ranuras en la carcasa y no se distorsionan bajo el efecto de la presión. Sin embargo, los álabes y los cojinetes están sujetos a un diferencial de presiones mayor y finalmente se deformarán elásticamente. Si se encuentran una temperatura lo suficientemente elevada, aparece deformación plástica por fluencia.

Una vez el vapor es admitido en la unidad, las tensiones se localizan en el diafragma. Esta tensión inicial se introduce en varios componentes del diafragma, con magnitud del orden entre 35 MPa y 69 MPa. Sin embargo, las cargas axiales, aunque no muy grandes, resultan en la deflexión de diafragma aguas abajo, en el máxima diámetro interior adyacente al rotor. La Figura 3.6 muestra la deflexión del diafragma en el diámetro interior. La tensión máxima que aparece en el diafragma debido a la presión diferencial que soporta, aparece en los elementos a lo largo del eje "XX". Se puede observar también que la deflexión máxima no aparece en el eje de máximas tensiones.

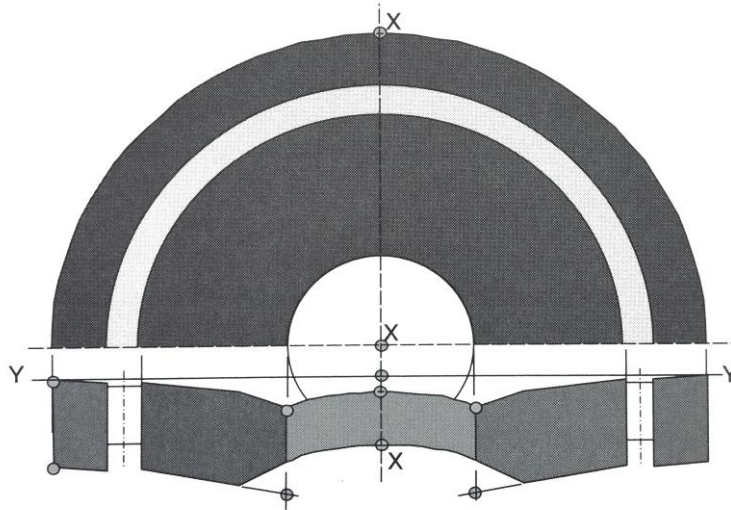


Figura 3.6 Desviación del diafragma, máxima en el diámetro interior sobre la junta horizontal

El anillo exterior y el interior en las regiones de altas temperaturas se producen mediante forjado de aleaciones de acero de gran resistencia. Lo más importante a la hora de fabricar los diafragmas es la capacidad de estos componentes de resistir durante largos periodos a temperaturas elevadas, por lo que se desarrollarán presiones axiales a través de ellos. El anillo exterior se localiza en la carcasa para formar una junta hermética de vapor que no flexionará de forma importante. Sin embargo, los álabes y el soporte interno se flexionará aguas abajo influenciado por el gradiente de presiones axiales. Es, por lo tanto, necesario considerar el efecto del tiempo en la deflexión de los componentes y la influencia que tendrá en el espacio axial en el paso del vapor.

El diafragma tiene, comparado con las partes móviles, niveles de bajos de tensiones inducidos sobre él. Es improbable que fallen de manera catastrófica, sin embargo, cuando se introduce vapor en la unidad, se inducen tensiones favorecida por la presión diferencial que aparece en los álabes y el soporte interior causando su flexión aguas abajo. Cuando la unidad comience a funcionar, cada diafragma experimentará en primer lugar deformación elástica seguida de una deformación plástica que dependerá de la temperatura y del tiempo expuesto. La Figura 3.7 muestra la sección de corte de un diafragma, en el que se puede observar:

- Hay un hueco inicial en frío entre el soporte del rotor, en su diámetro interior y el rotor "Cl_i", cuando el rotor está estacionario.
- Cuando se arranca la unidad y el vapor es admitido, se producirá una deformación inicial elástica, bajo la presión diferencial de la corona estacionaria, agotando una parte del espacio, quedando este reducido a "Cl_o"
- Después de un cierto tiempo "T" se producirá deformación por fluencia, lo que supone un aditivo a la deformación elástica. Después de este periodo, la deflexión que aparece debido a la fluencia incrementará, reduciendo el espacio a "Cl_r".

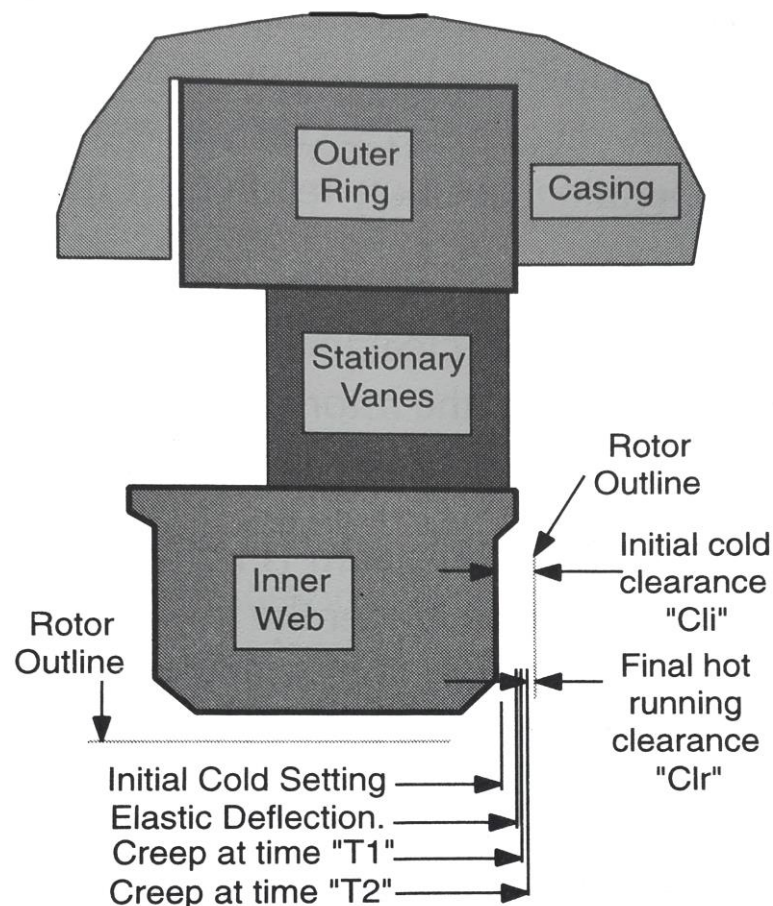


Figura 3.7 Desviación del escalonamiento de un diafragma influenciado por el tiempo de exposición

Cuando la operación continua, el espacio inicial dispuesto para prevenir la dilatación de los componentes, es reducido por la propia deformación por fluencia, pudiendo aparecer el roce entre la parte interior del diafragma y el rotor, que se producirá en el diámetro interior del diafragma, o en cualquier lugar donde existan espacios axiales estrechos. Este tipo de fricción generará una cantidad considerable de calor. Estas regiones calentadas serán inmediatamente enfriadas por el vapor que las rodea introduciendo un endurecimiento localizado en el diafragma y el rotor. Aunque este efecto en el diafragma no será peligroso de forma inmediata, el rotor en gran medida aumentará su dureza, su fragilidad, y no deberá operar sin acciones correctivas.

Este tipo de fricción puede aparecer durante el arranque o la parada de la unidad, durante las cuales el rotor está sujeto a condiciones límite, que modifican los espacios nominales de operación.

Hay que tener en cuenta que cuando la unidad es parada, la deformación elástica se recupera, pero la plástica no, por lo que se suele recomendar monitorizar el espacio crítico como parte de los registros normales de mantenimiento en la operación de los escalonamientos en las regiones donde se trabaja a alta temperatura y por lo tanto puede aparecer fluencia.

En un esfuerzo por incrementar la resistencia a la deformación por fluencia y para reducir la mayor parte de la deformación plástica inicial, algunos fabricantes fabrican los álabes estacionarios con diferentes perfiles. Los álabes usados para minimizar la influencia de la fluencia son evaluados por el efecto de la presión, la temperatura y el momento de las cargas del vapor. Si las cargas son desmesuradas, es común el uso de álabes más largos como los mostrados en la Figura 3.8 donde se usan en una parte del total de cada escalonamiento, aumentando así la longitud axial del escalonamiento.

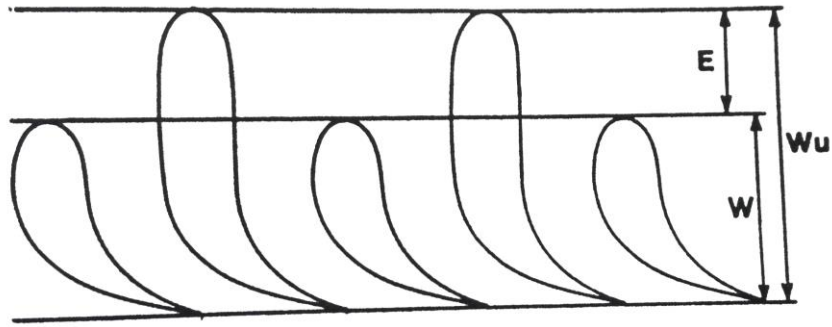


Figura 3.8 extensión de los álabes, para mejorar la fuerza axial

La mayor parte de estos álabes se elige para conservar, en la medida de lo posible, la forma aerodinámica del paso de expansión, siendo el efecto sobre la distribución del flujo, mínimo o incluso nulo. La longitud del álabe tiene poca influencia en el funcionamiento del escalonamiento, debido a que la velocidad del vapor que entra de la corona de álabes del rotor anterior es baja y prácticamente a 90° a la dirección tangencial. Sin embargo, si el vapor entra con cierto ángulo “”, pueden sufrirse variaciones en la cantidad de vapor que entra en cada conducto de expansión, causando un cambio menor en las características del flujo del escalonamiento, afectando a la capacidad de ingesta de los pasos de expansión individuales. Este cambio en la cantidad de vapor que entra en las toberas individuales causará una modificación de la capacidad de ingesta de vapor, que tendrá como consecuencia la variación de la velocidad de descarga, presión y dirección.

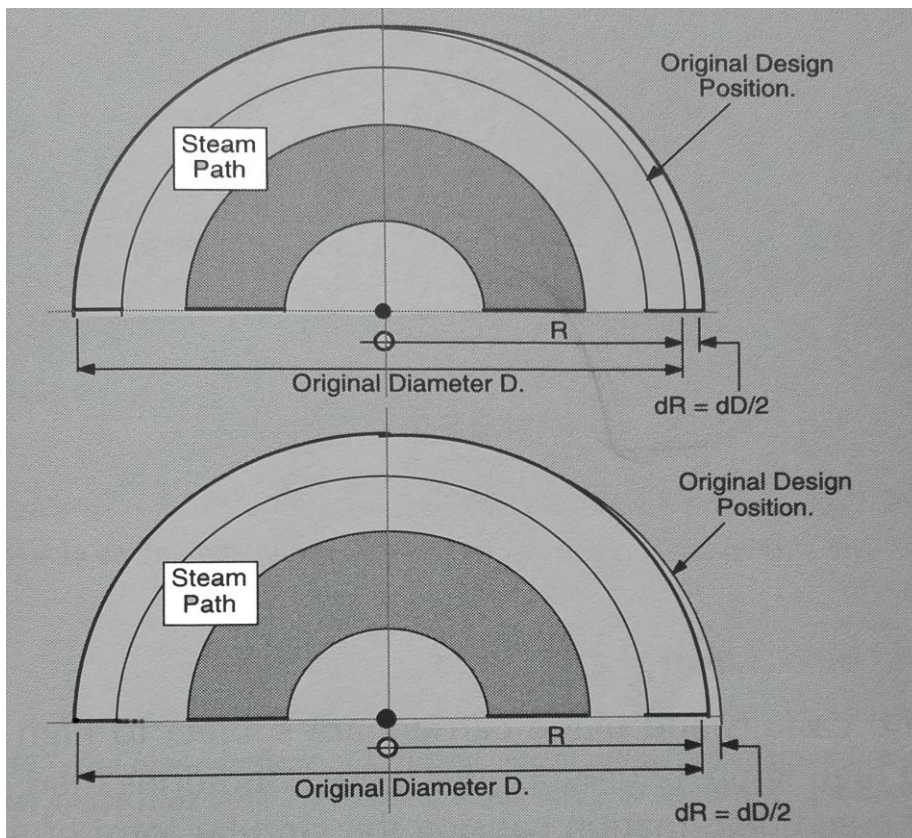


Figura 3.9 deformación radial de diafragma debido a la fluencia

El diafragma puede también sufrir fluencia en el plano radial, afectando a las juntas horizontales. Este efecto se observa en la Figura 3.9 donde se muestra el incremento y decremento del diámetro.

Cuando se considera la deformación radial del diafragma se debe considerar que la fluencia no es el único mecanismo que introduce estas condiciones, ya que puede venir de las tensiones residuales atrapadas en los componentes provocado por soldaduras, por lo tanto, es necesario reconocer cuando se pueden corregir estas condiciones, en casos donde la deformación por fluencia ha sido eliminada.

Carcasa y soporte de los álabes.

La carcasa y los soportes de los álabes de la turbina están sujetos a altos niveles de tensiones y altas temperaturas. Bajo estas condiciones puede aparecer cierto grado de deformación por fluencia causando la modificación de la forma circular de la carcasa a una forma elíptica y sus consecuencias dependen de los detalles del diseño. En ciertas circunstancias este tipo de deformación puede causar daños graves e incluso introduciendo dificultades para quitar los travesaños y elevando la mitad superior de la carcasa o los portadores de los álabes. En otras situaciones las dificultades en las que se envuelve son menores, evitando la influencia en el alineamiento del paso del vapor, y por lo tanto pueden ser tolerados.

La figura 5.7.10 muestra la junta horizontal de la carcasa que se ha movido en la junta horizontal, produciendo una fricción intensa entre la superficie interior de la carcasa y los sellos integrales de la cabeza de los álabes. En este tipo de diseño, la corona de álabes estacionarios se localiza en la parte interior de la carcasa, por lo que cualquier deformación que aparezca en ellos, conllevará el desalineamiento entre los álabes estacionarios y móviles. Este tipo de deformación puede producir una variación de la fuerza tangencial del vapor, provocando que la vibración en los álabes del rotor sea más intensa.

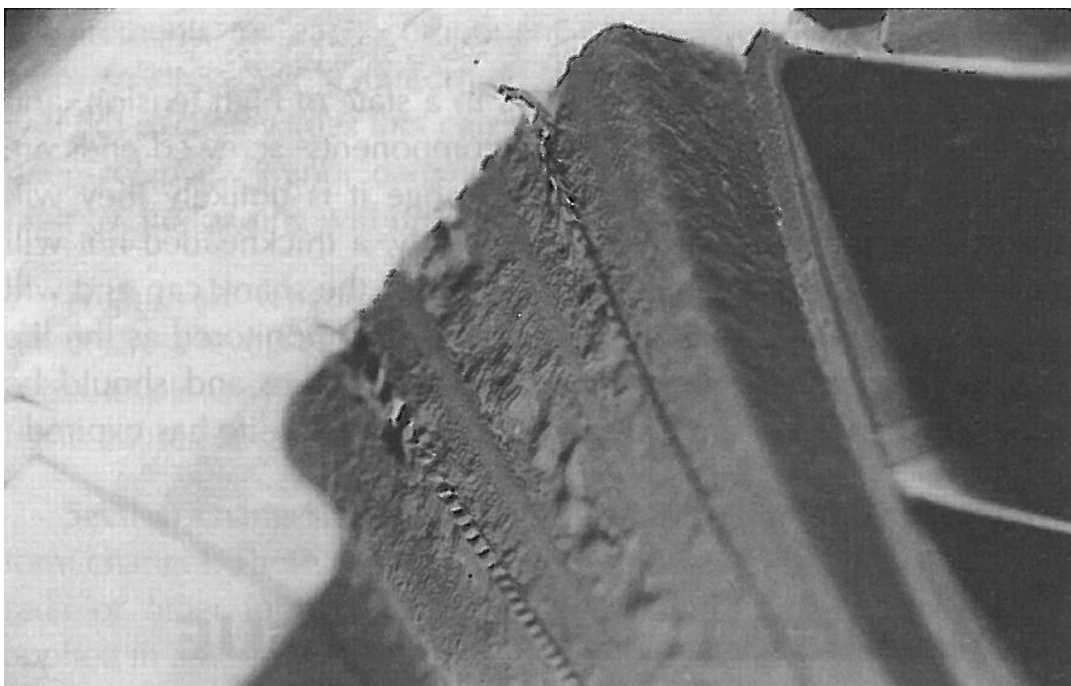


Figura 3.10 Superficie interior de la carcasa donde la fluencia a provocado el roce entre el sellado de los álabes del rotor

3.3 Fatilga de alto ciclo

Este tipo de mecanismo puede producir la rotura del material tras la aplicación de cargas cíclicas repetitivas, que son menores de las que harían romper el material, si se aplicasen sin impacto y en la misma dirección.

Es el fallo más común en los componentes del paso del vapor. La alta frecuencia de este tipo de fallo es consecuencia de muchas fuentes de las cargas cíclicas generadas en el paso del vapor, que, aún de pequeña magnitud, aparecen con alta frecuencia en los componentes del paso del vapor que giran a altas velocidades,

acumulando ciclos de tensiones en cortos periodos de tiempo. Además, se encuentran presente regiones de concentración de tensiones como resultado de otros mecanismos de daños.

El proceso de diseño establece los materiales y el diseño necesario para cada componente del paso del vapor, seleccionando aquellos que mantengan unos valores de tensiones aceptables durante la operación. Normalmente aparecen daños menores sobre el componente, siendo el responsable del fallo final del mismo, la aplicación continuadas de cargas altas cíclicas.

Este tipo de mecanismo es más destructivo en regiones donde se encuentran presentes grandes tensiones directas, que suelen ser aquellas partes del paso del vapor donde se concentran las tensiones. Las causas básicas de esta concentración son:

Cambio de sección: Las consideraciones de diseño suelen requerir el cambio de la forma o sección. Estos cambios introducen regiones donde será necesario el cambio del radio del fileteado del alabe. Esto hace que las cargas se apliquen de una manera desigual, lo que incrementará los niveles de tensión locales.

Deficiencias del material. Una vez el material ha sido fabricado para ser usado como componente de la turbina, se examinan cuidadosamente para asegurar que no existen fallos en el material, sin embargo, es posible que fallos producidos en el material durante el proceso de fabricación a alta temperatura no sean identificados, a pesar de que el fabricante se haya esforzado por evitarlos o eliminarlos.

Marcas de fabricación o montaje. Hay muchos procesos de fabricación y montaje que producen marcas, rayaduras y huellas en la superficie del material, que pueden actuar como centro de concentración de tensiones, con la capacidad de sufrir daños.

3.3.1 Fenómeno de alto ciclo

La variación de las tensiones alternas fluctuará entre un valor máximo y un mínimo, procedentes de un valor de tensiones principal " τ_m ". La amplitud de la onda será $2 \tau_a$ por lo que la tensión máxima a la que está sometida es $\tau_m + \tau_a$ y la tensión mínima será $\tau_m - \tau_a$. en la figura 3.11 se muestra en un diagrama estos valores. En la práctica se encuentran tres formas en las que estas tensiones son aplicadas:

- Tensiones entorno a un punto de tensión cero, por lo que la dirección de la resultante varía a lo largo de cada ciclo. 3.12.a
- Tensiones alternas que varían alrededor de un punto de tensión, la resultante es siempre en la misma dirección. Figura 3.12.b.
- Tensiones alternas, con el mínimo igual a cero. Figura 3.12.c.

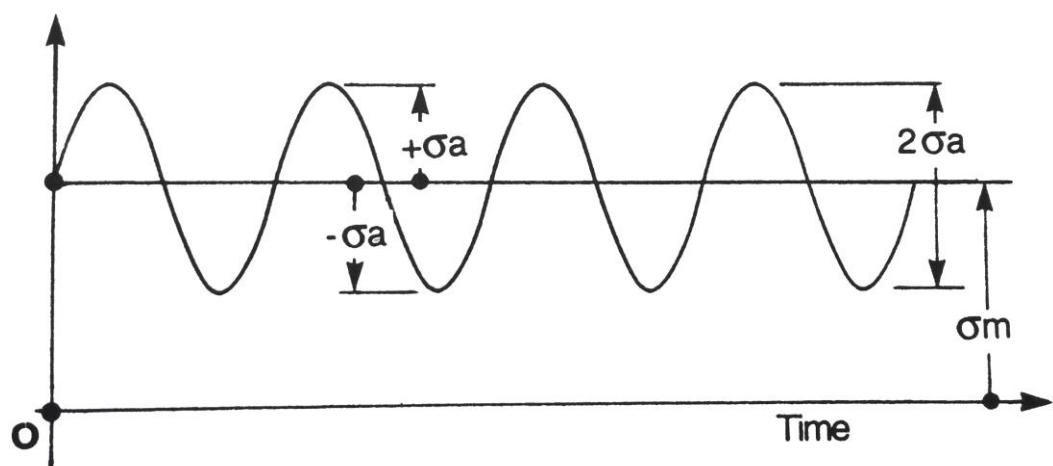


Figura 3.11 Cargas cíclicas aplicadas sobre una carga constante

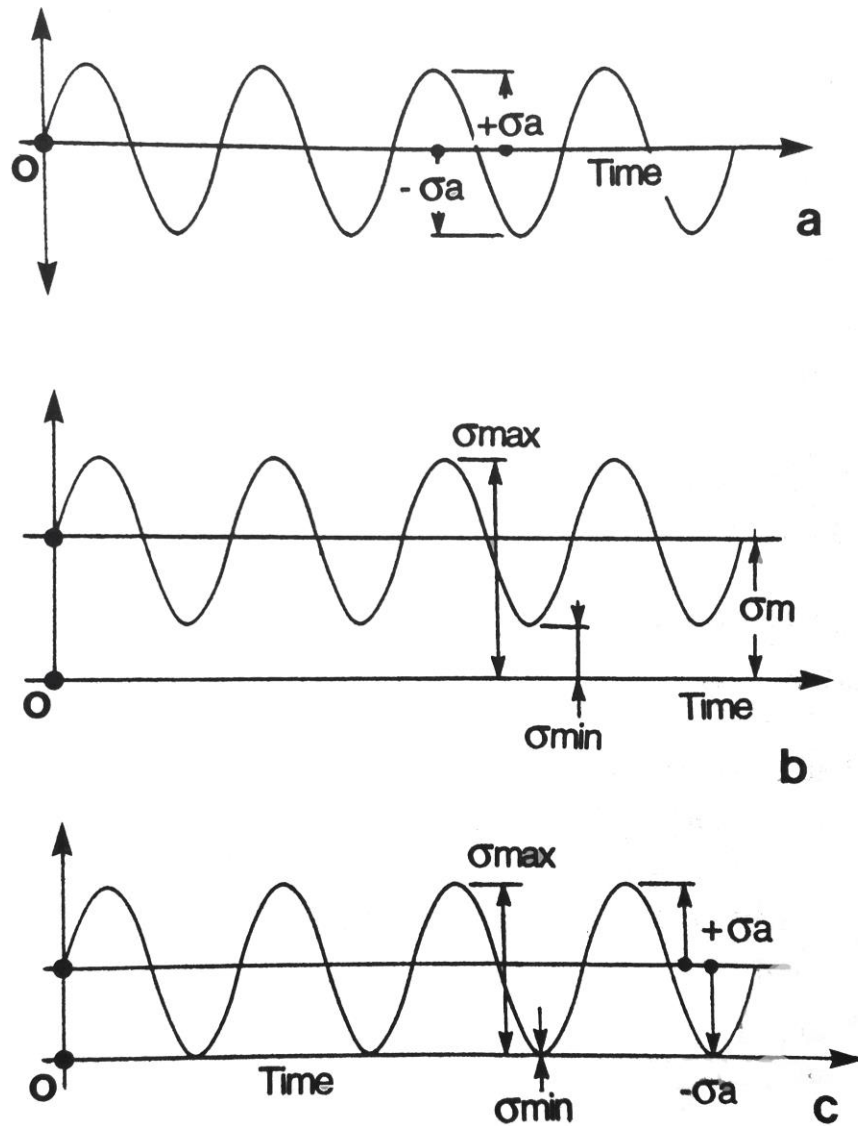


Figura 3.12 Las tres alternativas de aplicación de cargas cíclicas

Definiendo estas tres formas se asume que la aplicación de la tensión aparece de forma sinusoidal. Esta suposición no es necesariamente correcta.

La forma en la que varía la aplicación de la carga depende de un gran número de factores relacionados con la geometría del paso del vapor y el cumplimiento de los requisitos impuestos en el diseño. Los siguientes factores influyen en la magnitud de la fuerza del vapor:

- La resistencia del borde de estela entre dos álabes estacionarios.
- La entrada de los pasos de vapor por la corona de álabes estacionarios y sus diferencias en la capacidad de ingesta.
- Las huellas en las gargantas del paso del vapor, que modificarán el ángulo de descarga.
- Cualquier inconsistencia que exista en la forma del paso del vapor en las juntas horizontales de las coronas del álabe del estator.

La magnitud del impulso afectará a la cantidad de vapor que fluye por la garganta, que dependerá de la carga de la turbina, que obviamente varía con la demanda del sistema.

Se ha asumido también que la frecuencia de la aplicación de las tensiones permanece constante, que será

admitido cuando la unidad se ha diseñado para una generación constante de potencia. Sin embargo, en otros diseños que operan con diferentes temperaturas, no se puede asumir esto. Debido a que, con la acumulación de daños, los componentes se vuelven más sensibles a la frecuencia, por lo que este tipo de unidades acumularán daños en momentos diferentes. La situación más dañina para la unidad es cuando la frecuencia a la que el impulso desarrollado por el vapor coincide con la frecuencia natural de los componentes que interaccionan con este vapor, pudiendo causar el fallo en un corto periodo de tiempo.

De todas estas consideraciones, se puede concluir que las formas en la que aparecen las tensiones en el paso de vapor son complejas, por lo que hay que tenerlas en cuenta en el momento del diseño.

3.3.2 Tensiones vibratorias sobre álabes del rotor

Los álabes de la turbina son los componentes más susceptibles de sufrir fatiga de alto ciclo, ya que sobre ellos se inducen tensiones causadas por la vibración del flujo de vapor al pasar a través de ellos. La magnitud de estas tensiones varía dependiendo del escalonamiento y se encuentra influenciado por la frecuencia y la magnitud de las cargas vibratorias. Las características físicas del álabe como puede ser la forma y el tamaño también influenciarán en el efecto adverso sobre los álabes.

Estas vibraciones pueden causar que el álabe vibre en la dirección axial, tangencial o torsional. Hay varios armónicos de estos modos, y donde la magnitud de la tensión inducida por cualquiera de los de máxima cuando la frecuencia de la fuerza se encuentra en fase con la frecuencia natural del propio álabe, causando un incremento de la amplitud de la vibración, así como las tensiones a las que está sometido.

Las fuerzas que actúan sobre el álabe y contribuyen a las cargas vibratorias son las fuerzas de flexión del vapor causadas por el paso de este por el álabe. Muchas de estas cargas son predecibles en el proceso de diseño, por lo que se intentará evitar la acumulación excesiva de estas vibraciones.

Efecto de impulso de las toberas

Es una causa común del fallo de los álabes del rotor en la turbina y es causado por la deformación del flujo del fluido que aparece como la distribución desigual entre los álabes estacionarios. Una vez el flujo atraviesa el paso por los álabes estacionarios se somete a la variación de impulsos de presión del vapor, y por lo tanto las fuerzas se desarrollan en la dirección axial y radial. En la 3.13 se observa un diagrama típico de impulso para tres pasos entre álabes, donde la fuerza del vapor "F" sobre el álabe varía en cualquier instante dependiendo de su posición en la dirección tangencial a través de la salida del álabe.

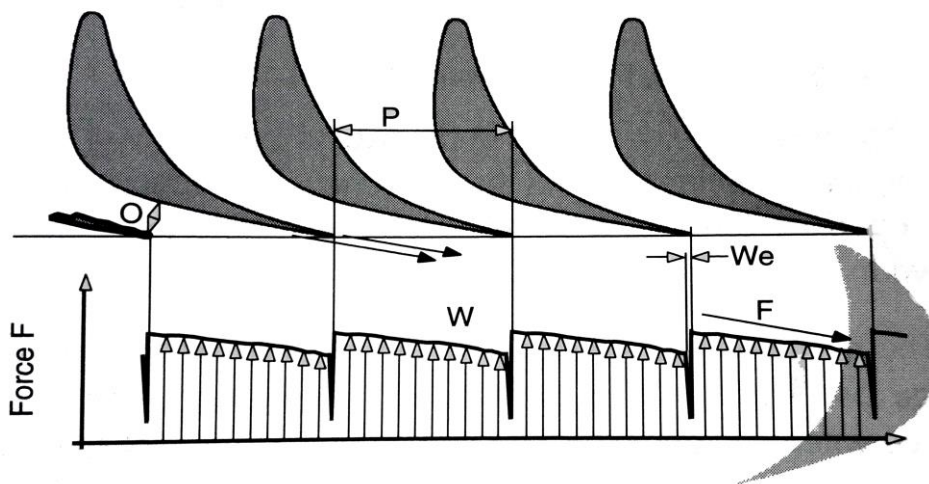


Figura 3.13 Variación de las fuerzas del vapor

También se muestra el efecto viscoso del borde de estela. La magnitud de las fuerzas producidas por este efecto depende de diversos factores, en los que se incluye la forma del paso del flujo, y la mayor parte de la capa límite que se desprende del borde de estela. Se ha mostrado en la parte inferior del diagrama de forma esquemática la fuerza "F" en la descarga de la corona de álabes sobre una posición arbitraria. La presión del vapor actual decrece

a través del paso por la tobera y el borde de estela donde se desprende, aquí se encontrará una pequeña reducción de la presión debido a este efecto. Se puede observar el efecto de la fuerza del vapor actuando sobre el álabe. Debido a la variación de las fuerzas, la entrada del álabe está sujeta a una fuerza alterna, que induce tensiones del ciclo de magnitud variada a través de cada paso por la tobera.

Efecto del paso a través de la tobera (frecuencia)

La resonancia del alabe que aparece cuando la frecuencia natural del álabe se encuentra en o cercano a la frecuencia de las fuerzas impresas desarrolladas por la variación de la presión a través de la tobera de descarga se muestra en la Figura 3.13.

La magnitud de la fuerza del vapor producido por la variación de la descarga de presión es relativamente pequeña, y de poca consecuencia cuando se compara con la rigidez del álabe. Por esta razón, si la frecuencia natural del álabe no se encuentra cercano con la frecuencia de la tobera, la tensión dinámica del álabe no influenciará de forma considerable.

Tensiones combinadas

En las tensiones totales resultantes sobre el álabe es necesario determinar los efectos de las tensiones combinadas estáticas y vibratorias. Un método apropiado para hacerlo es el uso del diagrama de Gerner, que aparece en la figura 3.14, que realiza un análisis de la fatiga resultante en varios metales y determina el efecto de las tensiones combinadas, en la curva quedan representados los límites de las tensiones.

Efecto de la admisión parcial

Un diagrama simple del efecto de la fuerza del vapor, o la representación de la revolución de un álabe solo se muestra en la figura 3.14, que muestra la carga transitoria aplicada al álabe y la deflexión resultante debido al efecto del flujo de vapor.

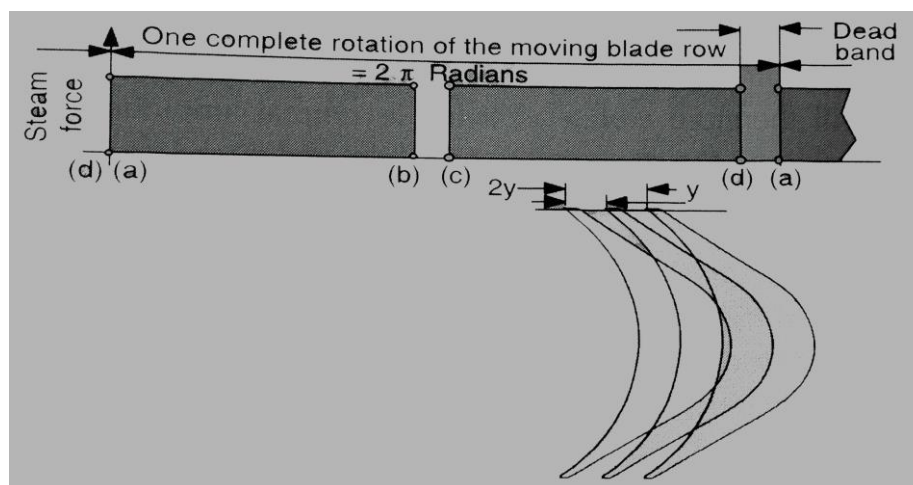


Figura 3.14 Diagrama de fuerzas para una revolución del álabe del rotor mostrando los arcos activos

En esta figura, el vapor actúa sobre los álbes del rotor una vez entra en el arco activo en “a”, donde el flujo de vapor empuja al álabe, introduciendo tensiones. En el instante en el que la fuerza es aplicada (en la posición a), la energía cinética del flujo de vapor provoca la desviación del álabe, almacenando así energía de deformación. Esta desviación del álabe continúa hasta que la energía de deformación almacenada es igual a la energía cinética del flujo de vapor. En estas condiciones el álabe se desviará una cantidad “y”. La energía cinética se disipará en el álabe por la desviación por una mayor cantidad “y”, que, completando la conversión de energía, la desviación total del álabe será “2y”, en el que las que estas condiciones de tensiones serán igual a “ τ_m ”. La carga de tensión sobre el álabe será dos veces la de la posición de equilibrio.

También aparecerá una tensión de pequeña magnitud “+/- τ_a ” debido al efecto de impulso de la tobera.

Si el álabe considerado vibra, posicionándose fuera del arco de admisión activo en “b”, con el álabe en el extremo inferior de su movimiento, perderá movimiento, convirtiendo su energía de deformación en cinética, y moviéndose de vuelta a la posición “-2y”. El álabe vibrará dos veces su amplitud normal. Bajo estas condiciones, el rango de tensiones en los bordes de ataque y estela serán cuatro veces la estática.

Si el álabe entra después en el segundo arco de admisión activo con su movimiento en la misma dirección que la fuerza del vapor, la amplitud sufrirá un incremento mayor. Esta cadena de eventos puede continuar hasta que el álabe es completamente destruido. Hay por tanto un requerimiento de diseño, en el que el álabe es dimensionado de forma que la desviación de este no produzca tensiones capaces de destruirlo.

Diagrama de fuerza del vapor actual

Una vez desarrolladas todas las fuerzas sobre los álabes se puede determinar la resultante sobre el siguiente diagrama. El diagrama teórico mostrado con anterioridad, en la Figura 3.13 representa un análisis simple de las fuerzas aplicadas, de hecho, hay factores que modifican la forma del diagrama.

En primer lugar, es imposible aplicar la fuerza de forma instantánea, se requiere un momento finito para que la entrada del álabe note el completo efecto axial del cambio de presión del vapor. De forma equivalente, la fuerza no puede ser eliminada del álabe de forma instantánea y requiere un instante de tiempo para eliminarla por completo. Por lo tanto, la fuerza axial del vapor en las posiciones "a", "b", "c" y "d" en la figura 3.15 cambiará de forma.

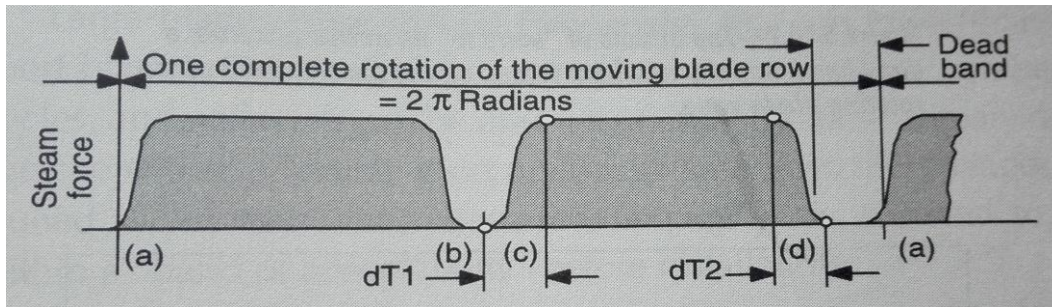


Figura 3.15 Modificación del diagrama de fuerzas del vapor para reflejar el efecto de la entrada y la salida

Un segundo factor que modifica el diagrama de fuerzas en la entrada de un arco activo es el efecto del paso del vapor solo sobre una superficie a través del álabe. Esto es conocido como el efecto de inmersión. Bajo estas circunstancias, como se muestra en la figura 3.16, el vapor empieza a entrar en el paso entre los dos álabes y antes de que el álabe sienta la aplicación de la carga, aparece el efecto Venturi en la sección del álabe que tirará o desviará el álabe hacia la corona de álabes estacionarios, tendiendo a descargarlo. Este efecto es mostrado como una fuerza negativa " $-dF1$ ", que existe previamente a la aplicación de la carga completa al álabe.

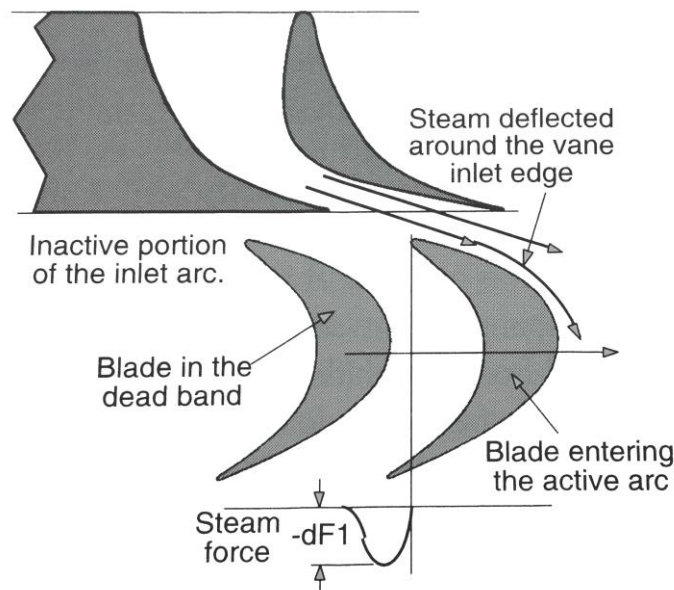


Figura 3.16 Efecto de la entrada sobre un arco activo

De forma similar, una vez el álabe se mueve hacia el arco inactivo, y el vapor entra en el paso entre los álabes, por un instante se produce una fuerza en la cara de presión del álabe en la salida del arco activo (Figura 3.17).

No hay fuerza compensatoria en la cara de succión ya que el álabe se encuentra ahora en el arco inactivo, y no tiene vapor. Por lo tanto, aparece un desequilibrio de fuerzas “ $+dF_2$ ” actuando sobre el álabe. Además, para el siguiente intervalo de tiempo, se encuentra una pequeña presión negativa sobre el álabe debido al flujo que atraviesa el paso, que se muestra cómo “ $-dF_3$ ” en la figura 5.10.8.

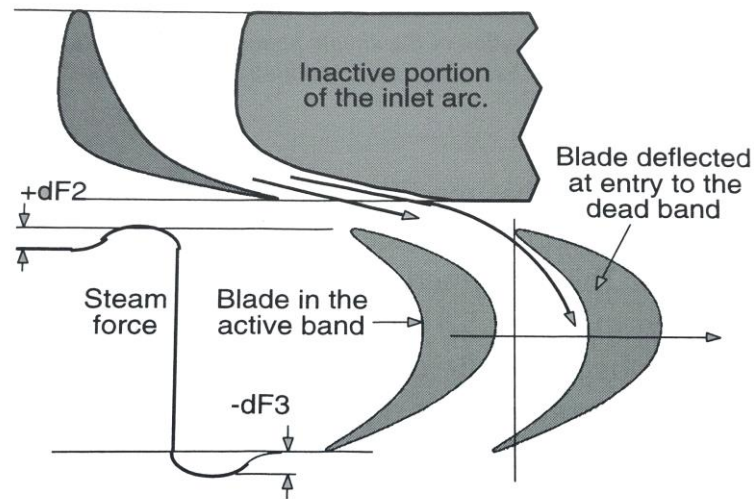


Figura 3.17 Efecto de la entrada en arco inactivo

Efecto de rigidez rotacional

Los álabes más grandes tienen frecuencia natural menor que los álabes más pequeños. Sin embargo, cuando acumulan un considerable número de ciclos, fallarán por algún daño primario en relativo corto periodo de tiempo. También, estos álabes están sintonizados, esto significa que la frecuencia de fabricación se ajusta para coincidir dentro de tolerancias aceptables antes de su instalación.

Para estos álabes largos, su fuerza centrífuga no tiene efectos en su masa, pero tiene un efecto considerable en la rigidez, por lo tanto, una vez aumenta la rotación, la frecuencia natural de los álabes incrementa. Para predecir el comportamiento de los álabes con el aumento de la frecuencia del álabe con esta variación de la velocidad, se utiliza el diagrama de Campbell.

La banda de tolerancia. La frecuencia de los álabes es función de las propiedades del material y las dimensiones físicas del propio álabe. Para las unidades modernas diseñadas para grandes salidas, el material usado por todos los fabricantes es similar, por lo que la composición química y las propiedades físicas son lo suficientemente cercanas, que la familia de materiales de los álabes posee un módulo de Young similar. En términos de la frecuencia tangencial de los álabes la propiedad mecánica más importante es el módulo de Young y para los modos de torsión, el módulo de cortadura.

Las técnicas modernas de fabricación permiten obtener unos álabes con tolerancias muy estrechas, alcanzando solo una variación marginal de las propiedades de la sección a lo largo de la longitud del álabe. Es necesario, por tanto, agrupar toda la información existente sobre la frecuencia del álabe y evaluar de forma realista la propagación de la frecuencia que puede ser aceptada. La tabla 5.10.3 muestra una lista de las bandas de frecuencias típicas sobre los primeros 5/rev puntos requeridos para ofrecer una frecuencia segura en la velocidad de operación. El valor de “ Δf ” es el valor típico asignado en todas las situaciones de diseño.

La figura 3.18 muestra los rangos seguros de frecuencia.

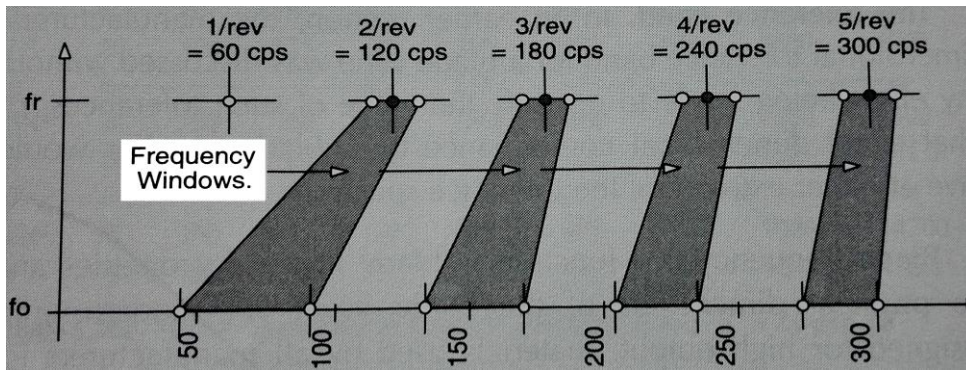


Figura 3.18 Rangos seguros de frecuencia en reposo para los alabes

Si la frecuencia fundamental en la parada se encuentra entre 2 y 3/rev la frecuencia del primer armónico debe ser revisado de la forma anterior. Las vibraciones torsionales son raramente importantes, lo son solo si la corona no tiene cubierta. Sin embargo, los elementos sin cubierta y con frecuencia fundamental por debajo de 137 cps, que deberá ser comprobado para el primer estado torsional. Midiendo la fuerza necesaria para producir la desviación angular unitaria en el álabe y comparando esta con la frecuencia torsional conocida.

La variación de la frecuencia natural como función de la velocidad de rotación se muestra en la figura 3.19. Este tipo de curva se denomina diagrama de Campbell. Para que un álabe funciona de forma satisfactoria, se debe evitar la coincidencia con los estímulos por revolución, como se muestra en el diagrama.

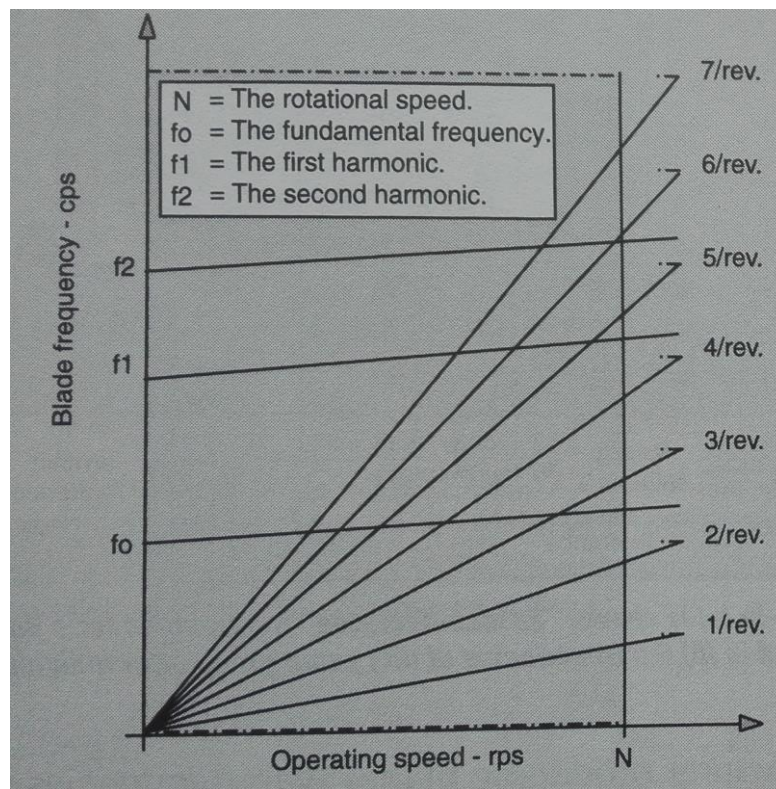


Figura 3.19 Diagrama de Campbell

Si la relación de Campbell se considera para validar los álbes, independientemente del tamaño, se puede observar que la rigidez centrífuga causara un aumento considerable una vez la frecuencia natural se haga más pequeña.

El diagrama de Campbell

El diagrama de Campbell es una representación de la frecuencia fundamental y armónica en función de la

velocidad de rotación, este se utiliza por tanto para determinar la idoneidad de un álabe para evitar operar en varias condiciones, donde puede aparecer riesgo.

LA figura 5.10.17.a muestra el incremento de la frecuencia del álabe una vez aumenta la velocidad de rotación desde “0” hasta “Nr” revoluciones por segundo. Si esta frecuencia aumenta, se le añade a la frecuencia de parada “fo”. La curva de Campbell típica para para la frecuencia fundamental se puede observar en la figura 5.10.17.b

En el diagrama de Campbell de la figura 3.19 se puede observar la frecuencia fundamental presente entre los valores de 2-3/rev en su modo tangencial fundamental. El primer armónico es normalmente el primer modo tangencial, así como el segundo armónico (tercer modo) es normalmente el primero torsional. En el caso de este álabe, se tienen una frecuencia fundamental “fo0”, que aparece cuando la velocidad de giro es No, posteriormente el álabe aumenta su velocidad de giro llegando a “Nr”, donde el álabe presenta una frecuencia fundamental “fr0”. Efecto similar aparece para el resto de los armónicos. Para este álabe la frecuencia natural a la velocidad de operación se encuentra entre 2 y 3/rev entre 4 y 5 para el primer armónico y entre 6 y 7 para el segundo.

El fabricante normalmente determina la frecuencia natural en condiciones estáticas, que sirve para, mediante métodos numéricos, determinar la frecuencia natural a la velocidad de operación.

3.3.3 Propiedades de los materiales

Acompañando a la fluencia del material aparece un reblandecimiento general. Sin embargo, el cambio es normalmente insuficiente para que este sea un indicador de la aparición de la fluencia en un componente particular o región.

Estos componentes del paso del vapor son más probables que estén sujetos a altos niveles de impulso o carga de fatiga, y, por lo tanto, susceptible de fallar por fatiga de alto ciclo. Son los componentes móviles y el soporte del escalonamiento al que están sujetos. Estos son los componentes más susceptibles de sufrir daño, debido a que están sujetos a niveles de tensión altas directas y alternativas, más que los componentes estacionarios.

La curva S-N (límite de resistencia)

Esta curva representa la relación entre los parámetros que limitan las tensiones cíclicas y el número de ciclos requeridos para inducir el fallo para cada material. El diagrama, como el mostrado en la Figura 3.20, muestra el número de ciclos para fallar en función del nivel de tensión. De esta curva se puede deducir que cuando los niveles de tensión se reducen, se alcanzan unas condiciones óptimas para que no aparezca el fallo.

La curva simple S-N representa la relación básica entre la tensión principal requerida para inducir el fallo, así como el número de ciclos requeridos para que aparezca el fallo.

Aunque los fallos por fatiga se pueden iniciar en superficies lisas en la turbina de vapor debido a su modo de operación, el fallo por fatiga se inicia sobre todo en pequeñas irregularidades superficiales, donde picaduras pequeñas u otra concentración de tensiones exista y donde las tensiones cíclicas son máximas.

El punto inicial se desarrollará como una microgrieta superficial que con la carga cíclica repetitiva crecerá en profundidad en función del tiempo. Estas grietas seguirán creciendo hasta que la parte que permanece sin grietas no puede soportar las cargas cíclicas (además de cualquier carga directa) y aparezca la rotura final. La dirección de crecimiento de la grieta se encuentra influenciado por patrones de tensión, y habrá un cambio aparente en la dirección de la grieta con el tiempo. Este cambio de dirección es causado por el cambio de los patrones de tensión una vez la grieta modifica la tensión, en términos de magnitud y la dirección de los componentes a los que están sujetos, cuando se tiene menos superficie disponible para aguantar la carga total.

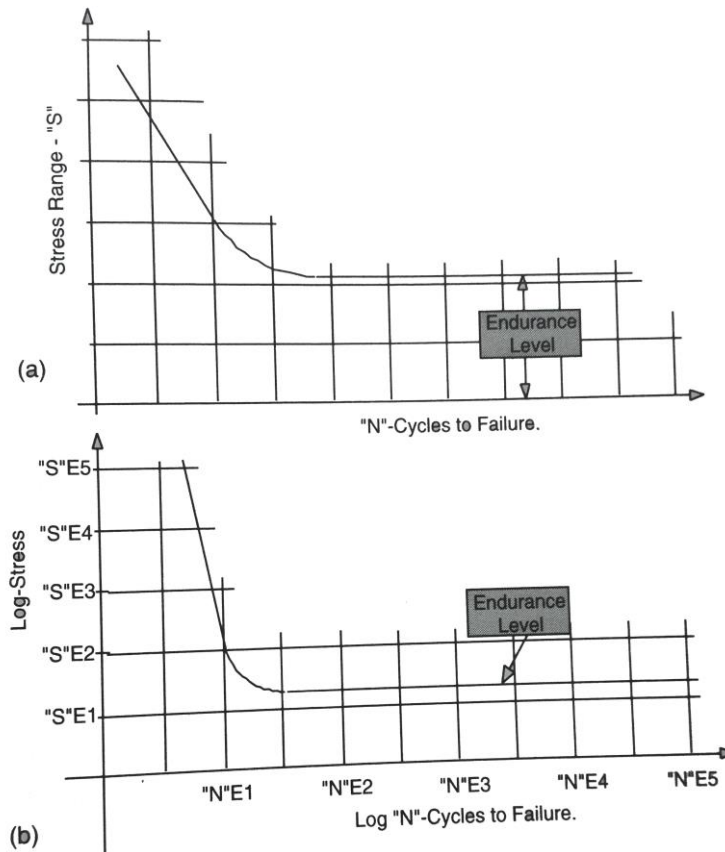


Figura 3.20 Tensión "S" a "N" ciclos para fallar, dos formas diferentes de representarlo

Factores que afectan a la resistencia a la fatiga

Debido a la dificultad o imposibilidad de mantener unas condiciones constantes y aceptables, existen un gran número de factores que pueden influenciar o modificar la capacidad del material a resistir este tipo de daño. La mayoría de estas influencias reduce la tolerancia total a la tensión.

Marcas superficiales.

En los componentes del paso del vapor es inevitable que existan irregularidades por la acción de la corrosión, impacto de partículas sólidas o erosión. Estos cráteres, hendiduras y otras irregularidades actuarán como concentrador de las tensiones locales y pueden actuar por tanto como punto de iniciación.

Concentración de tensiones

La geometría de los componentes del paso del vapor varía entre ellos. Ellos contienen cambios en la sección de paso, y cambios en el módulo de la sección de paso suficiente para introducir localizaciones donde se concentren las tensiones. Esta concentración aparece como consecuencia de la geometría, que, aunque se intenta evitar, esto no es siempre posible de forma completa.

Temperatura

Las propiedades mecánicas del material son sensibles a la temperatura. Por lo tanto, cuando cambia la temperatura de los componentes, cambia su capacidad para resistir los efectos de la carga cíclica. Hay dos aspectos de los cambios de temperatura que influyen en el daño causado por las cargas cíclicas.

- El cambio por el incremento o decremento de la temperatura modificará la resistencia mecánica del material y decrementará o incrementará su capacidad de resistir las cargas inducidas por la vibración.
- La frecuencia natural de varios componentes es función del módulo de Young del material. Por lo tanto, cuando cambia la temperatura, lo hace también la frecuencia natural. Este cambio de temperatura puede aumentar o disminuir la frecuencia fundamental y los armónicos de varios componentes, que pueden incrementar o disminuir el margen entre las fuerzas provocadas y la frecuencia natural.
-

Tratamiento térmico

Una consecuencia del tratamiento térmico es la zona afectada por el calor (“HAZ”). Muchas de las partes del paso del vapor están sujetas a tratamiento térmico (fundamentalmente soldadura) como parte de su proceso de fabricación. Además, el tratamiento térmico puede ser considerado como parte de muchas técnicas de restauración aplicado a los componentes individuales.

La zona afectada por el calor tiene tendencia a fragilizar, y por lo tanto se encuentra sujeta a las tensiones inducidas por las cargas cíclicas.

Descarburización

Es un proceso por el cual el carbono es eliminado de la superficie del material por cualquier forma de calentamiento localizado. Estas situaciones aparecen, por ejemplo, si los cordones de soldadura caliente se dejan en la superficie, o la llama viva incide sobre una superficie durante la fabricación o reparación. Una superficie descarburizada es frágil y no resistirá las cargas cíclicas tan fácilmente como los materiales no afectados.

Damping

Si un componente recibe energía en forma de impulso cercano a la frecuencia natural, y no se encuentra *damping* en el sistema, teóricamente aparece un aumento de la energía de ese componente hasta que la amplitud de la vibración alcanza las partes del componente que falla. Este fallo aparece debido a que la tensión inducida sobrepasará el límite proporcional de material del álabe a esa temperatura. Afortunadamente, durante la operación, la amplitud de la vibración y la magnitud de la tensión inducida en varios componentes se atenúa en cierta medida. Entre los principales fenómenos de *damping* se encuentran los siguientes:

- Fricción interna de material. La fricción interna del material causa una pérdida de histéresis intergranular (fricción molecular entre los granos del material). El tamaño del bucle de histéresis, y pérdidas es independiente de la frecuencia de la vibración, pero es función de la amplitud, material y método de carga (tensión, cizalla o combinación de ambas).

Tanto la estructura cristalina del material y el límite de grano influencia en gran medida la atenuación interna, así como la cantidad de deformación plástica que puede soportar.

- Movimiento del fluido. En este caso, la pérdida de energía es debido a la viscosidad del gas o del líquido contra la superficie vibratoria del sistema (las fuerzas de damping son proporcionales la velocidad). Para pérdidas por flujo turbulento el damping es proporcional al cuadrado de la velocidad.
- Acción ferromagnética. Algunos materiales, como los aceros aleados de cobre, tienen orientación del campo magnético aleatorio, cualquier partícula que atraviese este campo debido al movimiento del componente durante la vibración causa disipación interna de energía. Se manifiesta como calentamiento del material del álabe.
- Fricción seca. Si aparece cualquier movimiento relativo entre varios componentes del escalonamiento-raíz del álabe del rotor, alambre antivibración o tetones de la cubierta- aparecen pérdidas por fricción. Estas pérdidas son función de las fuerzas normales que causan el movimiento vibratorio y del coeficiente de fricción entre las dos superficies que rozan.

Tensión residual, torsión o tensión de cizallamiento. Es posible que, durante la fase de fabricación de varios componentes del paso de vapor, las tensiones residuales pueden ser inducidas inadvertidamente en ellos. Como última consecuencia de este proceso se tiene que las tensiones inducidas en los componentes incrementarán en magnitud según avance la operación de la unidad. Estas tensiones resultantes (operacional más residual), pueden ser suficientes para iniciar el fallo.

Otras condiciones existentes pueden reducir la gravedad de la fatiga. Puede ser inducida como parte de un esfuerzo consciente por incrementar la resistencia a la fatiga de los componentes, aunque otros, como aquellos de vida reducida, serán como consecuencia del proceso de fabricación.

Shot peening

proceso por el cual se realiza un tratamiento superficial del material para aumentar su resistencia a la fatiga. Esta técnica introduce esfuerzos de compresión en la cara exterior, bombardeando partículas abrasivas a alta velocidad, de ese modo requiere un esfuerzo de tensión inicial para superar el efecto de la compresión antes de

que se aplique cualquier daño por tensión.

3.3.4 Tensiones a fatiga

Hay dos tipos de tensiones que se consideran en el diseño para predecir los posibles fallos de los componentes del paso del vapor. Estas son las tensiones directas y las tensiones alternas. Las tensiones directas con la suma de todas las tensiones unidireccionales a las que los componentes están expuestos, a estas tensiones directas se le debe sumar la influencia de las tensiones alternas, que en ocasiones es en la misma dirección por lo que ayuda a aumentar la magnitud total. Por otro lado, las tensiones alternas son aquellas cuya magnitud y dirección cambia.

Para representar las tensiones del material, así como los límites de rotura que presenta, se utiliza el diagrama de Goodman.

Efecto de la modificación de la operación en el diagrama de Goodman.

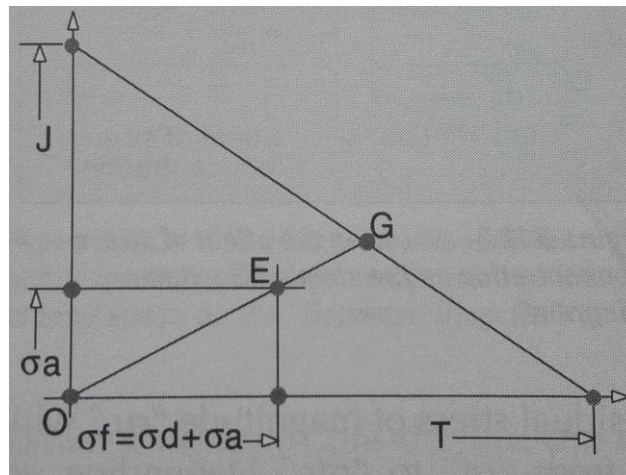


Figura 3.21 Diagrama de Goodman

Considerando el diagrama de Goodman de la Figura 3.21, se tiene el efecto de las tensiones combinadas mostradas en el punto "E" con tensión de límite de fatiga "J" y la tensión límite directa "T" en la temperatura del medio del escalonamiento. Las tensiones " τ_a " son las tensiones alternas y las tensiones directas " τ_d ", y la suma de ambas, " τ_f ". Se toma como factor de seguridad la relación "OG/OE".

Los efectos que pueden cambiar la forma del diagrama de Goodman son los siguientes:

Concentración de tensiones no planeada

Cuando aparece cualquier tipo de tensión, la tensión directa incrementará " τ_c " en la posición donde se produce la discontinuidad. La consecuencia es elevar las tensiones directas del valor " τ_f " hasta " τ_f^* ". Estas tensiones localizadas incrementarán las tensiones combinadas hasta "H", por lo que se reducirá el factor de seguridad hasta "OG*/OH" como se demuestra en la figura 3.22.

Esta concentración de daños aparecerá cuando la tensión directa no es máxima y la tensión localizada no aumentará por encima del vapor de " τ_f " por lo tanto no hay cambios en el límite de la tensión.

Tensión residual

En el caso de que se suministre con tensión residual de magnitud desconocida, que modificará la tensión directa y posiblemente la alterna, dependiendo de la posición forma y naturaleza del efecto residual.

Considerando una tensión residual de magnitud " τ_r " que ha modificado el efecto directo de " τ_f " hasta " τ_{fr} " dependiendo del tipo de tensión se representará un aumento o disminución con respecto al total, al igual que pasa con las tensiones alternas.

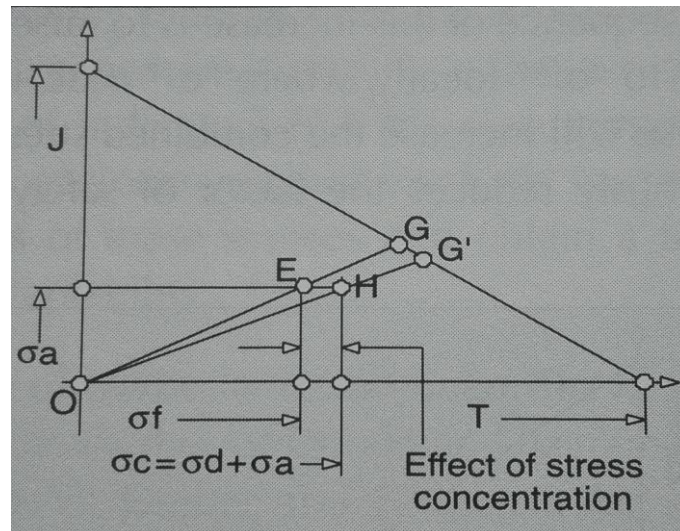


Figura 3.22 Efecto de la concentración de tensiones en el diagrama de Goodman

Por lo tanto, aparece un rango en el cual se encontrará, dependiendo de la magnitud del efecto residual. Una excepción de este caso es el “shot peening”, donde la compresión de la superficie minimiza el efecto de las altas tensiones superficiales, por lo que es un buen método para evitar el efecto de las tensiones residuales.

Cambios en la temperatura del medio. Esta modificación cambiará la forma del diagrama de Goodman. Considerando en primer lugar el efecto del cambio de presión de entrada, que supondrá un pequeño cambio en la caída de presión a través de los componentes individuales. Estos cambios serán pequeños por lo que normalmente se considerarán insignificantes.

Sin embargo, la variación de la temperatura del vapor tiene una influencia directa en las propiedades del material, y como consecuencia se tiene una modificación del factor de seguridad. Los efectos de la temperatura se muestran en la figura a las 3.23 si no existen cambios en los niveles de tensión asociados al cambio de temperatura, no se modifica el diagrama de Goodman. Los siguientes cambios en las condiciones de operación modifican el diagrama de Goodman:

- Disminuye la temperatura del vapor. Cuando la temperatura del vapor disminuye, aumenta la capacidad del material de resistir tensiones. El efecto en el diagrama es el incremento de la hipotenusa del triángulo como se muestra en la figura 3.23 El factor de seguridad incrementa hasta “OG*/OE”. Desafortunadamente, cuando la temperatura se reduce, es posible incrementar las tensiones térmicas por un periodo corto de tiempo. Este incremento, aunque de corta duración, causarán grandes tensiones que se acumularán.
- Aumenta la temperatura del vapor. En el caso del aumento de las temperaturas del vapor ocurrirá el caso contrario, la capacidad del material para resistir las tensiones disminuirá, por lo tanto, en el diagrama de Goodman disminuirá la hipotenusa del diagrama. El factor de seguridad se reducirá hasta “OG**/OE”.

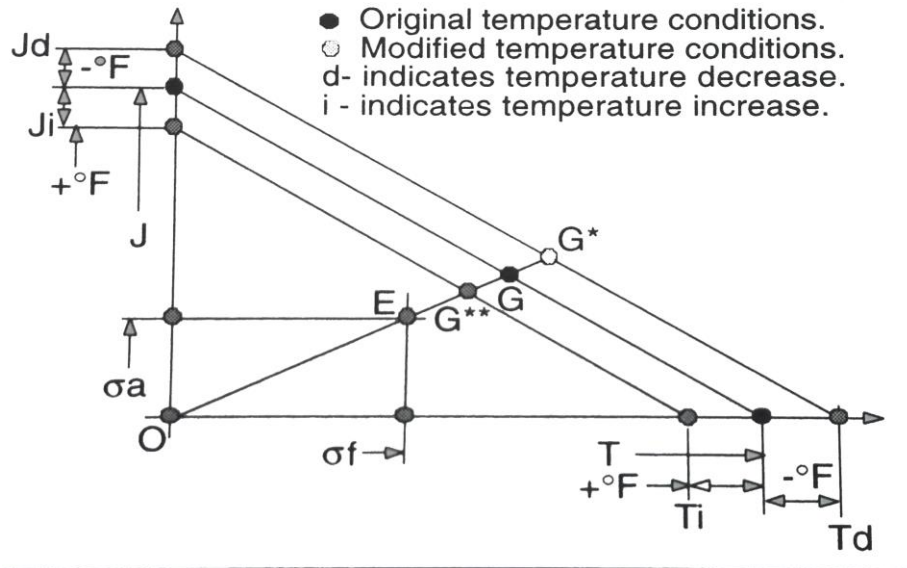


Figura 3.23 Efecto de la temperatura del medio en la modificación de las propiedades de los materiales

3.4 Desarrollo y aparición de las grietas

3.4.1 Crecimiento

La propagación de grietas debido a la fatiga de alto ciclo depende de los siguientes factores:

- Temperatura del material. La temperatura de operación tiene efecto en la velocidad de crecimiento, siendo más alta cuanto mayor es la temperatura.
- Nivel de tensiones aplicadas sobre el componente. Cuanto mayor sea la carga, más velocidad de crecimiento.
- Frecuencia de la carga aplicada. El crecimiento de las grietas es consecuencia de las tensiones en la estructura cristalina del material.
- La magnitud de la fuerza aplicada. Cuanto mayor sea la magnitud de las cargas alternativas, mayores tensiones se inducen en la grieta aumentando su velocidad de crecimiento.
- Forma de la punta de la grieta. Esto afecta al factor de intensidad de la grieta, que afecta a la velocidad de propagación de la grieta.
-

Forma de la grieta

Las grietas pueden ser intergranulares o trans-granulares. Para altas tensiones a altas temperaturas las grietas son a menudo trans-granulares, de forma similar, cuando la grieta se forma y crece durante largos periodos de tiempo. Sin embargo, para niveles medios de tensiones, la grieta es intergranular. Las grietas pueden iniciarse en rangos de bajas tensiones como trans-granular, pero una vez incrementa la intensidad de la tensión con la reducción de área o concentración de tensiones incrementada serán intergranulares.

3.4.2 Apariencia superficial con fallos a alto ciclo

En este tipo de mecanismos la superficie presentará una naturaleza cristalina. Sin embargo, cuando el componente falla tras haber estado expuesto a un transitorio normal de operación se encontrarán puntos de iniciación en la superficie donde aparecerán discontinuidades en la forma o propiedades del material, que será

suficiente para provocar la concentración de tensiones. En este punto de acumulación de tensiones se iniciará la grieta después de estar sujeta a cargas cíclicas.

En la práctica, es improbable que las cargas cíclicas continuarán sin ninguna forma de interrupción, por ejemplo, aparecerán condiciones transitorias, paradas y puestas en marcha, resumiendo, aparecerán condiciones en las que aumentan los niveles de tensión a la que los componentes están sujetos. Este tipo de tensiones causarán micro desgarros en las grietas, causando cierto nivel de fallo por tensión. La falla causada por la tensión aparece con marcas de playa características de fatiga de alto ciclo.

Estas marcas de playa son síntomas de cambios en las cargas y tensiones en los componentes. En la Figura 3.24 se muestra una parte de la raíz del álabe donde se encuentran presentes varias grietas. Estas partes de iniciación se localizan en las fisuras de “fatiga por rozamiento” que causan altas tensiones.

Las marcas de playa en las superficies de la rotura son claras, sin embargo, entre estas marcas aparecen anillos cristalinos que indican el crecimiento de las grietas desde fuera de los lugares de iniciación. Si no aparecen las cargas transitorias, las temperaturas y las velocidades que hacen que aparezca la fatiga a altos ciclos, es probable que se retrase el fallo catastrófico, aunque seguirán apareciendo eventos que forzarán el funcionamiento de la unidad.

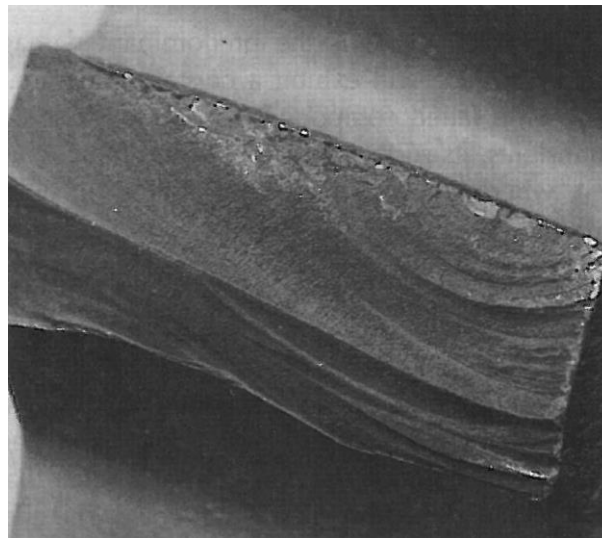


Figura 3.24 Rotura de alabe por fatiga de alto ciclo

Además, las vibraciones de cada álabe individual existen vibraciones en el conjunto de álabes. Esto es cierto si los grupos son discretos, esto es en grupos no continuos conectados a través de 360°. La figura 5.14.

3.5 Fatiga por fluencia

Es la combinación de dos mecanismos separados asociados a componentes a altas temperaturas y tensiones, además de transitorios térmicos como consecuencia de la operación.

La fatiga por fluencia se encuentra sobre todo en componente de secciones estrechas en las que la cantidad de material afectado será incapaz de absorber todo el calor mientras se realiza la expansión. En carcasas expuestas a gradientes de temperatura a través de su espesor, este fenómeno puede ser especialmente dañino. También en el rotor con grandes regiones que operan a temperaturas altas, es posible que ocurra esto, particularmente en los filetes de la raíz del álabe donde se produce una alta concentración de tensiones y cambios en la sección en la parte del tambor en las unidades de impulso.

4 DAÑOS INTRODUCIDOS POR EL AGUA EN EL PASO DE VAPOR

4.1 Introducción

El vapor que entra en la turbina tiene una gran cantidad de energía disponible. Para los ciclos de plantas fósil el vapor entra sobrecalentado y durante la expansión se convierte la energía térmica del vapor en energía cinética en el rotor. Cuando todo el sobrecalentamiento se ha convertido en energía cinética, la expansión utiliza parte del calor latente, que convierte el vapor en agua, por lo que se tiene una mezcla bifásica.

Por otro lado, en plantas nucleares o geotérmicas el vapor entra en la turbina a alta presión y saturado, con cierto grado de humedad.

Estas gotas de humedad que se han formado como consecuencia de la expansión en los ciclos mencionados deben ser eliminadas del flujo principal, debido a que su masa es mayor que la del vapor, por lo que se impide su paso a través de los álabes, al no poder alcanzar la velocidad del vapor seco.

Como consecuencia, se tiene que las gotas formadas seguirán trayectorias diferentes pudiendo impactar contra cualquier componente del paso del vapor, pudiendo incluso, depositarse en su superficie. Después de depositarse, el vapor será incapaz de volver a entrar en el flujo principal, pero seguirá experimentando los grandes campos de fuerza del flujo, haciendo fluir la capa de líquido en la dirección del flujo principal.

Estas capas de líquido tienen la capacidad de producir daños en el paso del vapor, además de reducir la eficiencia del paso del vapor.

Las fuentes de esta agua formada por condensación son el agua condensada del fluido de trabajo durante su expansión a través de las coronas de álabes móviles; el agua utilizada para enfriar la salida en baja presión cuando se trabaja a cargas parciales y cualquier parte de la unidad conectada con otro equipo del ciclo de vapor.

4.2 Condensación en el vapor expandido

La conversión una vez el vapor se encuentra en la línea de saturación, se realiza de calor latente a energía cinética, transformando parte del vapor en agua, que permanece en el vapor en forma de pequeñas partículas hasta el condensador o impacta con una superficie a la que se adhiere.

Considerando, como se muestra en el Diagrama de Mollier de la Figura 4.1, el vapor se expande desde las

condiciones sobrecalentadas “A” hasta las condiciones “D” en el que el vapor es seco y saturado, cuando se entra en la zona bifásica el cambio de gas a líquido requiere un cierto instante de tiempo.

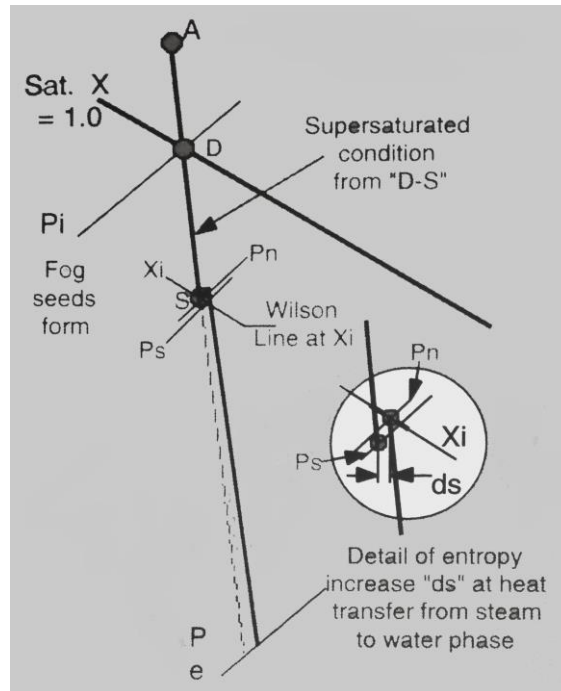


Figura 4.1 Diagrama de Mollier de la expansión del vapor

Debido a que la transferencia no se realiza de forma instantánea, la expansión continuará hacia el interior de la región húmeda sin que aparezcan gotas. En el punto “S” de la figura 4.1, se ha completado la transferencia de calor y se ha alcanzado la mezcla, formándose humedad en forma de pequeñas partículas de entre 0.5 a 1.0 micrómetros de diámetro, que son las que se depositarán sobre el paso del vapor.

Una vez se han formado estas partículas, varias fuerzas desarrolladas por el paso de vapor las influyen, incluyendo la fuerza de arrastre que intenta que las partículas de humedad alcancen la velocidad del vapor, que será incapaz de ser alcanzado debido a la alta masa de las partículas de agua, aunque seguirá extrayendo energía del vapor. Además, debido a su masa, las partículas de agua son incapaces de cambiar de dirección con tanta facilidad como el vapor por lo que seguirá una trayectoria diferente a este.

4.2.1 Formación de las gotas

Existen tres posibles maneras de formación de las gotas:

- Condensación en partículas microscópicas como impurezas contenidas en el fluido de trabajo. Esto no tiene apenas importancia en el cómputo global ya que las impurezas se encuentran muy limitadas.
- Condensación en la superficie de los componentes del paso del vapor. Para que esto suceda las partículas presentes deben contactar con la superficie a una temperatura que cause condensación. Sin embargo, la superficie metálica está cubierta por su capa límite, que suele tener una temperatura superior al vapor que la rodea. Esto se debe a energía de la velocidad del vapor en la capa límite ha sido reconvertido a energía térmica, elevando la temperatura del vapor. Por tanto, la superficie con la que tiene contacto la partícula se encuentra a una temperatura superior que el vapor que la rodea.
- Nucleación espontánea después de que se haya alcanzado un nivel límite de sobresaturación y hay suficiente tiempo para que se transfiera el calor. De esta forma se crea una gran cantidad de humedad en el vapor.

Una vez se forman las gotas, continuarán aumentando su diámetro conforme aumente la humedad.

4.2.2 Distribución radial de la humedad

De lo discutido con anterioridad, se puede considerar que, en la sección de baja presión, en la región de la línea de saturación, se encuentra una presión constante asociada a todas las posiciones radiales a través de la longitud axial del paso del vapor. Esto no es cierto. La entrada a las regiones subenfriadas está relacionada con la presión y se origina en el punto donde la expansión cruza la línea de saturación. Sin embargo, debido al gradiente de presiones en el paso del álabe, esto no es constante en todas las posiciones axiales. Si la posición del comienzo del subenfriamiento se encuentra relacionada con la presión, esta región tendrá la forma mostrada en la figura 4.2, con la humedad, cuando se forma vaho, una vez la transferencia de calor es completa a una presión inferior.

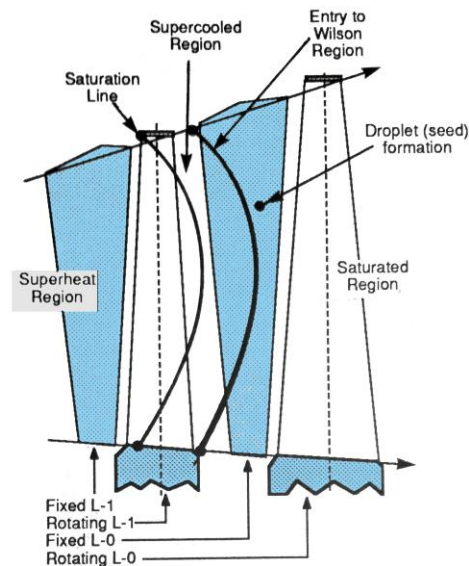


Figura 4.2 Gradiente de presiones en el escalonamiento

La posición y forma de la región de condiciones subenfriadas es influenciada por la calidad del vapor entregado a la turbina proveniente de la caldera o recalentamiento, la cantidad de flujo de vapor, la caída de calor y la configuración de los álabes.

4.3 Deposición de la humedad

Las gotas de humedad formadas en el vapor son incapaces de seguir la dirección del flujo de vapor debido a su gran masa. Por lo tanto, no serán capaces de cambiar la dirección a su paso por el álabe y colisionarán con estos, depositándose sobre varios elementos de la corona de álabes. Hay dos posiciones concretas donde se depositan: en la superficie del álabe y sobre las paredes laterales.

4.3.1 Deposición en la superficie del álabe.

En la figura 3.4.1 se muestra el vapor entre los álabes estacionarios. Estos álabes están diseñados para disminuir la presión del fluido, aumentando su velocidad, por lo tanto, la velocidad en "L" será mayor que en "K".

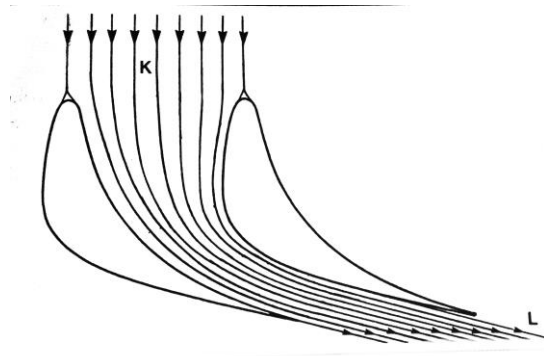


Figura 4.3 Líneas de corriente a través de álabes del estator

Ahora, se considera la gota "G" de la figura 4.4 sobre la línea de corriente "G-G". una vez la gota entra, se acelera tanto el vapor como las gotas, sin embargo, debido a su gran masa, las partículas de humedad son incapaces de alcanzar la misma velocidad que el vapor, siguiendo la trayectoria "G-M". La gota finalmente impactará con la cara de presión permaneciendo en esta, incapaz de volver al flujo principal. Se puede observar que toda la humedad del perfil de entrada y la posición "G", siendo transportada por el vapor y depositada en la superficie del perfil.

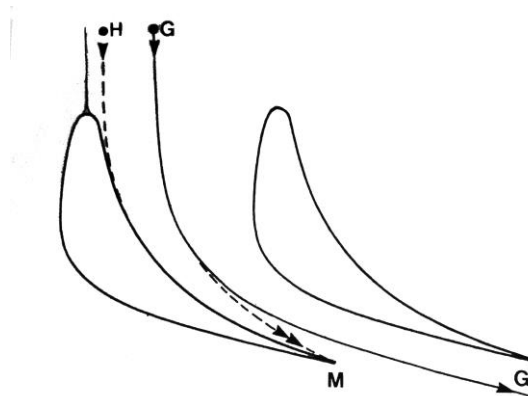


Figura 4.4 Trayectoria de la partícula de humedad

Debido a la fuerza que ejerce el vapor sobre las gotas de humedad depositadas, la humedad formará una capa que se extenderá por todo el perfil hasta el punto "M" en la descarga. El espesor de la capa de agua incrementará encontrándose el máximo espesor en el borde de estela (punto "M").

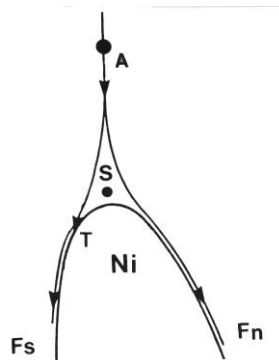


Figura 4.5 División del flujo en el ataque del perfil

Se considera la mezcla de vapor y humedad en la zona del borde de ataque. Aquí, el flujo deberá dividirse en dos, uno recorriendo la cara de presión y el otro la cara de succión, esta división depende de las partículas de vapor y humedad en el perfil de la cara de succión. Una parte de las partículas de humedad no pueden cambiar rápidamente de dirección impactando con el perfil en el punto "T", donde fluirán por la cara de succión. En la cara de presión, las partículas de humedad son incapaces de evitar el borde de ataque son añadidas a estas

deposiciones, como se muestra en la Figura 4.4 Estas dos fuentes representan las gotas en la cara de presión “Fn”.

En el punto cercano al borde de ataque donde el flujo se empieza a dividir, la velocidad del vapor se puede ralentizar conforme impacta con el borde de ataque. Asociado a este decremento de la velocidad se encuentra un pequeño incremento de la presión local del vapor, creando un punto de estancamiento “S”. El Diagrama de Mollier de la figura 4.6 muestra esta posición con las condiciones de entrada “A” en la línea de expansión “A1-A2”. Se observa que con el incremento de presión “dp” se produce un incremento de entalpía “dH” así como un incremento local de la temperatura dT. Esto provocará un incremento de la temperatura del borde de ataque.

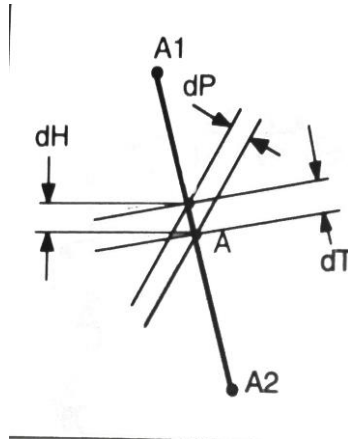


Figura 4.6 Condiciones del vapor a la entrada del álabe

En el borde de estela, como denota el punto “M” de la figura 4.4, la humedad se acumulará, pero no podrá permanecer debido a la fuerza ejercida por la alta velocidad del flujo de vapor. Considerando el borde de estela de la figura 4.7, el vapor se expande por el paso entre los álbes, descargándose en la garganta (área mínima) mostrada como “O-O”, con velocidad “Cs”. En este punto la humedad sale de la influencia del perfil. En la descarga de la garganta, la capa límite en la cara de succión continuará adherida al perfil hasta que se alcance la separación en el punto “Se”. El vacío causado por la separación desprenderá vórtices que serán transportados hacia la siguiente corona. Esta región de vórtices es una región de baja presión, lo que quiere decir que la humedad recogida será arrastrada hasta el borde donde se acumula en la cara de succión, formando pequeños charcos, “Q”.

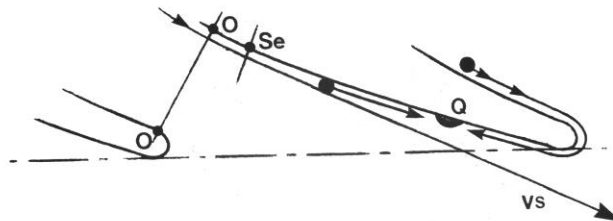


Figura 4.7 Flujo del vapor por el borde de descarga y recogida en la cara de succión

La acumulación de la humedad continuara en “Q”, zona de baja presión, hasta que sea lo suficientemente grande para resistir las fuerzas de arrastre del vapor, que volverán a entrar en el flujo de vapor principal en forma de grandes gotas. Debido a que las gotas del borde de estela no son de gran tamaño, serán arrastradas por el flujo principal en forma de pequeñas gotas, pero que serán cien veces más grandes que las originales, alcanzando un tamaño suficiente para producir erosión por impacto en el borde de ataque de los álbes del rotor.

La forma en la que se depositan en los álbes del rotor es prácticamente igual que en la del estator, con diferencias en los patrones de acumulación. Las consideraciones físicas que influyen estas deposiciones son las siguientes:

- En primer lugar, las fuerzas centrífugas asociadas a los álbes, que tienen como consecuencia un mayor flujo radial sobre la superficie del álabe.

- La forma del paso será diseñada para niveles bajos de reacción, y, por lo tanto, la caída de presión será menor. En los escalonamientos de lata presión de plantas nucleares, que normalmente es de acción, la forma del paso tendrá un grado de convergencia pequeño.
- En los álabes móviles del escalonamiento de acción, la velocidad tiende a disminuir en lugar de incrementar a través del paso del vapor.

4.3.2 Deposición sobre las paredes laterales

La expansión a través del paso de vapor tiene como resultado la deposición de la humedad en este.

Considerando la corona de alabes estacionarios mostrando las líneas de agua a través de los componentes radiales mostrados en la figura 4.8.a. La parte exterior de las gotas de agua se depositan sobre las paredes laterales exteriores, punto R del diagrama. Después del impacto, el agua fluirá a través de la pared exterior hasta que alcanza el punto de descarga del diafragma, del que se desprenderá hacia los álabes del rotor o hacia la cara vertical del diafragma y a través de la carcasa. De forma similar aparece para diafragmas con paredes laterales oblicuas mostrada en la figura 4.8.b.

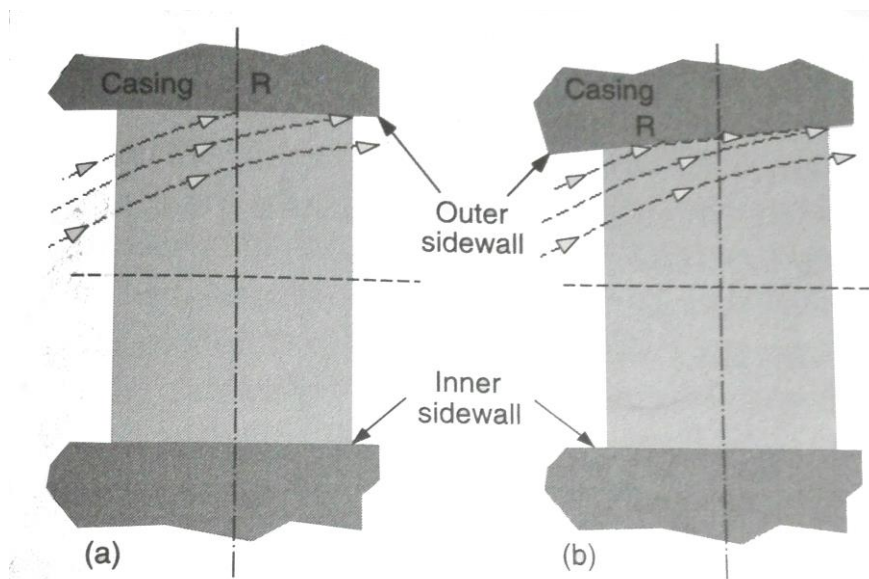


Figura 4.8 deposición de la humedad y flujo hacia las paredes laterales exteriores de una corona de álabes estacionarios

El mecanismo de deposición es impredecible, en el caso de los álabes del rotor, tan rápido como la humedad se deposita en la superficie del álabes, experimentará altas cargas centrífugas, causando el movimiento de la humedad hacia a fuera a través del cuerpo del álabes. Este efecto se muestra en la Figura 3.4.7 donde la humedad se deposita en las posiciones “R1... R4”. Desde aquí fluye hacia afuera, hacia la parte exterior de la cubierta. En estas partes, la humedad experimenta los efectos combinados de las fuerzas centrífugas y la velocidad del vapor, teniendo como consecuencia un aumento importante de su componente radial. En la cubierta, el agua fluirá en la dirección axial, entrando en contacto con la superficie interior de la carcasa. Esto continuará hacia la posición “Z”, el punto de descarga, donde será centrifugado hacia fuera de la carcasa o algún dispositivo de recolección de la humedad.

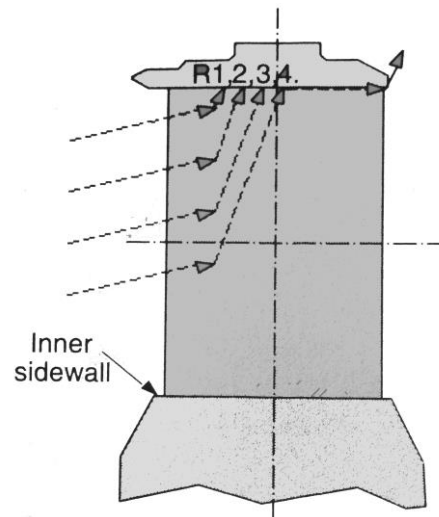


Figura 4.9 Patrón de deposición de la humedad y su flujo a la carcasa en álabes del rotor

Normalmente no se deposita humedad en la pared interior, aunque es posible que alguna pequeña cantidad entre en contacto con esta. Tan rápido como la humedad se haya depositado, experimentará una gran fuerza centrífuga, fluyendo hacia la parte exterior. En algunas circunstancias, el agua se desprenderá de la raíz del álabe. Este flujo hacia afuera, siendo imposible predecir la dirección de cualquier flujo. Esta cantidad será pequeña y tendrá poca importancia.

4.3.3 Flujo de agua a través de la carcasa

La centrifugación del agua añade continuamente una capa de agua en la superficie interior de la carcasa, que fluye desde las zonas de alta presión a las de baja.

El “windage” también influencia en los álabes del rotor, desarrollando fuerzas que intentarán forzar el vapor en las paredes laterales, sobre los álabes del rotor para tomar la misma dirección que la rotación de los álabes. Este efecto tendrá consecuencias únicas.

Será necesario por tanto considerar la instalación de puntos de velocidad de la humedad en el paso del vapor.

4.4 Daño inducido por la humedad

Las formas más comunes de daños son las siguientes:

- Erosión por impacto de la humedad. Aparece en el borde de ataque en la superficie de succión de los álabes, en su región exterior. Esto aparece como consecuencia de las altas fuerzas entre las partículas de humedad y el álabe.
- Erosión del borde de estela. Se tiene como consecuencia de la recirculación del vapor y agua hacia los álabes del último escalonamiento.
- Erosión por laminado. Daño que aparece cuando la humedad es forzada a pasar entre las juntas, eliminando parte del material de estas.
- Erosión por lavado. Este tipo de daño aparece cuando se pierde material a causa de las altas velocidades del agua, posiblemente a alta presión del vapor.

4.4.1 Erosión por impacto de la humedad

Para que aparezca este tipo de erosión, la humedad debe acumularse en gotas largas, que, durante el paso entre los álabes, se deposita sobre varios elementos, pasando sobre sus superficies. El agua fluye como una capa a través de la superficie en regiones donde la capa se colecta en charcos más grandes, que normalmente vuelven a entrar al flujo principal moviéndose a una velocidad menor.

El vapor que vuelve a entrar proviene de la parte estacionaria, causando erosión por impacto, colisionando con

la primera fila de alabes del rotor.

Mecanismos de erosión por impacto y pérdida de material.

Las gotas formadas en el paso de vapor no son demasiado largas para producir daño por erosión con la superficie metálica de los elementos del rotor. Estas pequeñas partículas de humedad por lo tanto se agregan a gotas de mayor tamaño antes de que las fuerzas de impacto sean desarrolladas entre ellas y los álabes móviles son suficientes para causar rotura y pérdida de material. La capa de agua que recorre la cara de presión del álabe estacionario es extraída alrededor del borde de descarga hasta la región de baja presión de la corona. Esto se debe a la separación de la capa límite en la cara de succión del perfil, en o cerca del paso por la garganta, y la baja presión inducida por esta región. En este punto la capa se mezcla con pequeñas partículas de agua que fluyen a través de la cara de succión. En el borde de estela de la cara de succión, el agua es recogida en gotas más grandes hasta que finalmente se desprende de esta posición y se transporta a la siguiente corona de álabes del rotor, como se muestra en la Figura 4.7.

Estas gotas, que vuelven del borde de estela de los álabes estacionarios, causan erosión por impacto en el borde de ataque de los elementos del rotor. Debido a su gran masa, estas gotas, una vez se desprenden por las fuerzas de arrastre del vapor de la cara de succión, aceleran, sin llegar a alcanzar la velocidad de vapor, que es considerablemente alta en la región de descarga. Por lo tanto, su impacto con el borde de ataque de los álabes del rotor se produce en un ángulo oblicuo.

Métodos de protección.

Los métodos de protección utilizados contra la humedad consideran dos principios fundamentales de forma simultánea: en primer lugar, la recolección y drenaje de toda la humedad posible, que se encuentra presente y se deposita sobre los elementos de la turbina y, en segundo lugar, la deposición, producción o unión sobre la superficie del cuerpo del álabe que son más afectados (una capa de material resistente que es capaz de resistir a las fuerzas de impacto desarrollados por las gotas de agua).

Un tercer método es el incremento de la distancia axial entre la descarga de los álabes estacionarios y la entrada de los álabes del rotor. El incremento del hueco permite una mayor distancia y por lo tanto más tiempo para que las gotas de vapor se aceleren hasta la velocidad del vapor, reduciendo la diferencia de velocidad relativa a la de los álabes. Este método no se suele emplear, ya que el coste de incrementar la longitud axial (comparado con la pérdida de eficiencia) tiene más importancia que la compensación de cualquier reducción de la erosión.

Resistencia a la erosión del borde de ataque del álabe.

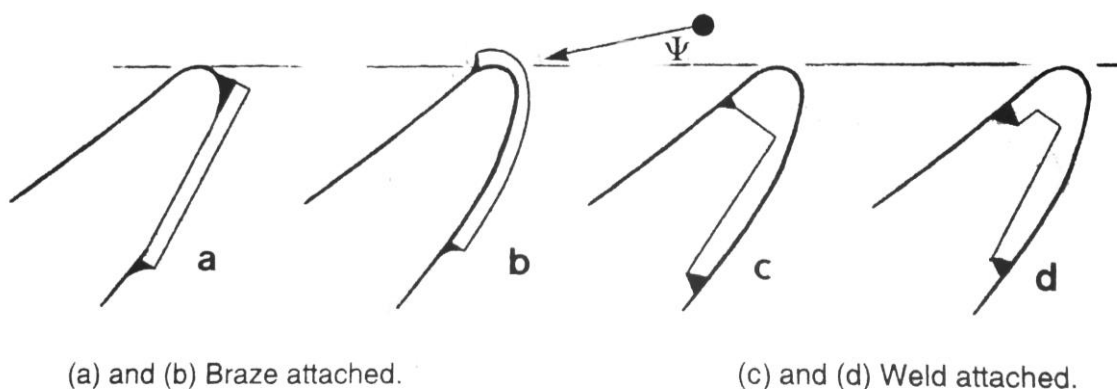


Figura 4.10 Formas de la capa protectora de metal resistente

El método más utilizado para la protección a la erosión es producir en el borde de ataque, en la zona sujeta a erosión una superficie resistente por endurecimiento. Hay varios métodos para producir este tipo de superficie:

- Soldadura blanda de material resistente. La soldadura de una capa protectora es el elemento de protección más usado. La protección puede ser de numerosas formas. En la figura 4.10 se muestran cuatro de las posibles. La forma de protección se elige para proporcionar protección y preservar la forma aerodinámica del álabe. En las figuras 4.10 a y b se tienen protecciones de diseño simple y no se

preocupan en mantener la forma aerodinámica del álabe, por lo que se encontrará cierto grado de separación de la capa límite y consecuentemente una pérdida de eficiencia. En la figura 4.10.c y d se emplean unas formas más complejas encajadas en cavidades o especialmente diseñadas para la ranura del álabe, estos diseños mantienen la forma del ataque del perfil.

Se pueden encontrar dificultades en las soldaduras blandas, si el procedimiento no se sigue con rigurosidad. El punto de fusión de cualquier material capaz de ajustarse al álabe se encuentra cercana a la temperatura austenítica del material del álabe, por lo que un fallo controlando la temperatura puede causar la fragilización del material, en cualquier momento que se sobrecaliente, lo que puede concluir con el fallo último del material.

Para soldaduras blandas, la cobertura se puede desprender durante la operación si los puntos de soldadura no son adecuados. El desprendimiento deja el material del borde de ataque del material expuesto, y por lo tanto sujeto a una velocidad brusca de pérdida de material.

Otro problema asociado a este tipo de soldadura ha sido el impacto de la humedad en la propia soldadura.

- Soldadura por fusión de material resistente. El control del proceso de soldadura por fusión es crítico, ya que se pueden encontrar grietas en la zona afectada por el calor (HAZ) del álabe o de la cobertura protectora y aunque la mayoría de estas grietas alcanzan hacia el borde de ataque, algunas se dirigen hacia el material principal del alabe, por lo que estas grietas requieren acciones correctoras.
- Endurecimiento térmico. Se llega al endurecimiento térmico mediante el uso de incidencia directa de las llamas o inducción del calor del material del álabe. Con este tipo de sistema de endurecimiento el control del proceso estricto, siendo obligatorio una observación estricta del procedimiento. Si no se controla, las grietas pueden iniciarse en las zonas afectadas por el calor, causando el desprendimiento de parte del álabe.
- Endurecimiento mediante laser. Un desarrollo más sofisticado es el endurecimiento del material del álabe mediante el uso de un láser.

Erosión secundaria (concentrada)

Si se revisa un álabe que ha estado funcionando en la región húmeda durante un largo periodo de tiempo, hay a menudo regiones donde la profundidad local de la erosión es mucho mayor que el material de alrededor. Este daño localizado, de mayor importancia es causado por la aparición de puntos donde se retiene la humedad en diferentes localizaciones en el paso del vapor. En estos puntos, la humedad se retiene hasta que de repente es arrastrado por el flujo principal de vapor, o por la acción centrifuga, causando la erosión acentuada en los siguientes álabes del rotor. La figura 4.11 muestra este tipo de erosión.

Una especial atención al detalle durante la fase del diseño puede ayudar a reconocer las posibles formas de daño, siendo posible la eliminación o minimización del daño.

En un escalonamiento bien diseñado, no existe la necesidad de cambiar los álabes durante las 200 000 horas de vida bajo operación normal debido a erosión por impacto de la humedad. Sin embargo, la erosión concentrada puede forzar una parada larga de la unidad, requiriéndose el recambio de la corona afectada.



Figura 4.11 Erosión concentrada secundaria

Erosión lejos de la región protegida.

Durante la fase de diseño, se predicen los requerimientos dimensionales de la capa de protección, a partir de la operación del escalonamiento, anticipando las condiciones en las peores condiciones posibles. A partir de estos datos se hacen predicciones de las posibles erosiones, el nivel de aparición sobre los álabes, y por lo tanto el recubrimiento de la capa protectora.

Los álabes de baja presión se diseñan para un amplio rango de condiciones, una gran variedad de condiciones de entrada al escalonamiento y un amplio rango de cargas. Los álabes finales de baja presión están sujetos a un amplio rango de probabilidades de impacto de la humedad. Los requerimientos de protección para los últimos escalonamientos son diseñados para soportar todos los rangos de vapor y agua en los álabes del rotor y son normalmente diseñados para ser adecuados bajo las condiciones más severas que se pueden encontrar. Sin embargo, es común que la unidad experimente unas características de operación únicas, que pueden causar patrones de operación, que pueden causar patrones inusuales de pérdida de material. Estas situaciones únicas pueden causar una protección inadecuada y puede aparecer erosión poniendo en peligro la capa protectora o los álabes.

Cuando la unidad se abre para la inspección y mantenimiento, se debe examinar la profundidad de la erosión de los álabes, al igual que la erosión lejos de la capa protectora. Si se consideran que los daños ingresan pudiendo afectar a la fiabilidad de la unidad, las condiciones deben ser controladas mediante medidas, moldes o fotografías. Este control se debe realizar de forma que se pueda predecir y juzgar los posibles daños, esto, aunque subjetivo, sirve para indicar cuando se pueden necesitar acciones correctivas. Se deben planear y ejecutar dichas acciones sobre el álabe antes de que este sea destruido. La destrucción del álabe no es en sí misma catastrófica, sin embargo, el daño consecuente puede ser muy costoso de reparar.

Hay varias formas de erosión lejos de la región protegida:

Mas allá de la capa protectora. En este caso la erosión por impacto tiene lugar por encima o por debajo de la capa protectora en el material base del álabe. Este tipo de daño se muestra en la figura 4.12. A menudo, esta erosión es leve y por lo tanto, no pondrá en peligro la integridad del álabe. Este tipo de daño se suele encontrar en horas iniciales de vida de la unidad (antes de las 10 000 primeras horas de operación) y aparece en una o dos posiciones radiales, siendo aconsejable, por tanto, controlar las condiciones de protección de esta región, ya que puede ser síntoma de aparición de erosión acentuada o secundaria.

Esto también es posible con la protección mediante soldadura blanda, que empieza detrás de la protección. Este tipo de erosión no se debe confundir con la erosión del material.

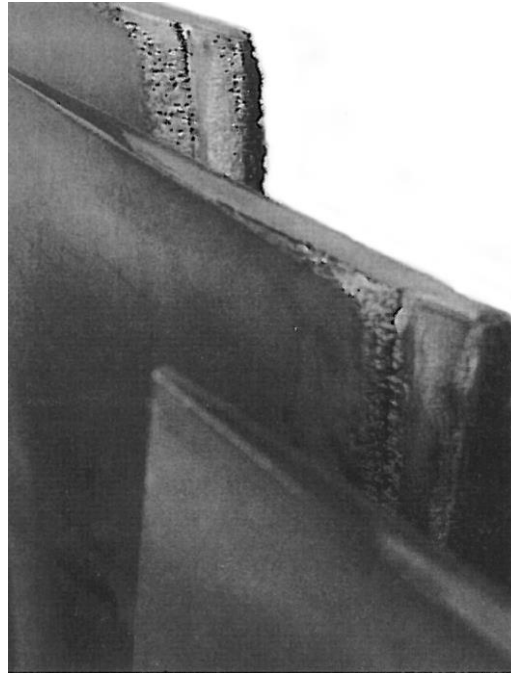


Figura 4.12 erosión por encima de la capa protectora

Debajo de la capa protectora. Normalmente, no aparece erosión por debajo de la velocidad límite tangencial del álabe de 800-850 pies/segundo (diámetro de 50'' a 3600 rpm). La protección se diseñará teniendo en cuenta el punto del perfil en el que esta velocidad no se puede alcanzar. Hay ocasiones en las que la erosión se localiza debajo de la capa de protección, progresando hacia el material del álabe en la medida en la que la capa protectora esté deteriorada. En consecuencia, pueden producirse daños graves debido a la concentración de tensiones causadas por la pérdida de material, que puede causar la modificación de la frecuencia natural de los álabes hacia rangos peligrosos. En este tipo de situaciones como la mostrada en la figura 4.13 será aconsejable considerar si la modificación de los patrones del flujo de vapor puede modificar la humedad incidente sobre los álabes ayudando a solventar el problema.



Figura 4.13 Erosión por debajo de la protección contra erosión

Erosión entre partes de la capa protectora. Para muchas unidades, sobre todo aquellas con un diseño antiguo,

se utilizan capas protectoras divididas en dos o más partes individuales. En las juntas de unión de dichas partes es posible que aparezca erosión continuada hacia el cordón de soldadura o el material del álabe. La protección se dispone en general en la dirección radial por lo que las partículas de humedad causan menos daño en esta dirección. Sin embargo, este tipo de daño puede aparecer. En la figura 4.14 se muestra una forma extrema de este tipo de erosión, donde la parte exterior de la protección se ha desprendido y la resultante penetración de la erosión en la parte exterior del álabe.



Figura 4.14 Erosión sobre el material base del álabe después de la pérdida de la capa de protección

Si este tipo de daño, como el mostrado en la figura 4.14 aparece, puede afectar al balance del eje, la masa que se elimina del diámetro exterior tiene una gran relevancia en el efecto cinético del balance.

Erosión de la cara de presión. Cuando un escalonamiento transporta una gran cantidad de humedad, es posible que alguna partícula de humedad rebote después del impacto con cara de succión en el borde de ataque, pudiendo impactar con la cara de presión adyacente causando pérdida de material. Este tipo de efecto de rebote puede presentarse desde la partícula de humedad que impacta con las paredes de la carcasa u otras partes del paso del vapor, rebotando en los álabes. Por lo general, estas condiciones no son peligrosas. Sin embargo, si aparecen acompañadas de una penetración importante en el material del álabe de la cara de succión o pérdida de material en la capa protectora, dependiendo de la forma de esta, que puede causar debilitamiento de la unión pudiendo provocar el desprendimiento de la capa protectora.

Erosión de la cubierta. Una forma de erosión secundaria que puede aparecer en la punta del álabe, debido a la concentración de humedad. Esta humedad independientemente de l radio exterior de los álabes estacionarios o el diafragma. En este caso, las gotas de humedad pueden ser transportadas hacia los álabes del rotor e impactar con la superficie inferior de la cubierta o el borde de ataque de la parte de la cubierta. En algunos escalonamientos puede resultar en la debilitación de los tetones de unión con la cubierta. Este efecto puede causar la debilitación de la cubierta, como se muestra en la figura 4.15. Este tipo de daño tiene la capacidad de convertirse en grave, por lo que requerirá la sustitución o reparación de toda la cubierta.

Si este fenómeno se produce en los instantes iniciales de operación, se puede mitigar en cierta medida, redondeando el borde de estela de los álabes estacionarios o el diafragma. Esto es efectivo solo en la medida en la que el vapor sea capaz de transformar la humedad por encima de la punta del álabe y pasar cualquier punto de restricción de fugas que se encuentran presente. Acciones como el redondeo del borde de descarga de la pared, provocando que el agua y el vapor sean transportados hacia la región exterior de la carcasa, baipaseando el álabe, reduciendo, por tanto, el nivel de impacto de la humedad. Redondeando el borde de descarga del diafragma se tendrá un efecto adverso en la eficiencia del escalonamiento, sin embargo, esta pérdida es relativamente pequeña. No es aconsejable utilizar este método si los álabes del rotor tienen sellos radiales a su alrededor, ya que pueden suponer una pérdida adicional de eficiencia, así como el daño de los sellos.

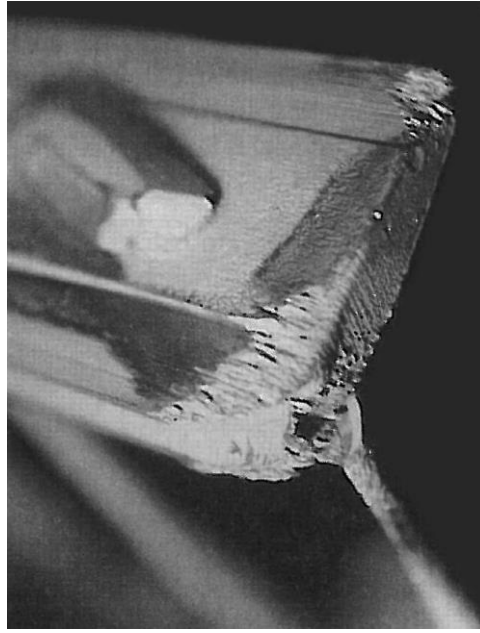


Figura 4.15 Erosión sobre la cubierta

Erosión de los tetones. En cualquier momento puede encontrarse una concentración importante de humedad por encima de la cabeza de los alabes, por lo que es posible que los tetones se erosionen como se muestra en la figura 4.16.

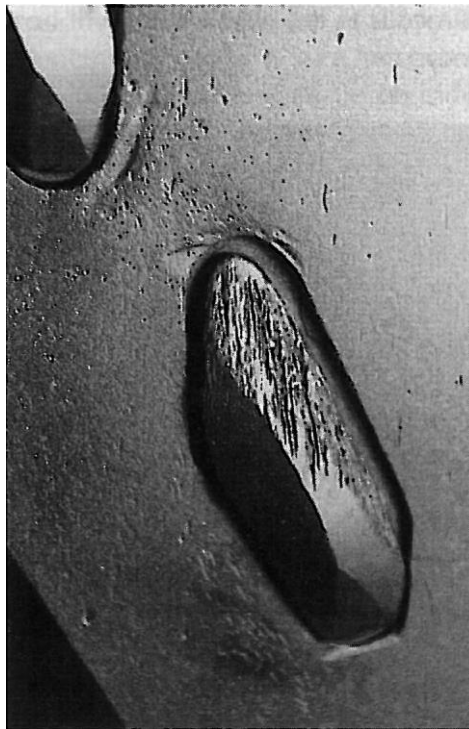


Figura 4.16 Erosión sobre los tetones

La pérdida de material de la cabeza del tetón reduce el área del remache, lo que tendrá un efecto negativo en la integridad del tetón conforme la unidad cumpla años. La erosión es menos dañina en los tetones remachados con la cabeza redondeada “*fox-holed*”.

Penetración de la erosión y tiempo.

La penetración de la erosión no tiene una relación lineal con el tiempo. La relación se muestra en la figura

4.17, donde se representa la penetración de la erosión “e” en función del tiempo de exposición en años. En la penetración de la erosión se pueden considerar tres fases. La fase inicial “A”, que hace referencia al periodo de incubación y depende del material, aunque por lo general suele ser durante un corto periodo de tiempo. La segunda fase comienza con el punto “S”, donde aparece una pérdida de material durante un periodo alrededor de 7 000 y 10 000 horas de operación. La penetración de la erosión alcanza la profundidad “ε” durante este periodo, apareciendo la superficie erosionada característica. La zona terciaria “T”, es relativamente lenta, acercándose a una relación lineal. Durante este periodo, la penetración aumenta desde “ε” hasta “2 ε” en unos 7 a 10 años si las condiciones de operación son continuas.

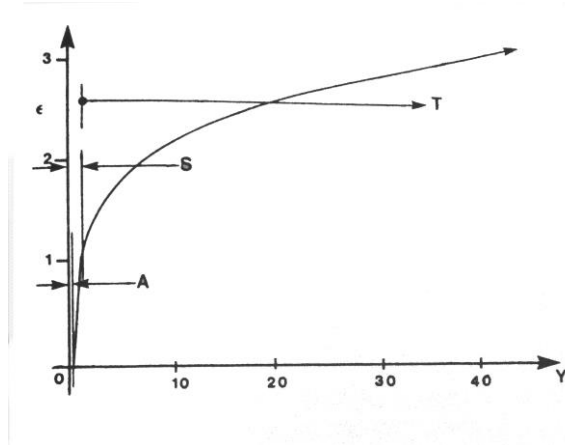


Figura 4.17 Relación entre la penetración de la erosión y el tiempo

Debido a que la profundidad de la erosión depende del tiempo, se pueden producir las curvas para la unidad, en operación continua, bajo las mismas condiciones del vapor con valores aproximados del factor de carga.

Clasificación de la gravedad de la erosión.

En un esfuerzo por cuantificar la erosión, se definen siete niveles, donde el nivel cero indica que al menos el 75% de la entrada del álabe no ha recibido daño. Se podrá encontrar decoloración o deposición química en la superficie, sin pérdida de material debido al impacto de la humedad. La figura 4.18 muestra perfiles con los diferentes niveles de daños que se pueden encontrar, con sus respectivos niveles de penetración.

Control del daño

El daño y pérdida de material aparece en las partes exteriores del álabe, pero sin afectar a la fiabilidad de este. Esto es verdad en la medida de que la erosión aparecen la entrada de la cara de succión. Se encuentra, sin embargo, ciertos aspectos de la pérdida de material de la erosión secundaria que pueden ser importantes y requieren cierta acción correctiva como la erosión excesiva de la capa protectora, la debilitación por erosión de los tetones de la cubierta, la erosión acentuada por encima o por debajo de la protección de la erosión y la erosión que pone en peligro la capa protectora.

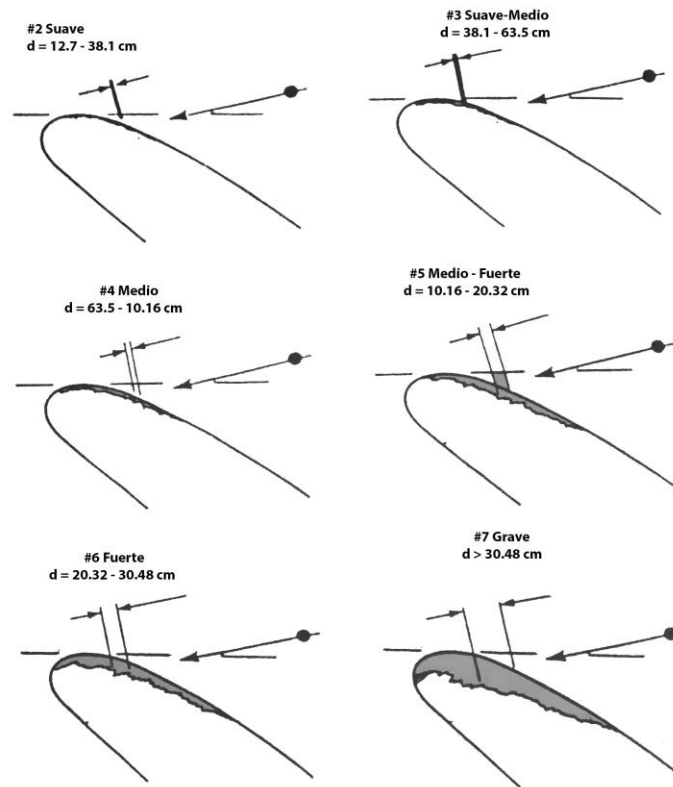


Figura 4.18 Niveles de profundidad causados por el impacto de la erosión

Erosión de los álabes del último escalonamiento y presión del condensador

La erosión por impacto del vapor que aparece en un escalonamiento es función de la cantidad de agua que impacta en el borde de los álabes. La cantidad de agua presente en el vapor viene determinada por las condiciones de este, dadas en el Diagrama de Mollier. Algo que no parece obvio es que el contenido en humedad a la salida del escalonamiento, que es función de la presión que mantiene el condensador, tiene un efecto mínimo en la erosión por impacto, llegando a ser nulo. Esta erosión es función del contenido en humedad a la entrada en la corona de álabes del estator, donde permanecerá, concentrándose hasta que descarga hacia los álabes del rotor causando el daño. La figura 4.19 muestra un Diagrama de Mollier donde se indican las condiciones del vapor a la salida del escalonamiento.

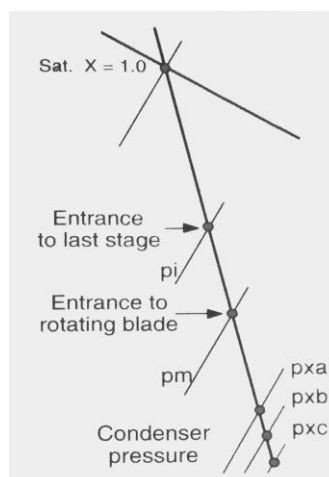


Figura 4.19 Efecto de variar la presión en el condensador

4.4.2 Erosión de los bordes de estela

Se ha encontrado erosión en la cara de succión en ciertos álabes del último escalonamiento. Este daño aparece en el borde de estela y se localiza en la parte interior, normalmente empezando en zonas cercanas a la raíz del álabe. El daño se inicia en zonas cercanas al borde de estela (de unos 7.6 hasta 12.7 cm), haciéndose progresivamente más intenso hacia la descarga.

Esta pérdida de material es de tipo raspado, como se muestra en la Figura 4.20. La mayoría del daño que aparece en el borde de estela se hará más fina hacia su borde de estela. Este tipo de reducción de espesor incrementará las tensiones directas por la reducción de área de soporte, introduciendo concentración de tensiones debidas a las muescas. Esta será una zona sensible a la tensión, en cuya posición se inician las grietas, desembocando en el fallo. El borde de estela en la sección de la raíz es uno de los puntos donde se encuentran tensiones de tracción relativamente altas y además estarán sujetas a esfuerzos de flexión de gran magnitud. Las cargas vibratorias o dinámicas pueden ser altas en esta región.

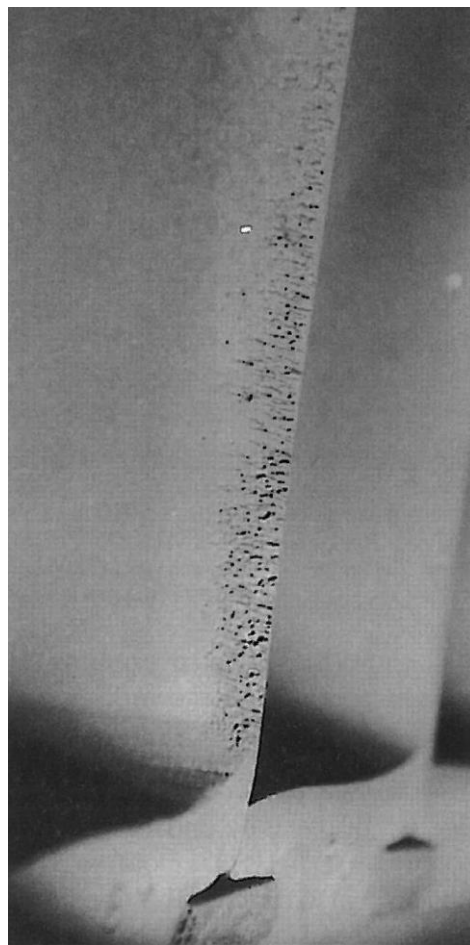


Figura 4.20 Erosión del borde de estela de un escalonamiento L-0

La figura 3.9.2 muestra un daño similar. En este caso se ha iniciado una grieta en una posición difícil de ver, en la cara de succión e incluso difícil de detectar mediante métodos no destructivos. Sin embargo, esta grieta penetra a través del espesor del borde de estela y se identifica por el tinte rojo utilizado para identificar las grietas sobre la cara de presión, mostrado en la Figura 3.9.3.

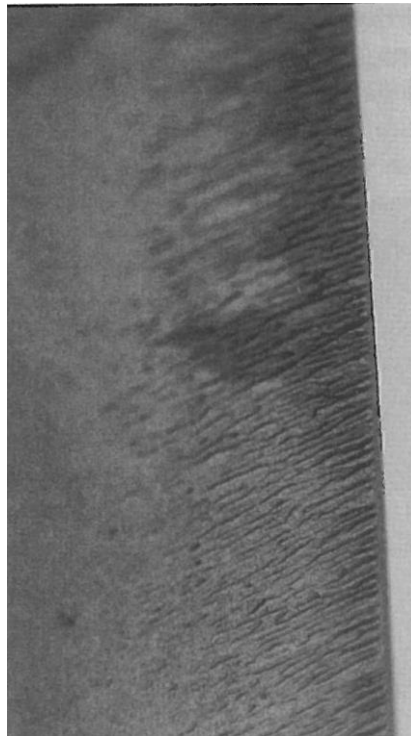


Figura 4.21 Erosión en el borde de estela con muescas características

Uno de los mecanismos que producen esta pérdida de material consiste en que las partículas de humedad vuelven a entrar en los álabes del último escalonamiento, en las zonas adyacentes a la raíz. Esto aparece solo cuando la fuerza del vapor es pequeña e insuficiente para impedir la recirculación del fluido.

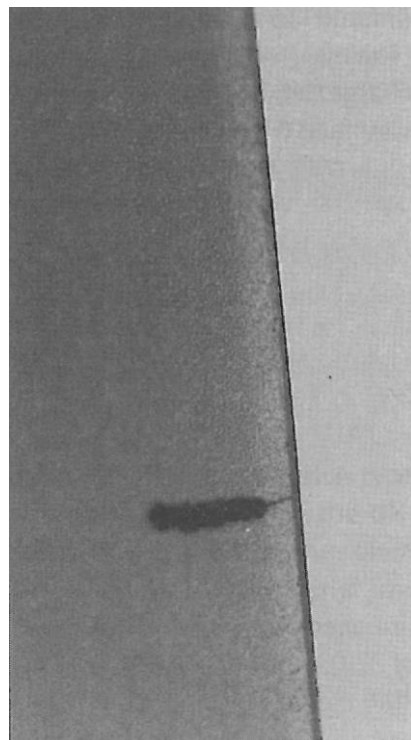


Figura 4.22 Cara de presión del álabes de la figura 4.21 en el que se visualiza la grieta mediante un tinte rojo

Recirculación sobre la sección de raíz.

A plena carga, en la descarga del último escalonamiento el fluido de trabajo atraviesa por completo la sección de paso. En la figura 4.23 se representan las líneas de corriente del fluido en esta situación. La densidad del fluido influenciará la forma de las líneas de corrientes y la presión de salida, que tiene influencia directa en el

volumen específico. Estos dos parámetros establecen el flujo volumétrico en el anillo. La densidad del flujo se establecerá mediante consideraciones económicas.

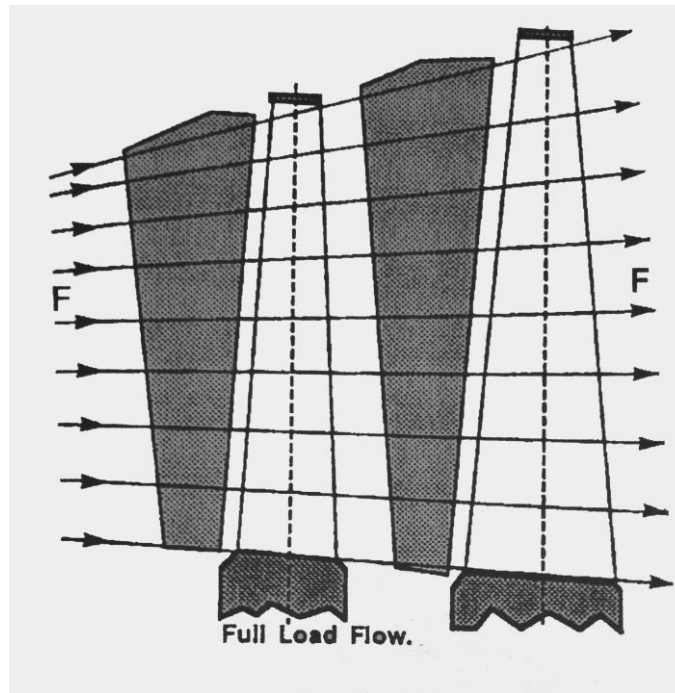


Figura 4.23 Líneas de corriente cuando pasa completamente la sección

Cuando la carga se reduce, se alcanza un punto en el que el flujo, bajo la influencia de la componente radial del vapor, hacia las regiones exteriores. No se encontrará flujo a través de la sección del álabes cercana a la raíz. En este y más bajos flujos volumétricos del vapor, una región de baja presión se desarrollará en esta zona, llegando a tomar un valor negativo, en la región de la raíz, provocando la inversión del flujo hacia el anillo de alabes del rotor, como se muestra en la figura 3.9.7. Este vapor, una vez entra en el paso entre los álabes, es bombeado radialmente hacia afuera, bajo los efectos de la rotación y forzado hacia la parte exterior de los álabes.

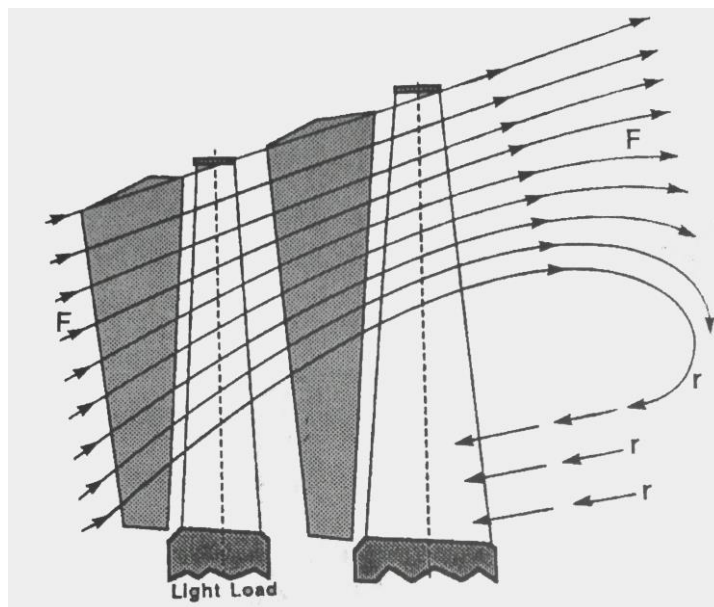


Figura 4.24 Flujo cuando se trabaja a cargas parciales

Estos movimientos se justifican a una recirculación del vapor en la parte inferior de la corona de álabes, cuanto más leve sea la carga que atraviesa los álabes, mayor será la recirculación. Esta recirculación provoca un aumento de la temperatura del vapor, que a su vez incrementa la temperatura de los álabes por los que recircula, modificando las propiedades mecánicas que pueden cambiar la frecuencia natural de los álabes individuales.

Una vez que todos los álabes largos están sintonizados, es necesario proporcionar a los álabes un sistema de refrigeración de los álabes, que eliminan el calor para prevenir el fallo. Se utilizan sprays de agua que proporcionan una nube fina de partículas de agua en el anillo de salida para eliminar el exceso sobrecalentamiento presente en el vapor.

Mecanismo de daño.

Si existen las condiciones por las que se recircula la salida del último escalonamiento, entonces cualquier agua libre presente puede ser arrastrada por el vapor que recircula. El agua de los espráis es la primera candidata para el agua de recirculación, además es posible que la humedad entre de otras partes de los elementos estructurales de la extracción donde existe una capa de líquido en la superficie. Sin embargo, se cree que la mayoría de la humedad que vuelve a entrar a los álabes es transportada por la recirculación del vapor.

La 4.25 muestra en un diagrama el efecto de la recirculación en la extracción, donde el agua introducida por los espráis para eliminar el exceso de calor por fricción vuelve a entrar por la sección de la raíz.

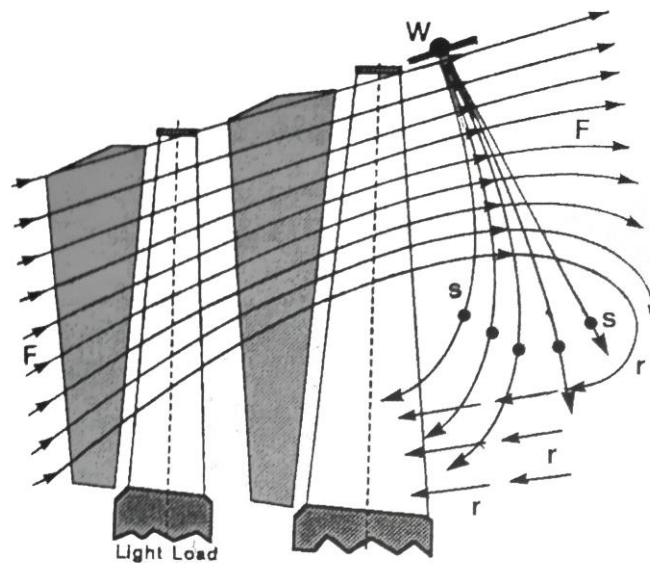


Figura 4.25 Patrón de flujo de agua del agua del spray

Modelo de pérdida de material

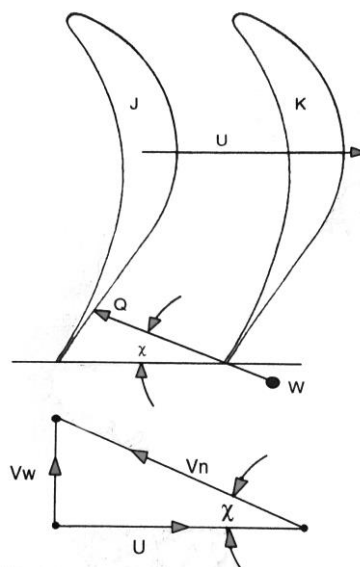


Figura 4.26 Diagrama de velocidad de las partículas que vuelven a entrar

Se dispone a realizar un modelo a través de la figura 4.26, suponiendo un diagrama de localidades en las coronas cercanas a la sección de la raíz, donde las gotas de agua tienen una velocidad “ V_w ” y entran entre los perfiles “ J ” y “ K ” que se mueven a una velocidad V , por lo tanto, la velocidad relativa del agua es “ V_n ”, con un ángulo “ X ”.

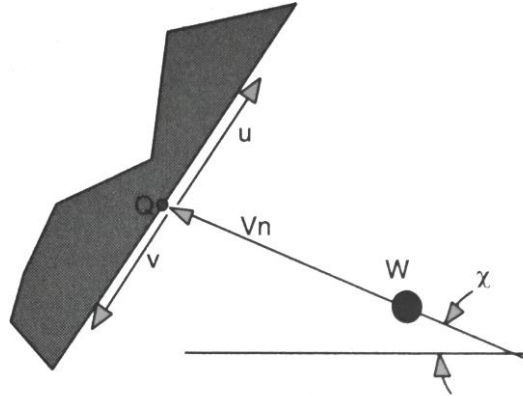


Figura 4.27 Agua que impacta con en el punto Q

En este punto, la humedad vuelve a entrar. Las gotas de humedad del spray impactan con el álabe en el punto “ Q ”, mostrado con detalle en 4.27, después del impacto, la humedad se mueve radialmente hacia fuera del punto de impacto a alta velocidad, unas diez veces mayor que la velocidad del impacto. La fuerza de Coriolis desvía el agua hacia el borde de estela y acelerándose contra las fuerzas del vapor. Cuando la humedad se acelera por el borde de estela, es posible que aparezca cierto nivel de cavitación, causando un fallo superficial del álabe. Los siguientes impactos a alta velocidad causarán pérdida de material, apareciendo la erosión en forma de “cárcavas”. Debido a las fuerzas que actúan sobre el agua, la velocidad “ v ” será mayor que la “ u ”.

Es posible que el impacto en el punto Q cause deformación plástica del material del álabe y finalmente la pérdida de material.

Tan rápido como se pierda material de la superficie, aparece un cráter en el borde de estela, que puede haber surgido como una deformación elastoplástica. Aparecerán impactos posteriores a corta distancia, donde se encontrará otra vez flujos preferentes hacia el borde de estela, impactando a alta velocidad sobre cualquier superficie vertical, causando pérdida de material. Finalmente aparecerán pequeñas marcas de erosión que se desarrollarán hacia el bode de ataque, que se desarrollarán hacia el borde de ataque, que funcionará para recoger y dirigir el agua hacia afuera. Es posible que el cráter finalmente se propague, siendo el principio de las huellas características de la erosión. Muchas de estas se iniciarán a la vez y tenderán a unirse.

El agua utilizada en los espráis puede contener grandes cantidades de gases disueltos, haciéndose posible una mayor cavitación que la que tendría lugar si el agua fuera extraída de algún punto del desaireador. Es posible que la alta velocidad del fluido hacia afuera después del impacto disminuirá la presión de la capa de agua, causando que una parte del agua en la superficie del álabe vuelva al vapor, teniendo el mismo efecto de la cavitación.

La dirección de las fuerzas totales que actúan en el agua depositada es la fuerza de bombeo que tiende a hacer al agua moverse hacia el borde de estela y hacia la zona de la cabeza, por lo que se espera, que las huellas de erosión encontradas en los álabes no sean completamente axiales, teniendo una leve componente axial.

Estas huellas continuarán incrementando la pérdida de material, aumentando la profundidad de la erosión, haciendo el borde de estela más estrecho, hasta que el espesor no soporte las cargas, provocando la rotura del álabe. Si se descubre este tipo de erosión se deberá controlar la profundidad del daño “ d ” y la velocidad de crecimiento de la grieta. Por último, puede ser necesaria su sustitución o reparación mediante soldadura.

Cuando aparece este tipo de daño, es difícil formular una regla que indique cuando deber ser sustituido el álabe. Una forma razonable es controlar la penetración en el álabe en peores condiciones y repararlo o sustituirlo cuando el daño alcance una profundidad predeterminada.

Penetración de la erosión con el tiempo.

La profundidad es función del tiempo que la unidad opera a bajas cargas (por debajo del 20%) con el espray operativo. Pueden aparecer situaciones en las que la presión a la salida de la turbina aumente, debido a posibles fallos en el condensador, por lo que es posible que el espray se active debido a que la temperatura de la salida será mayor a pesar de que la carga será mayor que en las ocasiones en las que se suelen utilizar. Esto será debido a que el flujo volumétrico se reducirá sobre todo en la sección exterior del paso del álabe, dándose las condiciones oportunas para la recirculación.

En el caso de que el uso de espráis esté limitado, el crecimiento de la profundidad de la erosión no debería ser excesiva, pudiendo resistirse el álabe de mejor forma al inicio de la grieta. Sin embargo, su uso limitado solo supone retardar la aparición y la velocidad con la que el daño se hace más intenso. Cuando aparecen las marcas de la erosión el álabe resiste menos la fatiga. Aunque en esta zona no se sobrepasará el límite de endurecimiento del material, la profundidad aumenta con el uso del espray, terminando en el fallo del álabe.

Control del daño.

Es recomendable, para todas las unidades con espráis en el último escalonamiento, que los álabes de estos escalonamientos sean revisados en las paradas de mantenimiento.

Como se ha denotado con anterioridad, no existen reglas generales para estimar la capacidad de fallo de la grieta, pero es de hecho una combinación de un gran número de factores entre los que se encuentra la profundidad, el espesor del material que queda, la forma de la base de la huella de la erosión y la cantidad de desviación de la vibración en esta localización.

Para una revisión en profundidad se requiere un análisis de elementos finitos, que se recomienda una vez la profundidad alcanzada sea alrededor de 12.7 cm o la mitad del espesor del alabe en el borde de estela ("t").

Cuando el daño es identificado, se puede controlar con la representación de la penetración "d" en función de las horas de operación con el espray operativo. Se recomienda también el uso de fotografías y moldes para un control estricto.

Afortunadamente, los álabes del último escalonamiento se pueden inspeccionar fácilmente. Cuando el daño alcanza un nivel crítico, se deben de examinar regularmente, incluyendo la aplicación de métodos no destructivos. Sin embargo, la figura 4.21 y la cara de presión del mismo álabe en la figura 4.22 proporcionan evidencias de que este se ha roto. Por lo tanto, será necesario el uso de medios que permitan visualizar la cara de presión, haciendo posible la revisión sin levantar la carcasa.

4.4.3 Erosión por lamiado

Este fenómeno representa la expansión de la mezcla de agua y vapor por una abertura estrecha, que se produce sin absorber ni ceder calor. En un gas perfecto, el estrangulamiento no produce cambios en la temperatura del gas, pero en el vapor o la mezcla del vapor con agua, se produce un pequeño enfriamiento, lo que supone la caída de presión, en las condiciones de calor contantes definidas con anterioridad. En el vapor, la operación de laminado debe tener presente agua en fase líquida en el principio de la expansión para causar daño por el paso de las fugas. Si el vapor saturado que hay en el paso de vapor se expande hasta cualquier presión, el flujo se encontrará sobrecalentado a menor temperatura.

Para que aparezca este tipo de operación y cause daño en el paso de vapor hay tres condiciones que deben darse:

- Una mezcla de dos fases de agua y vapor a elevada presión entrando por el camino de las fugas. Esta situación se da siempre en el condensador una vez el vapor ha cruzado la línea de saturación.
- Una presión diferencial a través de un miembro mecánico o junta. Al igual que en el caso anterior, se suele tener en el condensador.
- Un camino de fugas inicial o primario, a través del cual la mezcla del vapor y el agua se pueden expandir desde alta hasta baja presión.

La aparición de la expansión de las fugas se encuentra caracterizada por dos resultados básicos:

- El vapor que se fuga alcanza altas velocidades en el paso a través de la abertura, que representa la conversión de la presión de la mezcla en energía cinética, manteniendo constante el calor total.
- Se encontrará un cambio en las propiedades físicas de la fase vapor en la mezcla.

Hay tres tipos de consecuencias en el paso de vapor a este tipo de expansión que degrada el funcionamiento de la unidad:

- El vapor que fuga por encima de la junta realizará un baipás sobre la corona de álabes y por lo tanto no producirá trabajo. Puede suceder que el vapor fugado vuelva al paso de vapor causando perturbaciones del flujo, produciendo más pérdidas.
- Durante la expansión a través de pequeñas aberturas de la turbina, el agua causará el deterioro de la superficie metálica y la pérdida de material mediante un proceso que rompe la estructura superficial del material. La pérdida de material ampliará el tamaño de la apertura incrementando el caudal de fugas.
- El vapor fugado volverá a entrar en el paso de vapor provocando cargas de impulso con la capacidad de crear niveles peligrosos de vibración en respuesta a la frecuencia del impulso. Es común en las fugas sobre las juntas horizontales, las mitades del diafragma y los álabes que experimentan altas revoluciones creando impulsos de alta intensidad.

Localización de las fugas del paso del vapor.

Es importante considera las partes de la turbina donde se pueden desarrollar aperturas y donde se pueden buscar este tipo de daños:

- Juntas horizontales de la carcasa: en la carcasa de las unidades nucleares de alta presión, el armazón se produce de acero moldeado, pero existen altas presiones diferenciales y si las juntas no son lo suficientemente lisas o se ha producido una deformación excesiva, se pueden iniciar corrientes de fugas. En la sección de baja presión para plantas fósiles y nucleares la carcasa se produce de placas de acero, que normalmente son de un tipo que no resisten especialmente bien esta forma de erosión y por lo tanto se encuentran sujetas a daño. En la figura 4.28 se observa el camino de las fugas desarrollado en la sección de baja presión. En este caso, la fuga proviene de un hueco de extracción, localizado entre la carcasa interior y exterior.



Figura 4.28 Erosion por fugas de agua en una sección de baja presión

Este tipo de daño no influenciará en un principio la eficiencia del paso de vapor, pero conforme el

camino de la fuga aumenta, se producirá un desperdicio de la energía disponible.

Algunas secciones de baja presión utilizan para las carcassas interiores acero moldeado o hierro moldeado, siendo estos los primeros candidatos a sufrir daños.

- Juntas de diafragma horizontales. Los diafragmas son diseñados para soportar grandes caídas de presión. La fabricación tipo es con dos mitades divididas por el plano horizontal, unidas mediante juntas. En la mayoría de los diseños hay pernos en la superficie que conectan estas juntas. Sin embargo, estos elementos son muy susceptibles de sufrir este tipo de erosión. La figura 4.29 muestra el paso de las fugas de la parte interior del diafragma, atravesando el anillo de estanqueidad.

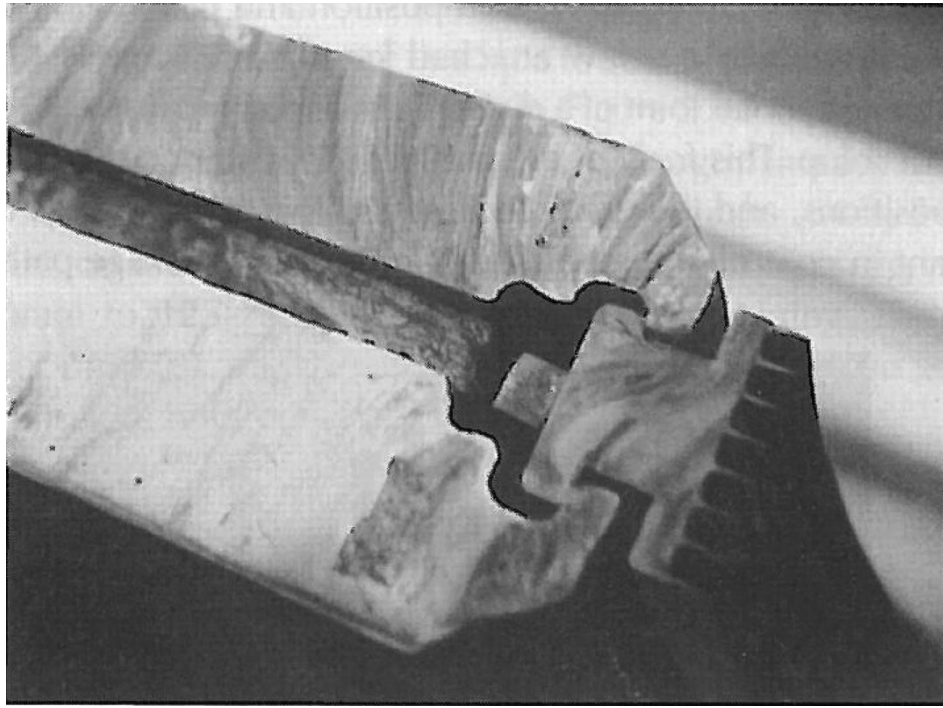


Figura 4.29 Erosión por agua en las juntas horizontales del diafragma

- Álabes divididos. Hay diseños con los álabes del diafragma divididos por la junta horizontal, la mitad de cada álabe se localiza en la parte superior e inferior de la carcasa. Si no son unidas de forma adecuada, se encontrarán fugas en estas posiciones.
No es común que ocurra, ya que la presión diferencial a través del álabe no es muy grande. Sin embargo, en aquellos casos en los que este tipo de fugas se encuentre presente la mezcla de agua y vapor puede provocar el desprendimiento de la capa límite, causando turbulencias localizadas.
- Entre el bloque de la raíz del álabe. Hay fugas que aparecen entre el bloque de la raíz en las juntas horizontales. En este caso, se tiene un escalonamiento de reacción en el que los álabes se encuentran en la carcasa. Se evita la migración tangencial con pernos atornillados. Estas fugas son parecidas a las de la junta horizontal del diafragma.
- Diafragma y caras de los sellos de vapor de la carcasa interior. Estas son las caras de las juntas que forman la mayor barrera donde el diafragma y el soporte de los álabes se localiza en la carcasa de la turbina. Esta cara tiene la capacidad de prevenir el baipás del vapor. En sendos casos la cara se debe fabricar con un acabado superficial fino, en torno a $64-125 \mu\text{inch}^{1/2}$. Sin embargo, para la carcasa es difícil de alcanzar este acabado, consiguiéndose en torno a $125-250 \mu\text{inch}^{1/2}$. Esto puede producir fugas aceptables por el hueco formado bajo la influencia de la presión diferencial a través de la cara.
La situación siempre puede empeorar. Cuando se desarrollan pequeñas fugas a través de las caras “O-O” con el paso del tiempo, llegando a existir la posibilidad de fuga en dos fases. Este tipo de paso crecerá hasta proporciones inaceptables. Normalmente, la mayor pérdida de material se tiene en la carcasa

debido a sus materiales menos resistentes. Otra forma de aparición de este tipo de fugas es debido a la operación transitoria, donde la temperatura aumenta con la posibilidad de introducir deformación. La figura 4.30 muestra una parte de la carcasa de baja presión, en el entalle del hueco del diafragma donde se ha encontrado este tipo de erosión.



Figura 4.30 Erosión de los huecos del diafragma

- Huecos de los anillos de estanqueidad del diafragma. Aquellos diafragmas con anillos de estanqueidad en su diámetro interior pueden sufrir la erosión del sello. Esta superficie se muestra en la Figura 4.31. Cuando la unidad se abre para su inspección se deberá examinar la superficie en busca de daños.

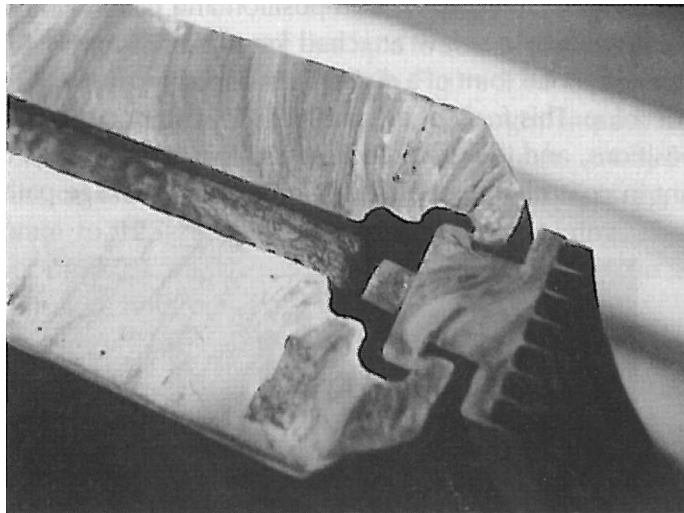


Figura 4.31 Erosión de las juntas horizontales del diafragma

4.4.4 Erosión por partículas de agua

Este tipo de erosión aparece como resultado del flujo de agua a alta velocidad por las superficies metálicas de la turbina. Hay varias consideraciones relacionadas con esta pérdida de material que pueden incluir:

- Irregularidades en la superficie como resultado de eventos operacionales e incluso procesos de operaciones.
- Capa de agua en la sección de baja presión contiene gases disueltos. Una evidencia de esto es la necesidad eyectores de vapor para eliminar los gases en el condensador. Conforme se reduce la presión del medio, los gases disueltos volatilizan, causando microrroturas en la superficie del paso de vapor.
- El agua puede contener pequeñas cantidades de iones corrosivos que atacarán la estructura del material, rompiendo el vínculo entre los cristales del metal. El lavado de la superficie hace que los granos afectados del material se desprendan.

Erosión por lavado en los álabes del rotor

El material de los álabes de la turbina para escalonamientos libres de humedad es acero cromado 11-13% de alta calidad, que resistirá el efecto del lavado en condiciones normales, aunque en ciertas circunstancias pueden hacer daños.

Puede aparecer daño cuando los álabes se producen a partir de una sección extruida y se coloca una pieza para mantener la posición tangencial. El efecto del lavado en este tipo de escalonamientos se muestra en la figura 4.32, donde los elementos espaciadores, producidos en acero 2,25% de cromo, se han erosionado a medida que iban perdiendo la pared interior. Esta pérdida de material introduce turbulencias en la descarga.

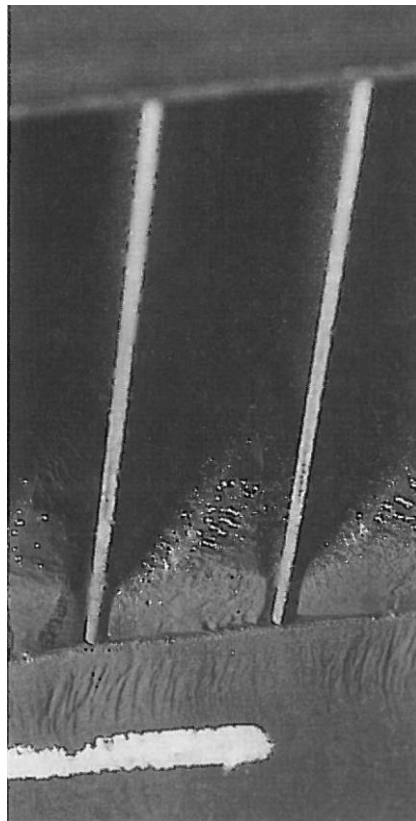


Figura 4.32 Erosión por lavado entre los álabes de la sección

En unidades grandes de plantas nucleares, donde el vapor se produce en una caldera nuclear, será necesario secarlo antes de introducirlo en la turbina. Si el separador de humedad no es lo suficientemente efectivo, se introducirá una gran cantidad de agua en la alta presión de la turbina.

La Figura 4.33 muestra los álabes del escalonamiento de control de una central nuclear, donde se ha introducido un exceso de humedad que se ha acumulado en el sistema de entrada, erosionando la raíz de los álabes. Esta pérdida de material finalmente debilitará las uniones, afectando negativamente en la fiabilidad de la corona de álabes. El diámetro de la descarga también será afectado, influenciando por tanto la eficiencia del escalonamiento.

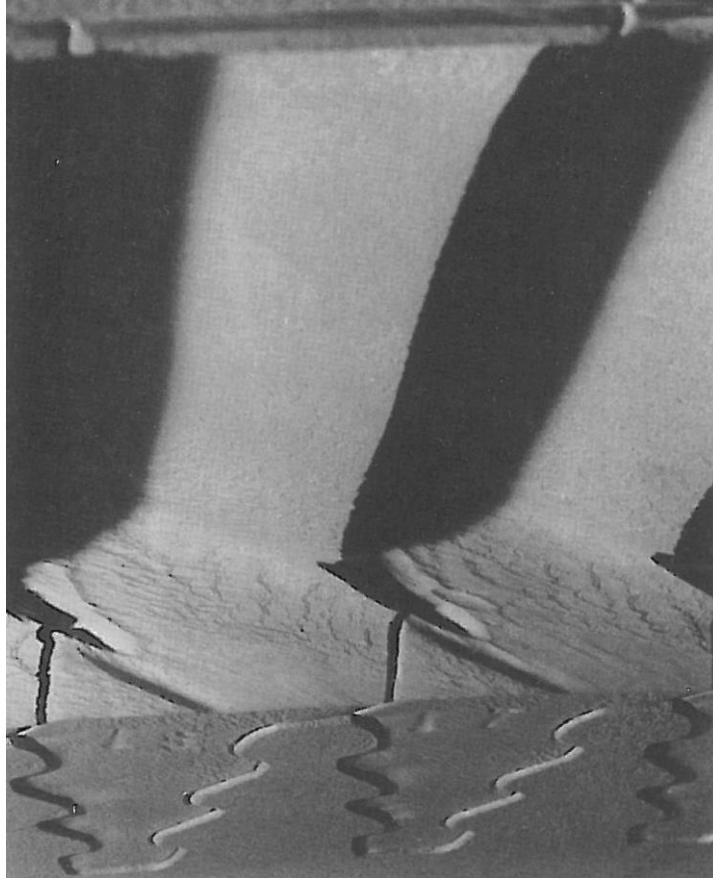


Figura 4.33 Erosión de lavado en la sección de la raíz

Erosión del diafragma y los álabes estacionarios

Sobre los álabes estacionarios se deposita humedad que proviene del flujo de vapor principal. Esta humedad es transportada sobre el álabe en la dirección de la cuerda, pero también con una componente radial introducida por la fuerza del vapor en expansión. Los patrones del flujo del vapor se pueden observar algunas veces sobre los álabes gracias al patrón de la deposición, como el mostrado en la figura 4.34. Bajo circunstancias normales el material del álabe es demasiado resistente para erosionarse por el efecto del lavado.



Figura 4.34 Marcas del flujo en los álabes de la corona del rotor

Aunque el material de los álabes ofrece una resistencia suficiente a este tipo de erosión, los anillos interiores y

exteriores donde se colocan los álabes son de un material más suave, capaz de sufrir la erosión. Los álabes se han fabricado fundidos entre el anillo exterior e interior. El agua que entra en la corona de álabe estacionario tiende a erosionar la parte del anillo interior. La pérdida de material es lo suficientemente grave, las paredes interiores han sido destruidas, y, si no se repara, el álabe puede acabar desprendiéndose.

Otra forma de erosión del diafragma se muestra en la figura 4.35, 4.36 y 4.37, donde se muestran diferentes grados de erosión por lavado en las paredes laterales. En cada caso, el agua se recoge en los álabes estacionarios hasta que fluyen hasta las paredes laterales exteriores. La pérdida de material es mínima, pero ha sido suficiente para destruir la forma de la pared lateral inferior. En b, se ha producido una pérdida más importante. En c se encuentra un corte más profundo de la pared exterior. La pérdida de material se observa claramente en el borde de estela y aunque acabará debilitando la unión del álabe, será necesaria la eliminación de mucho más material antes de que la integridad estructural del álabe se vea afectada.

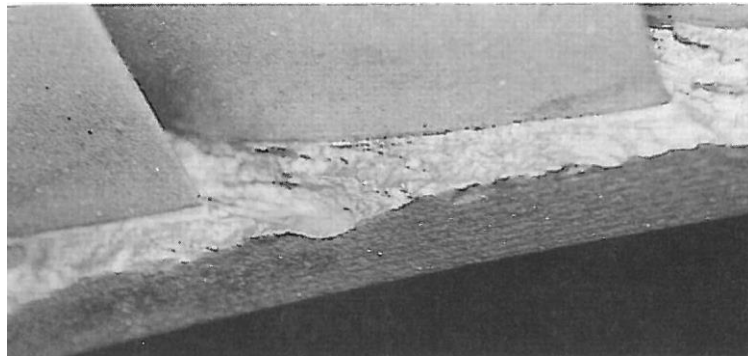


Figura 4.35 Erosión por lavado del anillo exterior del diafragma

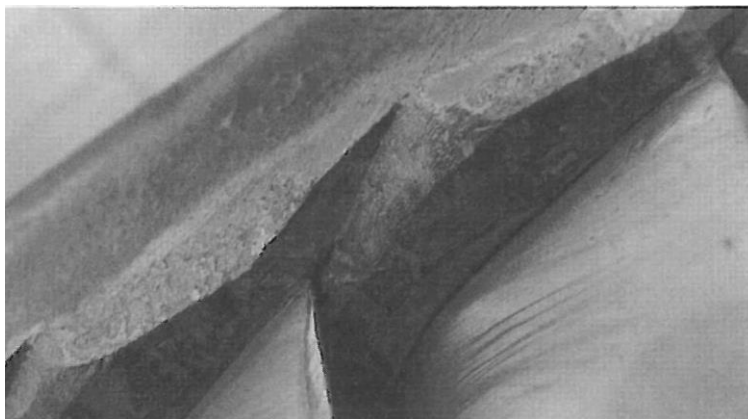


Figura 4.36 Erosión profunda en el diafragma con marcas de erosión en el borde de estela



Figura 4.37 Erosión por lavado donde se tiene eliminación de material

En cada una de estas situaciones, esta forma de daño no tiene influencia importante en la fiabilidad de la unidad, a pesar de que puede reforzar el efecto de la frecuencia al paso por la tobera. El posible efecto sobre la eficiencia es mínimo.

Erosión por lavado en la carcasa

La erosión de la carcasa es normalmente consecuencia de la humedad centrifugada por los álabes del rotor, que chocan con esta y fluyen a alta velocidad sobre su superficie interior. La mayoría del daño causado en la carcasa es por la mezcla del impacto y la erosión, contribuyendo a la pérdida de material. La figura 4.38 muestra el hueco axial entre dos coronas de álabes estacionarios, donde se puede observar pérdida de material en la corona de álabes estacionario. Este tipo de daño es frecuente y hasta que no influya en la seguridad del escalonamiento, no resulta de interés.

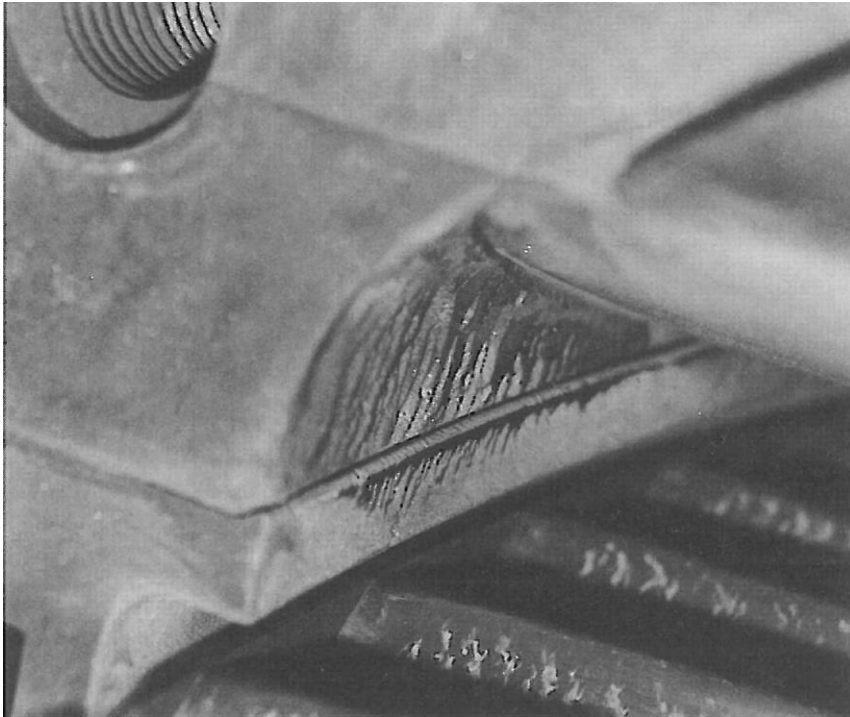


Figura 4.38 Erosión por lavado en la carcasa entre álabes estacionarios

En la figura 4.39 se muestran patrones de pérdida de material en el anillo exterior del diafragma de una planta nuclear, en la que se localizan sellos radiales alrededor de los álabes de la L1. No se ha producido una pérdida de material importante, no siendo esta la situación para el anillo de sellado. En este caso se ha solucionado el problema reemplazando el anillo completo después de mecanizar la zona afectada. La unión se ha fabricado de acero al carbono. Se ha soldado la circunferencia completa para asegurarse de que no aparecen fugas. El resultado final aparece en la figura 3.11.9.

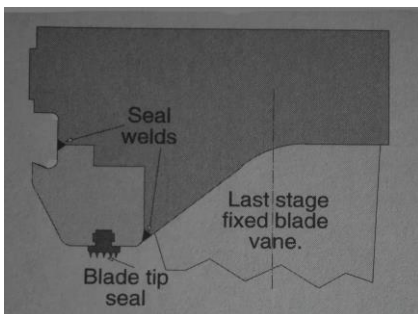


Figura 4.39 Esquema de la reparación

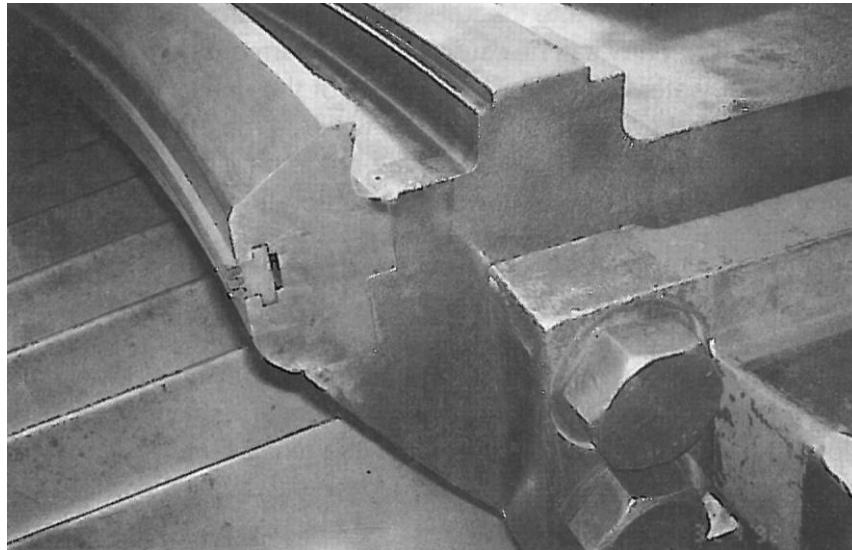


Figura 4.40. Diafragma reparado

4.4.5 Ingesta de agua en el paso del vapor

La turbina de vapor es una parte integral del ciclo térmico, donde el fluido de trabajo es el vapor y/o la mezcla de vapor y agua en las condiciones del vapor más bajas. Debido a la capacidad del agua de dañar el paso del vapor, se disponen, a lo largo del paso del vapor elementos de recogida y drenaje de la humedad donde es formada.

La turbina se diseña para la entrada y salida de agua y vapor en diferentes partes del ciclo. Existen también para el agua, la posibilidad de volver a entrar en la turbina, bajo un gran número de condiciones del ciclo. Esta entrada de agua al paso de vapor se realiza desde otras partes del ciclo o procedente de la misma turbina. Estas partes del ciclo incluyen las líneas principales de entrada de vapor, las líneas calientes y frías de recalentamiento y las líneas de extracción del vapor.

En el momento en el que el agua vuelve a entrar al paso del vapor, dependiendo de su localización, cantidad y la forma, la unidad puede sufrir varios tipos de daños. Este puede ser en forma de grietas térmicas de varios componentes por enfriamiento y torsión del rotor y de los álabes.

Durante la operación en transitorio, cuando la carga se reduce, las válvulas se cierran para controlar la sobre velocidad de la turbina, aparece la posibilidad de que la presión caiga de repente, causando la inversión del flujo, permitiendo así que el agua vuelva a entrar en el paso de vapor.

Formas de daño.

Cuando aparece la ingesta, es prudente apagar la unidad, abrirla e inspeccionarla. Esta acción supondrá un desembolso económico considerable, en términos de mano de obra y material. Cuando la unidad es inspeccionada, si el daño es menor, la corrección se puede posponer a la siguiente parada programada. Sin embargo, normalmente suelen requerirse acciones correctivas antes de que la unidad vuelva a funcionar.

La inspección revelará la parte dañada para su corrección. Hay veces en las que la única solución es reemplazar el componente. Este tipo de situaciones puede parar la unidad durante largos periodos de tiempo, o requiriera la vuelta a servicio hasta que las partes a sustituir se encuentren disponibles.

El posible daño inducido por la ingesta de agua es el siguiente:

Daño por impacto

Este tipo de daño es importante en las partes menos robustas del paso del vapor, que son los álabes del rotor, así como su estructura. Cuando el agua vuelve a entrar en el paso del vapor, como agua condensada, será transportada aguas abajo en la dirección de la expansión del vapor, por lo que impactará de forma intensa sobre los álabes. Los álabes más largos, aquellos localizados en los últimos escalonamientos de baja presión soportará

grietas en la zona del alambre antivibración y en las cubiertas. La figura 4.41 muestra un par de álabes de una corona que ha sido destruida por la ingesta de agua. En este caso los álabes de pequeña anchura axial no han resistido la fuerza de los impactos, doblándose y acabando destruidos por completo.



Figura 4.41 Alabes torcidos y desprendidos causados por la ingesta

Erosión

Si aparece arrastre continuo desde algún punto del ciclo donde el agua se recoge de varios escalonamientos, pero es incapaz de ser eliminado por algún bloqueo de la línea de drenaje o una válvula cerrada, esta agua volverá al paso del vapor.

Si el agua se concentra en una posición radial, esta se moverá si la velocidad tangencial del álabe es lo suficientemente grande, causando erosión por impacto, con la capacidad de destruir la cabeza de los álabes del rotor.

Enfriamiento

Es un fenómeno por el cual se elimina calor de una pieza metálica mediante una inmersión repentina en un fluido a menor temperatura, variando las propiedades del metal. En el caso del acero, como el utilizado en los componentes del paso del vapor, el material se endurece y se fragiliza, necesitando de un tratamiento térmico para devolver su ductilidad.

En el caso de la ingesta de agua, el agua impacta con la superficie del rotor, eliminando el calor. Este efecto modifica las propiedades del material, llegando a producir grietas en su superficie.

- Rotor. Las dos posibles formas de daño cuando se enfría rápidamente es el alabeo del rotor y la aparición de grietas.
- Carcasa. Si se enfría la carcasa, los daños son los mismos que los que afectan al rotor. Además, se puede dar el arqueado de la carcasa.

Fricción en el paso de vapor

A veces el agua que entra en el paso del vapor causa cambios en el alineamiento axial y radial, cambiando la posición de la mayoría de los componentes. Como los componentes operan con pequeñas distancias radiales y axiales entre ellos, puede aparecer el roce entre los componentes. En el caso más grave, causará un contacto intenso entre las partes móviles y estacionarias suficiente para incrementar el calor del componente, llegando a curvar el rotor.

Este roce puede comprometer la integridad de algunos materiales endureciéndolos y fragilizándolos. Considerando la eficiencia, la modificación de los huecos empeorara el funcionamiento de la unidad.

Si el roce no es muy intenso se pueden llevar a cabo acciones correctivas. El rotor se puede enderezar mediante un calentamiento lento y un proceso de enderezamiento.

4.5 Eliminación del agua del paso del vapor

Es necesario eliminar la humedad del paso del vapor en la medida de lo posible, no solo para las unidades que operan en la región húmeda, sino también para el resto de las unidades, evitando la acumulación de agua en las puestas en marcha frías donde el agua presente en el paso de vapor debe ser drenada antes de que se alcancen altas velocidades de rotación.

Hay tres métodos distintos para controlar los niveles de humedad en la unidad:

- Controlando las condiciones de vapor. Esto se aplica tanto en ciclos sobrecalentados, como en saturados, estos últimos incluyendo plantas nucleares y geotérmicas.
- Eliminación el agua presente en el vapor cuando es transportado desde una sección de la turbina a la siguiente. Es el procedimiento más efectivo en los ciclos de plantas nucleares, donde el vapor a altas presiones contiene un pequeño porcentaje de humedad. En los ciclos que utilizan vapor saturado, como en los nucleares WCR y aplicaciones geotérmicas, el vapor se seca antes de que entre en la unidad mediante dispositivos similares.
- Recolección y drenaje de la deposición sobre los escalonamientos individuales.

Recolección interna y eliminación.

Para alcanzar el drenaje, es necesario recolectar la humedad de la forma más efectiva posible, alcanzando el lugar donde se puede drenar y proporcionar un camino adecuado para su eliminación. Este drenaje debe ser completado sin un sangrado excesivo de la unidad.

La mayoría de las unidades fósil emplean colectores en las secciones de baja presión. Para unidades con vapor generado en WCR, se necesitará este drenaje en los escalonamientos de alta presión.

La humedad se recoge en la parte interior de la carcasa, a través de la incorporación de ranuras. Se distinguen tres fuentes de agua en las paredes de la carcasa:

- El agua depositada en la superficie interna de la carcasa que proviene del flujo radial de vapor. De cantidad relativamente pequeña pero importante, en aquellos escalones en los que el lapso no ha sido suficiente, después de la formación de las primeras gotas de agua, que se agruparán formando gotas largas, que serán la fuente de la humedad.
- Agua depositada en la corona de álabes estacionarios, tanto en el álabe como en las paredes exteriores con velocidades radiales elevadas hacia la carcasa. Es parte de la humedad total depositada en la corona de álabes estacionarios que no volverá al flujo principal en forma de grandes gotas.
- Agua centrifugada a la carcasa de los álabes del rotor. Después de impactar con los álabes del rotor, una parte de la humedad rebota y volverá al flujo principal. Sin embargo, la mayor parte será centrifugada hacia la superficie interior de la carcasa.

Las ranuras deben permitir la entrada de la humedad, se retenida y drenada hacia la parte inferior de la carcasa donde se elimina. Para alcanzar el drenaje de forma efectiva, las ranuras se deben dimensionar para recoger la humedad a través de las paredes laterales exteriores. Un tipo de ranura básica utilizada en la carcasa es el mostrado en la Figura 3.6.1 donde se coloca justo aguas debajo de los álabes del rotor. El método de construcción del cinturón colector se puede distinguir, el hueco axial de entrada, de longitud "A" a posicionado a una distancia "S" del centro de los álabes al rotor. Hay una distancia radial "R" por encima del punto de entrada para evitar que el agua rebote y por último los labios de profundidad "D" producida en el cinturón, proporcionando un camino para el drenaje, drenando el agua recogida hacia la parte inferior.

Este sistema receptor, mostrado en la figura 3.6.1, es comúnmente empleado en los últimos escalonamientos en

todas las secciones de baja presión, donde se encuentran presentes grandes cantidades de vapor libre. Estos diseños están dimensionados para recoger el agua de las tres fuentes diferentes mostradas en la **figura 4.42 y 4.43**.

- “Wc” que entra a través de la carcasa, que no se ha eliminado del escalonamiento previo.
- “Wn” que es depositado en la corona de álabes estacionarios, fluyendo hacia la carcasa, uniéndose con el flujo “Wc”.
- “Wr” que es el flujo centrifugado por los álabes del rotor.

Este diseño se dispone para tener un sangrado del vapor entorno al 0.5% del flujo de vapor para asegurar la eliminación efectiva del agua.

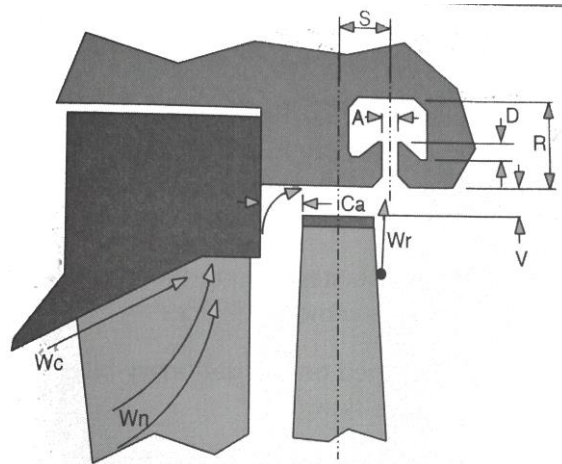


Figura 4.42 Recogedor de agua interno

Aunque esta disposición se utiliza en secciones de turbina de baja presión, también puede ser aplicado a la expansión a alta presión del vapor saturado de plantas nucleares. Además de esta geometría, existe la mostrada en la 4.43, cuyo cinturón se encuentra localizado justo a la altura del borde de ataque de los álabes del rotor, donde los álabes tienen unas muescas en el borde de ataque para favorecer la retención de las gotas.

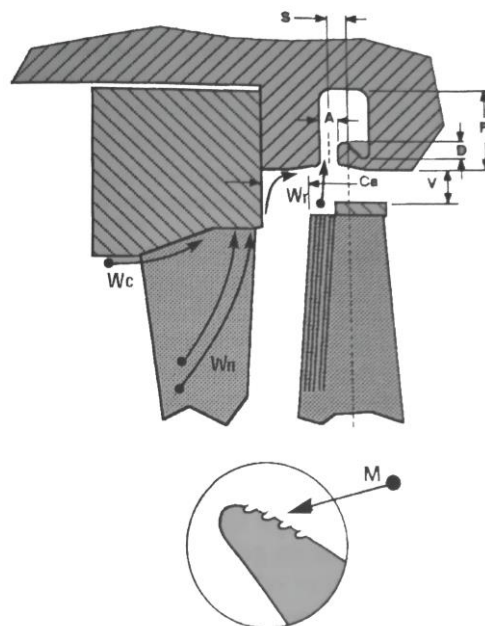


Figura 4.43 recogedor de agua

La eliminación de humedad de las plantas nucleares, en la sección de alta presión, no se realiza para prevenir el daño que puede causar la humedad, si no para eliminar humedad de la expansión que provoca un exceso de

pérdida de eficiencia. Esta separación interna se usa como medida preventiva para reducir la obligación de reducción de humedad del sistema intermedio de la planta nuclear. Aunque las cantidades serán pequeñas, modificará la forma de la línea de expansión.

Se pueden emplear otras disposiciones, pero el coste de fabricación no se justifica con la mejora de la eficiencia que proporciona.

4.5.1 Eliminación externa (ciclos de vapor saturado)

Las unidades que funcionan bajo condiciones cercanas a las saturadas se pueden utilizar dispositivos externos a la turbina. Existen varios tipos de separadores dependiendo de la diferencia de densidad entre las partículas de agua y el vapor.

La separación externa es sostenible solo para este tipo de ciclo donde el vapor suministrado a la unidad contiene humedad, tanto en las plantas geotérmicas y aquellas unidades con WCR.

4.5.2 Control de las condiciones del vapor.

La humedad presente en cada punto del paso del vapor es importante para el funcionamiento de la unidad, resultando en daños en la unidad cuando se encuentra un exceso de agua.

En la figura 3.6.4 se muestran las líneas de expansión para varios ciclos, indicando los niveles de humedad anticipados por el diseñador y para los dispositivos de control o sistemas de control del agua. Los cambios en las condiciones del vapor inicial, recalentamiento y salida, afectarán en los niveles de humedad modificando la capacidad de sufrir daño. Por lo tanto, si una unidad ha funcionado durante un largo periodo de tiempo, con las condiciones de vapor fuera de diseño, a través de la turbina, la caldera o condensador, incapacitando a la unidad para mantener los parámetros específicos de operación, por lo que se modificarán los niveles de humedad, resultando en daños sobre la unidad.

4.5.3 Ciclos de vapor sobrecalentados.

En la figura 4.44 se muestran las condiciones del vapor para una unidad de planta fósil con sobrecalentamiento. Las condiciones iniciales de diseño son "Pt" y "Td", en el punto "A". En la sección de alta presión el vapor se expande hasta una presión "Ped" en punto "B". También se muestra en la figura 4.44 variaciones de estas condiciones iniciales, presiones de "Pu" hasta "Pi" y temperaturas de "Tu" hasta "Ti". Se puede observar que para cualquier variación en estos rangos no afectará la humedad, pero afectará a las condiciones B, que representan la salida de la sección de alta presión.

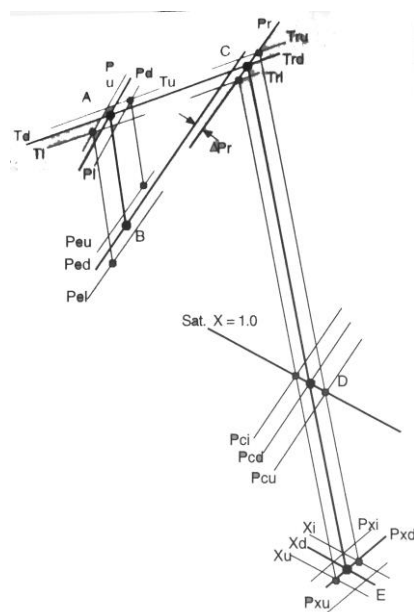


Figura 4.44 Ciclo sobrecalentado

Desde la salida de alta presión hasta la entrada de la sección de recalentamiento aparece una caída de presión “ ΔP_r ” entrando el vapor en la sección de recalentamiento a la presión “ P_r ” en el punto “C”. Por lo tanto, la presión a la entrada de la sección de recalentamiento es dependiente de la presión inicial de la turbina. Por lo tanto, la presión a la entrada de la sección de recalentamiento depende de la presión inicial de la turbina en “A” y de la caída de presión en el recalentamiento, comprometiendo el ciclo.

A pesar de las diferencias entre la salida de la turbina de alta presión y la sección de entrada del recalentamiento, el parámetro que más influencia tiene en las condiciones de salida y por lo tanto en la humedad es la temperatura de recalentamiento “ T_r ” en “C”.

El efecto de variar la temperatura “ T_{ru} ” hasta “ T_{rl} ” se puede observar en su efecto en la presión en el que la línea de expansión que cruza la línea de saturación en “D”, el paso de vapor y contenido final de humedad en “E” cuando la presión del condensador es “ P_{xd} ” la variación de humedad varía de “ X_u ” hasta “ X_i ”.

4.5.4 Ciclos de vapor saturado.

En este tipo de ciclos como en las plantas nucleares y muchas aplicaciones geotérmicas, el vapor entra en la turbina con cierto contenido de humedad, como se muestra en la condición “A” en la figura 4.45 el vapor producido en los reactores WCR proporciona vapor a 1000 psia con una fracción de humedad de 0.25%.

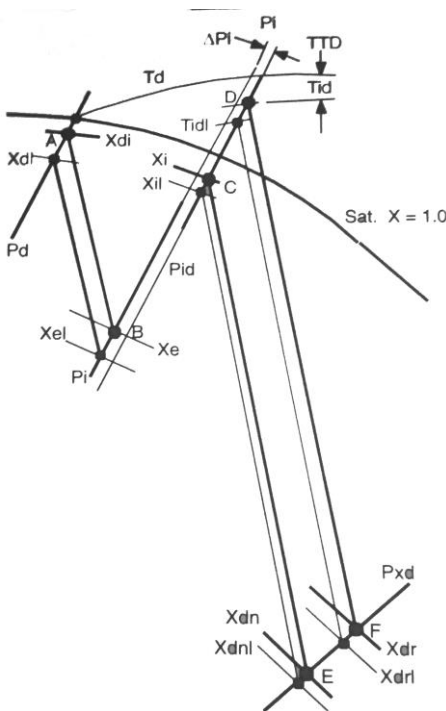


Figura 4.45 Diagrama de Mollier de un ciclo nuclear

4.5.5 Condiciones del vapor a la salida.

Como el condensador reduce la presión de la salida, se encontrará un incremento de la energía disponible, y la humedad de la descarga incrementará. La forma en la que aparece el daño depende de la localización de la humedad y la forma particular del daño.

4.5.6 Efecto de la eliminación interna de la humedad en los conductos del paso de vapor.

La separación interna disminuye el contenido en humedad en el vapor. En las líneas de expansión mostradas en la figura 4.46. El vapor entra en la sección de baja presión con condiciones “ P_m/X_m ”, donde hay tres extracciones de humedad en los últimos tres escalonamientos. En cada escalonamiento la presión on varía, disminuyendo la humedad. El efecto total es la reducción de la humedad de “ X_f hasta “ X_c ”.

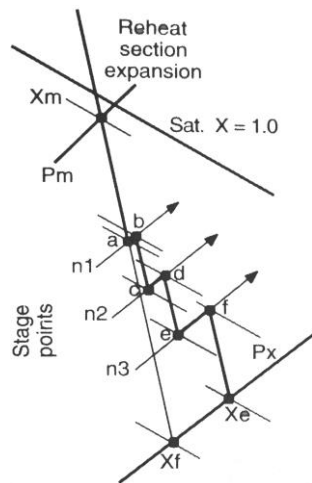


Figura 4.46 Efecto de la separación interna de humedad

4.5.7 Efecto del contenido de humedad en la eficiencia del paso de vapor.

Desde el arranque hasta la siguiente parada, la eficiencia del paso de vapor se deteriorará, que causará un incremento de la entropía del paso del vapor. Esto provoca que haya menos energía disponible para la conversión. Esto provoca que se aumente la sequedad (aumentando X) que se refleja en el calor adicional generado por fricción, que será devuelto al fluido de trabajo y evaporará parte del agua contenida en el vapor.

Lo mismo aparece si el escalonamiento sufre daño mecánico, disminuyendo la eficiencia. El resultado de las pérdidas por fricción es un pequeño incremento del recalentamiento del escalonamiento.

5 DEPOSICIÓN DE CONTAMINANTES EN EL PASO DE VAPOR

5.1 Introducción

El ciclo de potencia térmico es una composición compleja de partes individuales de equipos. En cualquier acción para controlar la expansión del vapor, se puede tener contacto con cualquier otra forma de agua, que puede contener contaminantes indeseables. Dependiendo de donde se produzca el contacto se tiene la posibilidad de que el fluido de trabajo quede contaminado. Otras unidades trabajan con el vapor eliminado del interior de la tierra, las unidades que no tienen esta oportunidad remueven las impurezas del vapor geotérmico una vez se ha entrado en el paso del vapor. [sin hacer el esfuerzo de limpiar el vapor de ciertos contaminantes transportados por el vapor geotérmico].

Las impurezas transportadas por el flujo principal en la turbina pueden ser químicamente agresivas o no agresivas. Los compuestos agresivos tienen mucha influencia en el grado de deterioro del paso del vapor (en términos de la integridad estructural). Ambos pueden influir en la eficiencia con la que el vapor se expande por la turbina.

Hay dos principales preocupaciones asociadas a las impurezas presentes en el vapor:

- Reducción de la eficiencia debido al deterioro de la superficie de los elementos del paso del vapor, y cualquier pérdida por fricción.
- Reducción en la integridad estructural resultado de la acción corrosiva sobre varios componentes de la unidad.

También puede ser considerado el posible cambio en la frecuencia natural de los álabes del rotor si la materia depositada posee una masa considerable.

El grado en el que las pérdidas por fricción con la superficie influyen en el deterioro de la eficiencia es función del número de Reynolds asociado con el flujo que cruza la superficie considerada. Estas pérdidas a su vez dependen de las propiedades físicas del vapor y la velocidad del fluido en la posición del escalonamiento. También se encuentra influenciado por las características dimensionales de la corona, ya que la velocidad del

vapor que pasa a través de un paso de expansión está cambiando (debido a la reacción del escalonamiento y la fricción), la velocidad, establecida por el número de Reynolds, varía a través de dicho paso. Esta variabilidad es superada usando los datos derivados de la experimentación, normalmente desarrollados por los fabricantes y aplicables a su familia de perfiles.

Mientras que los mejores datos (en términos del actual número de Reynolds) será determinada por el fabricante para una determinada operación con el mismo perfil en similares condiciones del vapor, se pueden obtener datos lo suficientemente exactos a través del cálculo del número de Reynolds basado en las velocidades de descarga, que normalmente es el procedimiento utilizado por el fabricante.

En altas presiones y secciones de recalentamiento de la unidad, los patrones de deposición son considerablemente más regulares y las deposiciones más extendidas uniformemente que aquellos que aparecen en la sección de baja presión y últimas coronas de álabes, donde una considerable cantidad de deposiciones aparecen debido al agua.

Se pueden observar numerosos tipos de patrones de deposición en cualquier corona de álabes. Esta es una consideración importante cuanto se trata de las pérdidas por fricción de cualquier corona, ya que, si existe una variación importante en la forma de las deposiciones sobre cada álabe, sería imposible definir una rugosidad efectiva de la superficie. De hecho, es razonable la valoración de la rugosidad principal de la superficie en una unidad apartada del funcionamiento como parte de la evaluación del ingeniero, teniendo en cuenta la variación de las deposiciones desde la entrada hasta la salida, desde la cabeza hasta la raíz, y desde las caras de presión y succión.

Los compuestos depositados que aparecen en los álabes son de dos tipos principales:

- Compuestos insolubles en agua, que solo pueden ser eliminados mecánicamente.
- Compuestos solubles, que pueden ser eliminados por inmersión o lavado en agua.

Los segundos pueden ser más ventajosos bajo ciertas circunstancias.

Una consecuencia más profunda de la deposición de químicos en los elementos del paso del vapor es que algunos de estos compuestos son químicamente agresivos y tienen el potencial salirse de la solución y depositarse en las superficies internas de la unidad una vez las condiciones del vapor se hayan disminuido a su paso por varias coronas de álabes. Algunos de estos compuestos tienen la posibilidad de partir y acumularse en recovecos, donde, bajo condiciones apropiadas serán químicamente agresivos, causando reacciones que llevarán al deterioro de los componentes y, por último, fallo.

Las condiciones del vapor en cualquier escalonamiento son función de las condiciones de salida de la caldera y la unidad de carga generada, por lo tanto, con los cambios cargas eléctrica, las condiciones en los álabes se modificarán, moviendo las condiciones del vapor hacia cualquier región, tanto la sobrecalentada como la saturada. Bajo ciertas condiciones de operación los mecanismos de deposición, colección y concentración favorecerán el entorno para varios tipos de corrosión.

5.2 Introducción de impurezas en el paso de vapor

Una de las cosas más importantes en la planta de producción de potencia es determinar las concentraciones presentes de contaminantes, especies moleculares e iones presentes en la turbina de vapor, humedad y deposiciones, en concreto NaCl, NH₄Cl, NaOH, NaSO₄ y SiO₂. Estos compuestos pueden acceder por varias fuentes y mecanismos, algunos como resultado del daño mecánico sufrido por otros componentes del paso del vapor. Otras fuentes son las plantas de tratamiento de agua, donde se requiere un control riguroso del proceso.

Solo una parte del número total de iones que ganan acceso a la turbina desde estas fuentes son corrosivas o tienen el potencial para producir compuestos corrosivos bajo presión y temperatura. Sin embargo, si las condiciones locales del vapor son favorables, y aparece la acción de la corrosión, esta combinación puede causar potenciales paradas dramáticas y caras, y algunos de los escalonamientos de la turbina se pueden encontrar bajo peligro. Los escalonamientos que se encuentra bajo mayor riesgo son aquellos que se encuentran en la región de la línea de saturación. Esto es debido a que estos escalonamientos son en los que se forma la humedad, y algunos de estos iones corrosivos salen de la solución para ser inmediatamente capturados por las moléculas de agua en esta región, y luego son transportados por la humedad suspendida a través del paso del vapor. La [figura 6.7.1](#) muestra

las zonas del ciclo donde tienen acceso las impurezas, donde aparecen deposiciones y finalmente corrosión.

las deposiciones se pueden clasificar en ocho grupos de análisis, incluyendo óxidos, silicatos, sulfatos, fosfatos, carbonatos, aluminios, cloros y elementos no compuestos, que se encontrarán presente en diferentes zonas y rangos de presiones. La mayoría son químicamente inertes y capaces de reducir la eficiencia del paso de vapor, así como deteriorar las propiedades del metal.

Otros compuestos son químicamente agresivos o con capacidad para formar compuestos agresivos. Se ha determinado que estos compuestos y elementos son introducidos o formados en la unidad debido a cuatro factores principales:

- Pobre integridad del condensado. Cualquier fuga interior de agua bruta de refrigeración añadirá impurezas al vapor, con la posible contaminación de los componentes del paso del vapor. Esto ocurre sobre todo si las fuentes de enfriamiento contienen aguas saladas o salobres.
- Insuficiente análisis químico a través del circuito de vapor y agua, particularmente en la parte de vapor del ciclo.
- Mezcla inapropiada de químicos de tratamiento de agua de alimentación.
- Operación inapropiada de demineralizadores, produciendo hidróxido de sodio y sulfuro de sodio.

5.2.1 Fuentes de las impurezas del paso de vapor.

Para poder controlar de forma continua los problemas durante la operación asociados a la ingesta de impurezas en el ciclo, es necesario conocer las fuentes de dichas impurezas. Algunos aparecen como resultado del daño mecánico en otros componentes del ciclo del vapor y otros como consecuencia de un mal tratamiento del agua de alimentación del generador.

El oxígeno puede acceder al ciclo a través de algunos puntos donde existen condiciones por debajo de las atmosféricas. Las unidades poseen frecuentemente equipos para eliminar aire que entra en el sistema antes de que causen daños por corrosión.

Las fuentes por tanto se consideran internas o externas, siendo las externas las que provienen de los intercambiadores, del sistema de fugas, de las aperturas de las turbinas en paradas e internas, que son aquellas relacionadas con la calidad del agua de alimentación a la caldera.

Impurezas transportadas al sistema de fugas.

Una fuente común de contaminantes en el paso de vapor es la infiltración de agua bruta en el sistema. Esto sucede normalmente en el condensador, que es usado para producir vacío de operación. El agua para enfriar será tomada de lagos, ríos o el mar.

Es necesario considerar el efecto de instalaciones donde existe agua salina, ya que, a través del acceso al condensador, el agua salina puede producirse una ingesta importante de contaminantes. El agua de mar contiene altos niveles de algunas sustancias, principalmente sales que pueden ser altamente corrosivas si ganan acceso al paso del vapor.

Generadas por el sistema de tratamiento de aguas.

Los sistemas modernos de generación de energía requieren que el vapor de agua en la caldera sea desmineralizada y tan pura como sea posible. Este requisito introduce la necesidad tratar el agua antes de introducirla en el ciclo, proceso que causará la introducción en exceso de químicos en la unidad si no se controla con tolerancias estrechas. Algunos de estas sustancias tratadas tienen la capacidad de formar productos químicos indeseables.

Agua del atemperador contaminada.

El agua usada para controlar la temperatura de entrada del sobrecalentador o porción del recalentamiento de la caldera debe ser tomada de una fuente fiable y limpia, normalmente se utiliza agua de alimentación.

Agua del espray del escape de la turbina.

El agua se emplea en la salida de la baja presión para controlar el vapor y la temperatura del álabe a cargas bajas, cuando el vapor vuelve a entrar en los álabes del último escalonamiento, puede causar la erosión del borde de

estela. Esta agua debe ser tomada de una fuente limpia y fiable, a menudo se toma agua del condensador, que contiene impurezas y oxígenos disueltos que puede iniciar y promover la corrosión. En algunas plantas nucleares el agua puede ser tomada de fuentes auxiliares.

Uso de sulfuro sódico como eliminador de oxígeno.

En calderas de alta presión. La descomposición del sulfuro sódico produce sulfuro de hidrógeno en la región del condensado primario de la unidad.

Uso de material de limpieza en las paradas.

Los fluidos utilizados para la limpieza pueden contener niveles inaceptables de ácido, cloros o sulfuros cuando se usan para eliminar las deposiciones y otras actividades de limpieza durante las paradas de la unidad.

Lubricantes de fabricación y reparación.

Para la fabricación de turbinas de vapor se emplean materiales y procesos de producción sofisticados, muchos requieren el uso de lubricantes de corte y fluidos que contienen compuestos de sulfuro, cloro, fósforo y magnesio. Estas sustancias, incluso en pequeñas cantidades, deben ser eliminadas de la superficie los componentes antes de que sean aceptados y antes de que sean ensamblados y/o enviados.

El fluido es utilizado para lubricar y enfriar el metal cortado durante el proceso. Los fluidos utilizados son compuestos en base de agua o aceite. El que el fluido sea el más adecuado depende del material a cortar, la relación de corte y la profundidad de corte. Muy pocos componentes de la turbina de vapor pueden ser mecanizados sin el uso de fluidos de corte y/o refrigeración. Por lo tanto, los residuos de estos compuestos están potencialmente presentes en las superficies de algunos componentes. Puede aparecer cuando la unidad es nueva o cuando vuelve al funcionamiento después de una reparación, las impurezas pueden aparecer también introducidos cuando las partes reemplazadas son instaladas en las paradas de mantenimiento.

Conservantes para el transporte y almacenamiento.

Cuando los componentes son enviados, muchos de ellos requieren protección durante el transporte, incluyendo los pasos para prevenir la corrosión atmosférica. Si los componentes necesitan ser almacenados durante la instalación, y tal vez colocado en el inventario de largo plazo, necesitarán protección a la corrosión.

Los materiales usados para la protección deben ser elegidos anticipando su vida y debe ser de una naturaleza que, si no se ha limpiado completamente antes de la instalación, puede introducir compuestos indeseables en el sistema o incluso atacar a los componentes durante el almacenamiento. La Figura 5.1 muestra los álabes eliminados del inventario para instalación, que ha sufrido un ataque corrosivo.

Otras fuentes de contaminantes transportados en el paso del vapor son aquellos que son producidos en otras partes del equipo incluidos en el ciclo de potencia. Los más notables son el hierro y los óxidos de cobre producidos como subproductos de los metales disueltos de los tubos y superficies del equipo. Esto incluye las tuberías de la caldera y los calentadores de agua regenerativos, donde agua a alta temperatura y presión se pone en contacto con estos mientras la unidad produce energía.

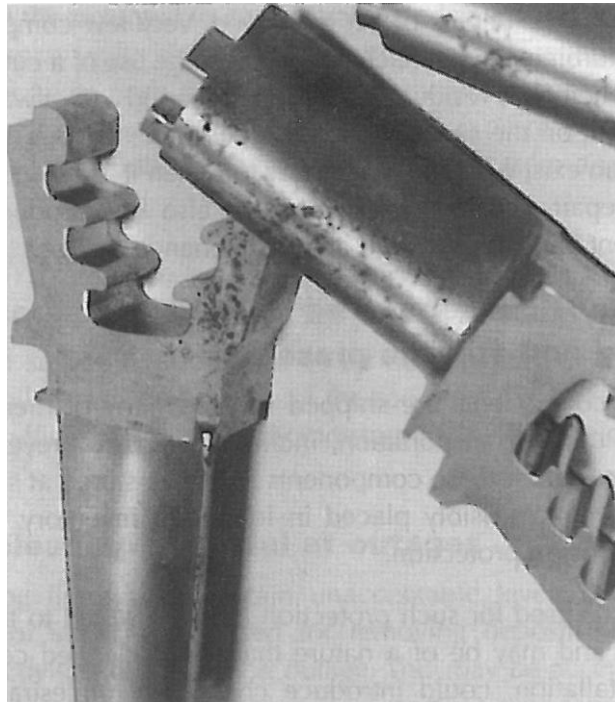


Figura 5.1 Álabes que han sufrido corrosión durante su almacenamiento

Geotérmica.

El vapor utilizado en las unidades de vapor geotérmico tiende a operar a presiones bajas, este vapor estará contaminado por minerales y compuestos disueltos procedentes de la tierra.

En términos de deposición de impurezas, las unidades geotérmicas proporcionan un conjunto discreto de consideraciones. Esto es gracias a que pueden encontrarse deposiciones completamente diferentes a las encontradas en unidades usadas para ciclos más convencionales de plantas fósil y nuclear.

Las unidades geotérmicas están organizadas para ser de ciclo directo o indirecto. En unidades de ciclo directo, del vapor obtenido del interior de la tierra que pasa a través del paso del vapor, a menudo con separadores interpuestos entre el suministro de vapor y la turbina. Los separadores eliminan la humedad suspendida y partículas sólidas del vapor.

Los ciclos indirectos emplean vasijas de intercambio de calor entre el vapor geotérmico y el fluido de trabajo. En estas unidades el fluido de trabajo debe tener una pureza comparable con el de las unidades fósiles nucleares. Sin embargo, estas unidades pueden estar sujetas a la ingesta de impurezas como resultado del fallo de los tubos en el intercambiador de calor que depende de los corrosivos transportados, puede ser relativamente común. En ciclos indirectos, las vasijas del intercambiador de calor pueden sufrir grandes deposiciones y daños corrosivos.

El vapor geotérmico tiende a ser saturado, contenido como mucho solo unos pocos grados de sobrecalentamiento. Por lo tanto, los componentes del paso del vapor se encuentran todos aproximadamente en la región saturada, con la probabilidad del lavado continuo. El agua presente en las superficies del paso del vapor puede contener impurezas que son depositadas y perjudiciales a la actuación global de la unidad. No obstante, puede tener efectos beneficiosos en términos de eficiencia, tenderá a eliminar una cantidad significativa de compuestos depositados.

5.3 Deposición de impurezas en el paso de vapor

La composición y concentración de los compuestos depositados en el paso del vapor depende de su origen. Independientemente del nivel de cuidado tomado en la operación de la planta para limitar su presencia, las impurezas ganarán acceso a varios frentes y estarán presentes en el vapor. Habrá, por tanto, una deposición de

forma continuada, posiblemente lenta, a través de la vida de la unidad. Lo mejor para clasificar estos compuestos de larga vida, es considerar estos que ganan acceso a través de las fugas en el ciclo, desde algún proceso secundario de intercambio de calor o mantenimiento del sistema y todos presentes como consecuencia de alguna forma de tratamiento del fluido de trabajo.

Probablemente el agente corrosivo más frecuentemente encontrado que afecta al paso por el álabe (y potencialmente el más dañino) es el cloruro de sodio y el hidróxido de sodio. La introducción de contaminantes cáusticos en el agua o vapor del ciclo es generalmente atribuida a la ingesta de sales comunes (NaCl) en el sistema, y la disociación de estos compuestos en sodio y cloro que pueden ser recombinados con los iones de hidróxidos e hidrógeno para formar hidróxido de sodio y el ácido clorhídrico.

Estos compuestos son controlados normalmente en niveles extremadamente bajos, es necesario, por tanto, considerar los mecanismos por los cuales sus deposiciones y su concentración se ve incrementada hasta un nivel inicial de alguna forma de daño por corrosión.

Una vez se obtiene acceso, el cloruro de sodio se disuelve rápidamente en el agua. El hidróxido de sodio una vez formado, puede ser transportado en el vapor de la caldera de agua de alimentación a través del tren de calentamiento de alimentación de caldera. En el sobrecalentador, el agua residual es evaporada, dejando moléculas de hidróxido de sodio en equilibrio con las moléculas de vapor. Estas moléculas de hidróxido de sodio en sus condiciones de equilibrio entran posteriormente en la turbina de vapor y fluyen a través del paso del vapor con el vapor en expansión, con la reducción de la presión y la temperatura, y el vapor abandonando la región de saturación del vapor, la concentración caerá, esto es, las moléculas de hidróxido de sodio capturarán moléculas de agua para diluir su concentración y mantenerse en condiciones de equilibrio.

Por debajo de la temperatura de fusión del hidróxido de sodio (318 C), los iones de esos saldrán de la solución y serán depositados en los elementos del paso de vapor una vez que las gotas que los contienen entren en contacto con estos componentes. Estas moléculas, una vez situadas en la superficie del componente pueden fluir, concentrarse y ser retenidas en varias grietas o recovecos formados en el paso del vapor. Estas regiones no suelen ser accesibles, por lo que la identificación y limpieza de la deposición en estas zonas es complicada. Como se comentará posteriormente en este capítulo, estos recovecos son las zonas de inicios de corrosión en el sistema.

Cuando la presión y la temperatura en el paso del vapor cambia, las moléculas depositadas intentarán alcanzar las condiciones de equilibrio, esto no será siempre posible de forma rápida, y necesitará grandes periodos de operación en estas nuevas condiciones hasta que lo alcance. Esto es debido al transitorio que sufre el metal de los componentes hasta las nuevas condiciones de equilibrio. Dependiendo de la localización en el paso del vapor, la solución de hidróxido de sodio necesitará distintos tiempos para alcanzar las nuevas condiciones de equilibrio en estos recovecos. Este retraso en el tiempo dejará una solución de hidróxido de sodio en un particular estado activo durante largos periodos, cada vez que aparece un cambio de presión y temperatura en el paso del vapor.

Esta actividad incrementada es también posible cuando la unidad está operando en condiciones fuera de diseño y cambia la temperatura de entrada del vapor debido a una fluctuación o variación en la temperatura de los escalonamientos. Bajo estas condiciones, los componentes y regiones de la unidad que deben estar en una región sin hidróxidos de sodio son llevados a una región activa de hidróxido de sodio y puede, como consecuencia, sufrir ataque corrosivo.

En zonas de altas temperaturas y presiones (sobrecalentado), la corrosión por tensión debido a la actividad del hidróxido de sodio no aparece fácilmente, debido principalmente al hecho de que la temperatura del vapor y de los componentes se encuentra sobre el punto de fusión del hidróxido de sodio. La alta densidad del vapor en estas regiones y su habilidad para prevenir la deposición de moléculas de hidróxido de sodio es suficiente para evitar causar la acción corrosiva.

El número de fallos e instancias de daños por corrosión encontrados en las regiones de baja presión de la turbina de vapor debido al hidróxido de sodio, indica que los componentes en estas regiones son vulnerables si los agentes corrosivos se pueden adherir a las superficies y encontrar recovecos a los que migrar, recogerse y concentrarse.

El oxígeno disuelto en el vapor puede ayudar a promover la oxidación del material del paso del vapor. Por esta razón, es necesario limitar la cantidad de oxígeno presente en cada momento. El oxígeno acumulado es a menudo eliminado del sistema de agua vapor por el uso de sulfuro de sodio (Na_2SO_3), una sustancia indeseable, pero relativamente inofensiva en concentraciones controladas. Sin embargo, si el sulfuro de sodio es usado en o

encuentra camino hasta la caldera de alta presión, se forma un compuesto corrosivo de sulfuro de hidrógeno (H_2S) en el sistema. El sulfuro de hidrógeno es a menudo encontrado en aplicaciones geotérmicas, causando picadura y llegando a la fatiga por corrosión si la picadura se forma en regiones de altas tensiones.

Con respecto a los componentes de la turbina, muchos fallos por corrosión bajo tensión en rotores y discos han sido atribuidos al sulfuro de hidrógeno. A diferencia de hidróxido de sodio, el sulfuro de hidrógeno no necesita estar presente en altas concentraciones. De hecho, ha sido demostrado que la rotura por sulfuro aparece en materiales que rondan una dureza Brinell de 235 con concentraciones acuosas de sulfuro de hidrógeno de 1 ppm en 5000 horas. Incluso con menores concentraciones se puede llegar a la rotura de aleaciones con mayor dureza. Como se ha discutido previamente, esta fuente de sulfuro de hidrógeno proviene de la eliminación de oxígeno en tratamiento de agua (o su contenido en el vapor geotérmico), por lo tanto, es posible para largos periodos bajo niveles de concentración de sulfuro de hidrógeno existan con estos métodos de tratamiento. El uso de sulfuro de sodio ha sido abandonado en la mayoría de las plantas, ahora, en su lugar se tiende a emplear tratamiento de volátiles con amoníaco e hidracina.

Por otra parte, los óxidos de hierro y cobre y silicato son las impurezas más comunes en el paso del vapor. Los óxidos de hierro son resultado de la corrosión del interior de la caldera y los óxidos de cobre son producidos de la corrosión de los tubos de calentamiento del agua en la alimentación. Otras sustancias, usadas como disolventes y resinas desmineralizadas ayudan a la formación de compuestos orgánicos. Es considerable destacar que, una vez las deposiciones se han empezado a formar, las tres primeras milésimas de pulgada pueden disminuir la eficiencia del álabe un 1%. Esto sucede fundamentalmente en altas presiones, escalonamientos de altas temperaturas, donde el número de Reynolds provoca pérdidas con relativos bajos niveles de deterioro en la superficie.

Debido a estos efectos degradantes, se pretenderá en la planta la reducción de formación y deposición de los compuestos. Esto es necesario para la eficiencia y en el caso de las sustancias químicamente agresivas, preserva la integridad mecánica de los componentes y mantener los niveles óptimos de diseño de la unidad.

La concentración de sílice en el agua de la caldera es difícil de controlar, y la gravedad de los problemas relacionados con la sílice, hacen que se preste atención, ya que la sílice es sinónimo de deposición en la turbina. En algunos casos puede llegarse a la conclusión de que el único problema en el cicló es la sílice. Sin embargo, la mayoría de los análisis de deposiciones muestran abundancia de óxidos metálicos y otros compuestos, los cuales se encuentran también dañando la eficiencia, llegando a producir un daño mucho más grave en términos de formación de compuestos corrosivos.

La deposición que es formada en los componentes del paso del vapor consta de compuestos solubles e insolubles. Las deposiciones en aquellas partes de la unidad que operan en la región sobrecalentada son principalmente solubles (entorno al 90%) mientras que aquellos que aparecen en la región saturada son fundamentalmente insolubles. Esto es casi ciertamente debido a que las deposiciones solubles que se acumulan en la región húmeda son lavados continuamente por el agua depositada por el fluido de trabajo, y son por lo tanto disueltos y eliminados.

Una vez el agua es capaz de disolver y eliminar muchos de los compuestos solubles es posible restablecer la eficiencia del paso del vapor hasta condiciones cercanas a las iniciales por lavado. Este proceso de lavado requiere que la unidad opere a cargas bajas durante algún periodo, utilizando vapor de baja calidad que pasa rápido a las condiciones saturadas. El agua formada por condensación se acumula en los componentes del paso de vapor, de este modo, se lava y elimina gran parte de los compuestos solubles acumulados en las superficies. Para condiciones avanzadas del vapor, este tipo de lavado debería de tomarse como medida temporal debido a que las deposiciones insolubles dejadas a través de la superficie del paso del vapor actúan como base a través de las cuales los componentes solubles se depositarán una vez la unidad vuelve a la operación normal. Bajo condiciones normales de servicio, la unidad verá disminuida su eficiencia hasta las condiciones previas al lavado en una semana o dos de operación normal continuada. En la figura 6.3.5 se muestra este efecto para una planta de combustible fósil, observándose el deterioro de la eficiencia posterior al arranque y disminución de esta con el uso, posteriormente, tras la realización del lavado la eficiencia de la planta vuelve a aumentar prácticamente hasta los valores originales. Este tipo de lavado no ha sido muy efectivo en el tratamiento de plantas geotérmicas.

Por último, es improbable que el acabado superficial del álabe al inicio de la operación se prolongue en el tiempo a través de toda la superficie del cuerpo. Estas partes dañadas debido al deterioro de la superficie influenciarán en la eficiencia de la turbina, disminuyéndola, por lo que el acabado superficial óptimo de pérdidas mínimas de

la superficie requerido para cualquier componente se puede determinar a través del conocimiento de las condiciones del vapor y el número de Reynolds del escalonamiento que atraviesa el flujo.

5.3.1 Modificación del medio corrosivo en el paso del vapor.

Aunque la acción corrosiva puede empezar en cualquier medio, algunos promueven una relación de agresión química más rápida y produce una condición en la cual el deterioro alcanza un nivel peligroso e inaceptable en un corto periodo de tiempo. Los últimos escalonamientos de la sección de baja presión son los más sometidos a daños por corrosión. Aquí es donde se encuentra la humedad y donde algunos mecanismos pueden causar fluctuaciones de la temperatura en la porción de la unidad se encuentran en la región de operación húmeda o sobrecalentada.

Se deben considerar los siguientes factores para evaluar los posibles cambios en la concentración de partículas corrosivas, influenciados por las condiciones de vapor en varias partes del ciclo:

- **En operaciones a plena carga, los escalonamientos de baja presión vulnerables al ataque corrosivo deberían operar en la región de saturación.**

Una vez se reduce la carga, hay un mayor grado de aceleración en el escalonamiento de control o las válvulas de control en unidades con aceleración controlada. Esta acción modifica la línea de expansión, moviéndola hacia la derecha en el diagrama de Mollier, desplazando los escalonamientos desde la zona saturada a la sobrecalentada.

Los efectos de este cambio se observan en el diagrama de Mollier de la figura 6.3.1, en el que las líneas de expansión de la unidad a plena carga corresponden con A, B, ..., E y las condiciones a cargas parciales son A, Bm, ..., Em. El efecto del arco parcial de admisión es que la porción de la unidad que se mueve en la sección de salida de alta presión pasa de B a Bm. La salida final de la sección de baja presión se mantiene en Pxd, pero la fracción seca cambia de E a Em, que es sustancialmente más seca.

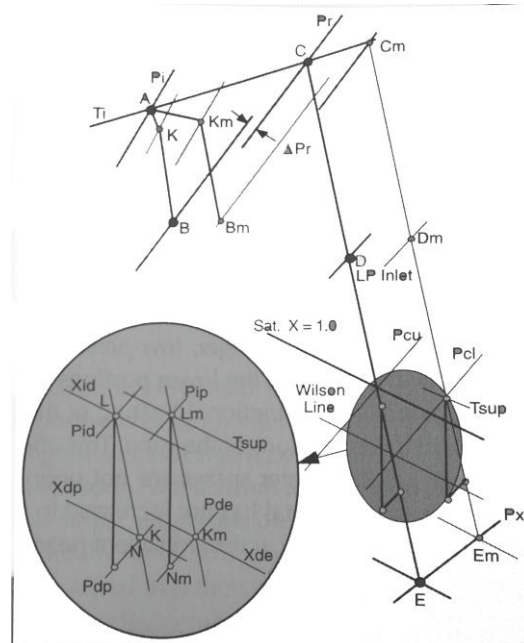


Figura 5.2 Expansión del escalonamiento

Los escalonamientos en la sección de baja presión donde la transición de las condiciones sobrecalentadas a las saturadas se muestra en los escalonamientos 'L-N-K'. El efecto de la aceleración es mover este escalonamiento a las condiciones 'Lm-Nm-Km'. Esto modificará el título de vapor de 'Xid' a 'Xdp' en plena carga y desde sobrecalentado hasta 'Xdc' a carga parcial. La implicación de este cambio de condición es que la aceleración e incluso el grado de sobrecalentamiento en un escalonamiento puede variar según cambie la carga. Se encuentran potenciales concentraciones de agentes corrosivos y mientras se opera a carga parcial, la acción corrosiva se puede iniciar y continuar.

- **El fallo para mantener la temperatura del vapor del sobrecalentamiento de la caldera y/o recalentamiento en condiciones de diseño.**

La reducción de la temperatura inicial y de recalentamiento detectado por cualquier unidad depende del tipo de caldera y la carga a la que la unidad opera.

En general, bajando la temperatura proporcionada a la caldera cuando se mantiene la presión en el punto de diseño o alrededores, las condiciones de vapor a través de la sección de baja presión bajan. Esta reducción de la temperatura puede ser más baja en los primeros escalonamientos de esta sección en la región húmeda o activa de hidróxido de sodio, en el que las condiciones de cualquier residuo de hidróxido de sodio pueden activarse químicamente y causar corrosión.

- **A carga suave (por debajo del 25 %) el flujo principal de vapor es principalmente a través de la porción del flujo exterior del paso del vapor.**

Esto sucede en especial en los álabes largos de baja presión. Este efecto provoca recirculación a través de la porción más baja de los álabes del escalonamiento móvil, causando *windage* y calor por fricción de los últimos escalonamientos de álabes en la raíz y secciones más bajas del álabe. Si los espráis de agua no están operativos, o la temperatura del vapor y del metal no se ha incrementado de forma significativa, habrá partículas corrosivas químicamente activas cercanas a la raíz y la parte más baja del canal del álabe.

- **En los elementos de sellado – diafragmas, extremos del eje y cierres de laberinto- el trabajo no expansivo del vapor puede causar calentamiento por encima de la temperatura de saturación.**

La figura 5.3 muestra las condiciones del vapor en la zona de sellado de final del eje, o una posición intermedia o sección de recalentamiento (la condición de salida del vapor ‘A’ como salida del final de escalonamiento en esa sección). Una vez fuga el vapor en las condiciones ‘A’ por los cierres de laberinto, las sucesivas caídas de presión aparecen y causan con el tiempo que el vapor se mueva sobre ciertos valores de sobrecalentamiento. Existe la posibilidad que los contaminantes transportados hasta las juntas de estanqueidad pasen a ser químicamente agresivos y causar corrosión en alguna posición acial donde las condiciones del vapor favorezcan la corrosión.

La Figura 5.3 muestra la posición final del eje de una turbina pequeña industrial, donde se ha producido la corrosión en la región de la junta de estanqueidad



Figura 5.3 Corrosion por picadura en los sellos del final del eje de una turbina pequeña industrial

En resumen, la sección de baja presión de la unidad es aquella en la que se forma agua por condensación, en el diagrama de Mollier aquella zona por debajo de la línea de Wilson. Esta agua retiene iones corrosivos que serán lavados y transportados hacia los recovecos o grietas del paso del vapor donde se acumularán, hasta que las condiciones del medio los permitan atacar al metal del paso del vapor.

A plena carga (y después de la expansión a través de la sección de alta presión, el recalentamiento y expansiones posteriores a través del recalentamiento y escalonamientos de la sección de baja presión) el vapor fluirá por la línea de saturación, donde la mezcla de dos fases será sobresaturada. El agua se formará entonces en la línea de Wilson (el punto, o condiciones en el que la transferencia de calor del líquido al vapor tenga lugar). Desde estas condiciones de formación del agua hasta que el vapor alcanza el condensador, hay agua libre en el fluido de trabajo. En este punto (aunque para muchas plantas de combustible fósil es el penúltimo escalonamiento (L-1)), los iones corrosivos pueden ser transportados hasta regiones del escalonamiento donde se acumularán y bajo un medio propicio, concentrarse. Si esta unidad continúa operando a plena carga, estos iones no serán capaces de afectar al material de la corona, ya que se diluirán y no reaccionarán con el acero. Desafortunadamente, pueden aparecer dos posibles eventos que haga a estos iones químicamente agresivos:

- Cambio en las condiciones del paso del vapor.
- Apagado de la unidad.

5.3.2 Cambio en las condiciones del paso del vapor.

Cualquier mecanismo de operación que cambia las condiciones del vapor en la unidad modificará el medio en alguna parte donde haya iones corrosivos. Considerando estos factores destacamos algunos cambios:

Cambios en la carga de la unidad: Cuando se reduce la demanda a la salida de la unidad para coincidir con la demanda del sistema la cantidad de vapor admitido en la unidad se reducirá, causando un movimiento hacia la derecha en el diagrama de Mollier. Esto cambiará las condiciones del vapor de algunas coronas de álabes de la región saturada a la sobrecalentada.

Cambio de las condiciones del vapor inicial: Si las condiciones iniciales del vapor, presión o temperatura son ajustadas para alcanzar demandas de cargas bajas, la línea de expansión se ajustará otra vez, causando cambios en la humedad en las diferentes posiciones de los escalonamientos.

Considerando la figura 5.4 para satisfacer la reducción de la demanda y permitir al escalonamiento de control permanecer completamente abierto (sin introducir las pérdidas de admisión parcial), la presión inicial se reduce desde 'Pd' hasta 'Pm'. Esto se muestra sucediendo a la misma temperatura inicial 'Td'. Con este cambio en la presión de entrada, las líneas de expansión del recalentamiento y baja presión son desplazados hacia la derecha en el diagrama de Mollier. La consecuencia obtenida es que en la sección de baja presión se entra en la región de saturación más tarde en la expansión, y los escalones movidos hacia la región sobrecalentada, alejarán a la humedad de los iones corrosivos. Estos se recombinarán en moléculas, depositarán y será activo, introduciendo la potencial corrosión.

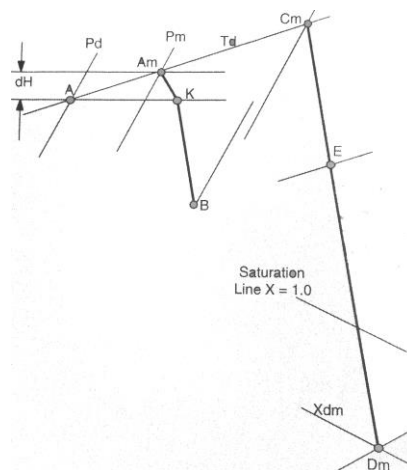


Figura 5.4 Efecto de la reducción inicial del vapor

Cambio en la temperatura de recalentamiento: El efecto del cambio de la temperatura de recalentamiento ha sido considerado en la figura 6.3.2, donde se observa el efecto de que no mantener la temperatura modifica la línea de expansión.

El ajuste más común es reducir la temperatura de recalentamiento. Los operarios reducirán ocasionalmente la temperatura del primer escalonamiento del recalentamiento que tiene componentes sometidos a altas tensiones. En estas situaciones, la cantidad de recalentamiento o expansión de baja presión que aparece en la región sobrecalentada es reducida, y más escalonamientos de baja presión son desplazados en la región de saturación.

Esta reducción de la temperatura de recalentamiento desplazará los escalonamientos hacia la región húmeda, reduciendo el potencial daño por corrosión. Sin embargo, esto hará que algunos escalonamientos que se hayan desplazado desde el sobrecalentamiento hacia la región húmeda sean candidatos para retener iones corrosivos, que migraran después hacia recovecos donde se concentrarán. Si la temperatura de recalentamiento se devuelve a los valores de diseño, estos escalonamientos saturados pasarán a estar sobrecalentados y no será posible la activación de ningún ion corrosivo.

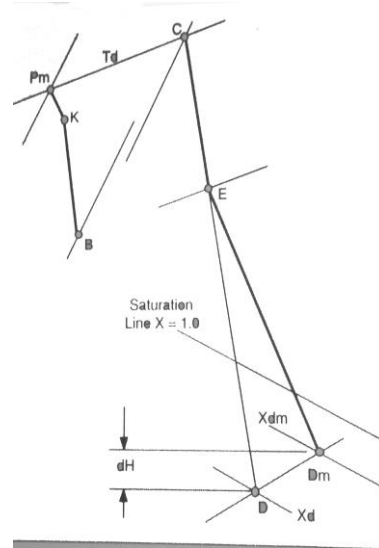


Figura 5.5 Efecto de reducir la eficiencia en E-D

Cambios en la eficiencia del paso del vapor: si la eficiencia de cualquier parte de la zona de expansión del paso del vapor cambia, afectará sobre todo a la pendiente de la línea de expansión.

Considerando la figura 5.5- una reducción en la eficiencia de la sección de baja presión después de dejar la sección de recalentamiento, causa una reducción de la energía disponible de esta sección de 'dH'. Aquí la línea de expansión de baja presión se traslada a la derecha del diagrama de Mollier y moverá los escalonamientos desde la región saturada hasta las condiciones sobrecalentadas, haciéndoles más susceptibles a la acción de la corrosión si los iones corrosivos se encuentran presentes en los componentes del paso del vapor.

5.3.3 Parada de la unidad.

Cuando se para la unidad, se coloca sobre un virador hasta que la temperatura de los componentes se reduce hasta un nivel en el que es seguro dejarlo reposar. El problema de dejarla reposar antes de tiempo es que los gases calientes en el paso del vapor elevarán su temperatura, causando el abombamiento de la carcasa, introduciendo daño permanente o daño difícil y caro de reparar. Existen también problemas relativos al rotor, ya que adquirirá una curvatura menor de forma temporal, que necesitará enderezarse antes de que la unidad pueda ser vuelta al servicio.

Mientras que la unidad deba enfriarse lentamente y mantener unas condiciones seguras después de la parada, es posible que algunos elementos alcancen temperaturas superiores a las que tienen cuando se expande el vapor. Hay, por tanto, partes de la unidad que sufren tensiones incluso cuando la unidad no está operando. Entre estas partes se encuentra el ajuste por contracción en el tambor, el punto de contacto donde el alambre para ataduras

pasa a través del álabe con la interferencia, y las llantas. Por lo tanto, con un aumento de la temperatura localizada y la presencia de agentes corrosivos, se puede iniciar la corrosión. Este daño es promovido por las condiciones de parada y avanzará cuando la unidad vuelva a funcionar.

5.3.4 Patrones de deposición.

Los patrones de deposición son difíciles de predecir en cualquier componente del paso del vapor, aparecen dependiendo sobre todo del tipo de contaminante en el sistema, la carga de la unidad.

Hay, sin embargo, diferencias sustanciales entre los escalonamientos que se encuentran en las regiones sobrecalentadas y saturadas.

La 5.6 muestra un álabe de reacción de alta presión. El paso del álabe tiene un pequeño ángulo de curvatura. El patrón de deposición es relativamente constante a través de la cara de succión. Hay unas deposiciones más gruesas en la región de la garganta, lo que puede ser debido a una repentina reducción de la presión en esta localización, además de la influencia de la separación del flujo que podría aparecer debido a la curvatura del perfil.

Las deposiciones que aparecen en las superficies sobrecalentadas tienden a distribuirse a lo largo del cuerpo de los álabes, con deposiciones en ambas caras, presión y succión.

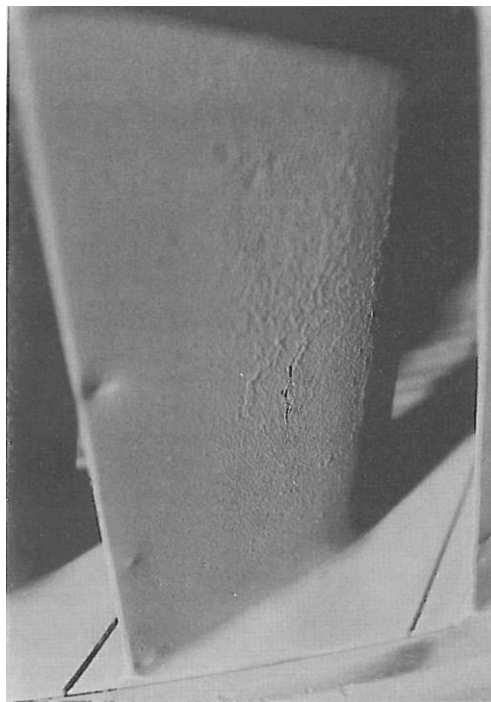


Figura 5.6 Alabe de reacción de alta presión con deposiciones en su superficie

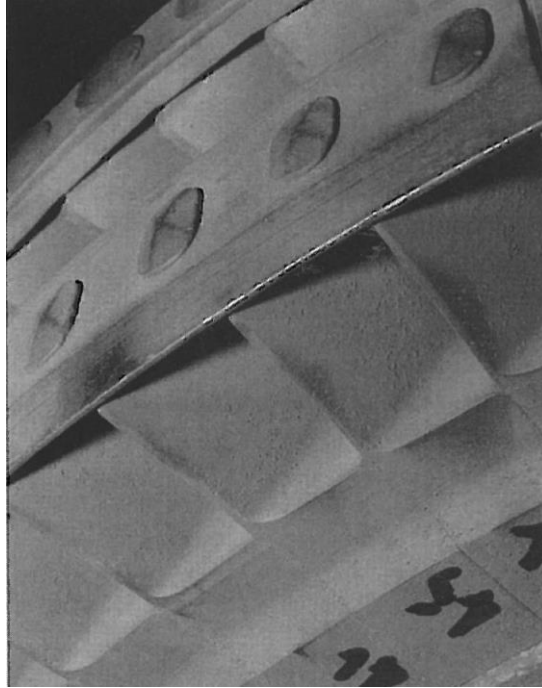


Figura 5.7 Escalonamiento de impulso con deposiciones en su superficie

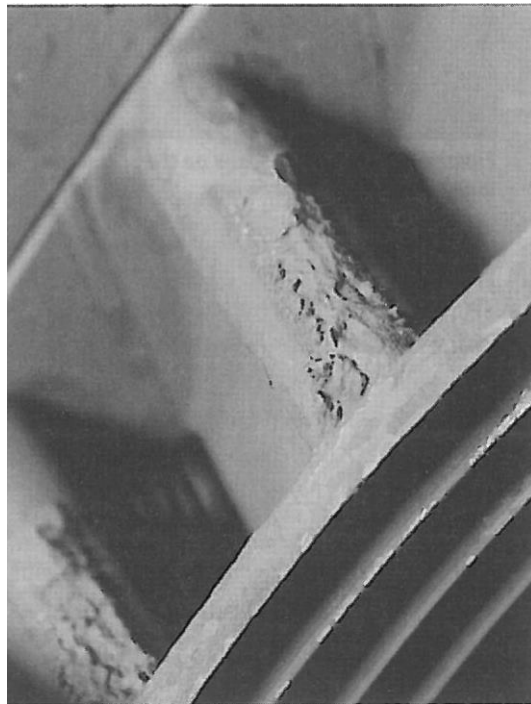


Figura 5.8 Deposiciones fuerte sobre el borde de ataque de un álabe estacionario

La figura 5.7 muestra álabes de la sección de alta presión que ha permanecido en servicio más de seis años después de la última parada y limpieza. Las deposiciones son distribuidas a partes iguales a través de la cara de succión. Como era de esperar en la mayoría de los escalonamientos, las deposiciones en la cara de presión tienden a ser más gruesas que los presentes en la cara de succión. Sin embargo, la cara de succión tiende a tener deposiciones gruesas siguiendo la posición de la separación del flujo. Esta diferencia resultante del vapor y los contaminantes transportados que han sido forzados a mantener contacto con el lado de presión, tendiendo a la

adhesión de mayores cantidades. LA figura 5.8 muestra deposiciones duras en la entrada de los álabes estacionarios, y la figura 5.9 muestra la cara de succión del mismo escalonamiento. En este caso, se ha perdido el control de la caldera apareciendo oxidación, causando importante deposición en ambos álabes, los del estator y los del rotor.

Como las escamas formadas en el canal entre los álabes y las paredes laterales se hacen más grandes, es de esperar que en dicha parte sufra pérdidas y desprendimiento. Este es particularmente el caso bajo la influencia del cambio de la temperatura del vapor cuando la diferencia entre coeficiente de expansión del acero y las escamas provoca la ruptura de la superficie. Las escamas que rompen el vínculo a la base del metal se descascarillarán, dejando una superficie más lisa debajo, como se muestra en la figura 5.10.

En la dirección radial, pueden encontrarse diferentes cantidades y proporciones de deposiciones. La relación de deposiciones es dependiente de un grado por encima de los patrones de carga de la unidad, el ángulo que forma el canal del álabe y la variación del ángulo con respecto al cuerpo del álabe. Se pueden apreciar cambios en el tipo de deposiciones a través de la longitud radial del cuerpo de los álabes del rotor. Esto es probablemente debido a la mayor densidad de algunos compuestos y ser centrifugados hacia la cubierta. La figura 5.7 muestra un cambio característico, con un mayor grado de deposición de óxido de cobre hacia las regiones exteriores del álabe.

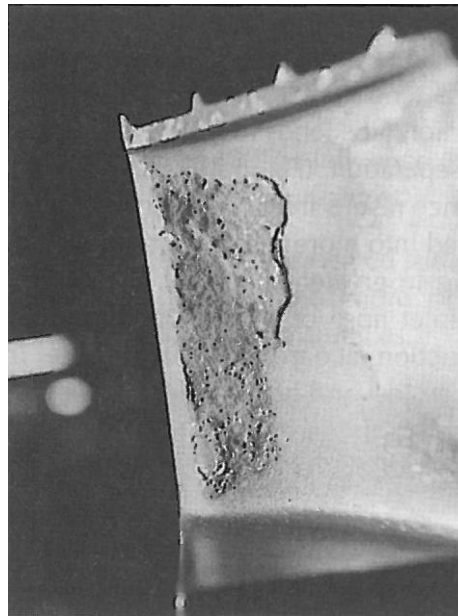


Figura 5.9 Depoiciones duras en la cara de presion

En la dirección radial, pueden encontrarse diferentes cantidades y proporciones de deposiciones. La relación de deposiciones es dependiente de un grado por encima de los patrones de carga de la unidad, el ángulo que forma el canal del álabe y la variación del ángulo con respecto al cuerpo del álabe. Se pueden apreciar cambios en el tipo de deposiciones a través de la longitud radial del cuerpo de los álabes del rotor. Esto es probablemente debido a la mayor densidad de algunos compuestos y ser centrifugados hacia la cubierta. LaFigura 5.7 muestra un cambio característico, con un mayor grado de deposición de óxido de cobre hacia las regiones exteriores del álabe.

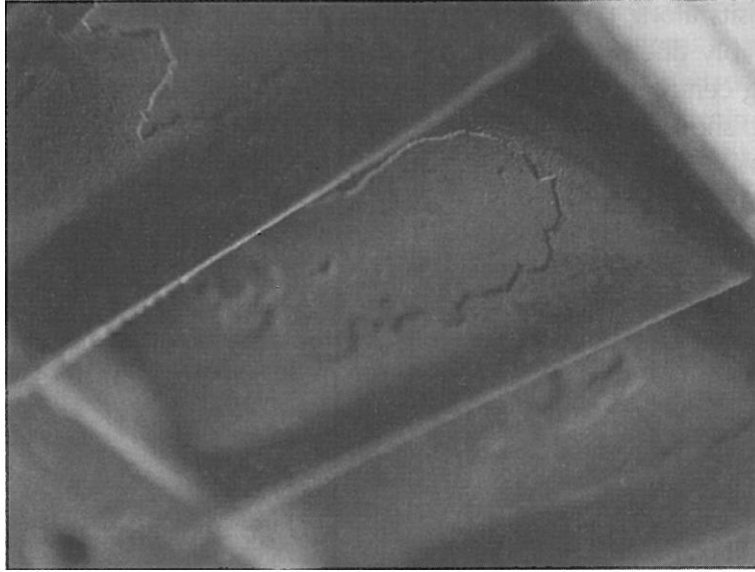


Figura 5.10 Depósitos en la cara de presión de los álabes del rotor

La figura 5.1 muestra una porción del escalonamiento en el que las deposiciones en el cuerpo del álabe después de más de cinco años de operación son menores que los previstos. Sin embargo, se encuentran deposiciones duras bajo la cubierta. Estas deposiciones son obviamente compuestas que han sido centrifugados hacia fuera y han sido depositados en la parte interior de la carcasa. Esto puede representar una considerable pérdida de energía, particularmente en escalonamientos de pequeña altura radial.

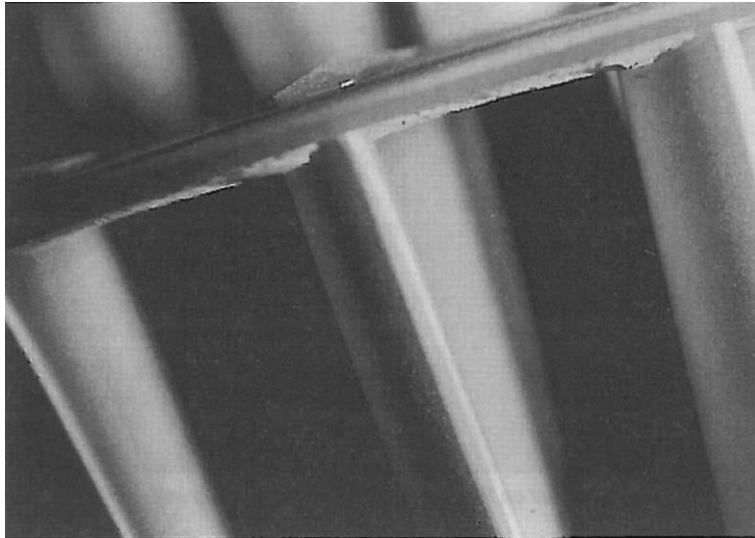


Figura 5.11 Depósitos duros debajo de la cubierta de una corona de álabes del rotor

Debido a la ausencia de efectos centrífugos, las coronas de álabes estacionarios tienden a tener diferentes patrones de deposición que en los álabes móviles. Sin embargo, la composición de las deposiciones es esencialmente la misma, son solo función de las condiciones del medio del vapor en el escalonamiento.

En los álabes estacionarios de la región saturada, las deposiciones suelen aparecer de una capa de agua a través del canal del álabe, normalmente en dirección radial.

5.3.5 Deterioro de la eficiencia del paso del vapor.

En condiciones de perfecto funcionamiento, el paso de vapor por la turbina se fabrica bajo determinadas especificaciones, consiguiendo un estado de máxima eficiencia sin inducir en excesivas tensiones o

introduciendo un coste excesivo de fabricación aumentando el coste de la producción de forma injustificada, por lo que, se deberá realizar un balance entre la integridad mecánica y la eficiencia, así como las partes óptimas y como han de ser ensambladas.

Sin embargo, con el transcurso del tiempo, la eficiencia original se deteriorará. Con la tecnología actualmente disponible, no es posible eliminar este tipo de deterioro completamente. Pero es posible minimizar el efecto excesivo prestando atención durante el diseño, ensamblaje, fabricación, operación y mantenimiento.

Factores importantes son la forma del cuerpo de los álabes y la forma del paso entre los álabes móviles y estacionarios. Además, el grado y dirección del acabado de la superficie producido debe seguir las especificaciones de diseño. Por lo tanto, considerando cuidadosamente cualquier acción limitante de las condiciones iniciales de fabricación (modificando la forma de la superficie) o causando una modificación del perfil y de la forma del paso suficiente para producir una excesiva turbulencia o separación prematura de la capa límite. Todo esto contribuye a la ineficiente utilización de la energía disponible en el vapor.

Una de las causas principales de deterioro en la eficiencia del paso del vapor es la acumulación de sales, óxidos, y compuestos de sílice que ensucian el paso del vapor. Se ha demostrado que los efectos de las escamas o las deposiciones son más persistentes y severos que otros factores que afectan a la pérdida de eficiencia, encontrándose pérdidas entorno al 5%.

5.3.6 Acabado superficial: influencia en el comportamiento de los álabes.

Una vez los componentes del paso del vapor han sido fabricados, el acabado superficial del cuerpo de los álabes y las paredes laterales alcanzan las especificaciones de diseño, por lo que es normal que ambas tengan el mismo acabado. En el caso del diafragma, es posible que las paredes laterales sean bastante rugosas. Sin embargo, para piezas fundidas de gran altura radial, se acepta cierto grado de rugosidad. Para elementos con poca altura radial, las paredes laterales pueden suponer una fuente de pérdida de eficiencia de debidas a la fricción, siendo difícil su asignación al cómputo global.

Es necesario, por tanto, cuantificar las pérdidas por fricción que aparecen en los álabes debido a la deposición de compuestos. Esta deposición crea rugosidad sobre la superficie, lo que induce pérdidas más allá de las previstas en las condiciones de diseño. Para ello será necesario la definición de una superficie principal efectiva.

La experiencia demuestra que se pueden determinar las pérdidas de un escalonamiento en función del número de Reynolds y su relación con el acabado superficial. Por lo tanto, las velocidades, acabados superficiales y su variación sobre el escalonamiento son críticas para establecer las pérdidas. Estos factores que deben ser considerados son:

- Las velocidades de los escalonamientos que se pueden predecir con facilidad y con una razonable exactitud se pueden calcular la velocidad principal a la entrada y la descarga de los pasos de expansión.
- Velocidades de entrada y descarga son valores principales y variarán a través del anillo de entrada y de descarga. Son menores en las paredes laterales de los pasos de expansión formados por las caras de succión y presión de los canales adyacentes.
- El acabado superficial puede variar de la cara de succión a la cara de presión y también ser función de la posición de la cuerda en la superficie.
- El acabado superficial puede variar a lo largo de la altura radial del canal en ambas caras, la de presión y la de succión.
- El acabado superficial puede ser diferente a consecuencia de los patrones de deposición.

Se estima que este acabado superficial efectivo principal, considera el perfil del canal proporcionado por la figura 5.12, donde se han dibujado elementos estacionarios y móviles con un ángulo de desviación grande (impulso o de baja reacción). Para escalonamientos de reacción, el perfil de los álabes móviles y estacionario se muestra en la figura 6.6.2. Es necesario considerar los siguientes factores:

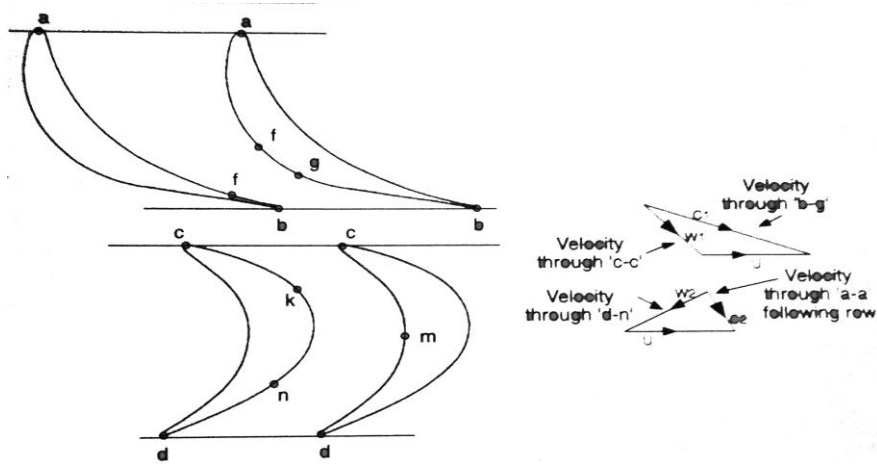


Figura 5.12 Escalonamiento de acción

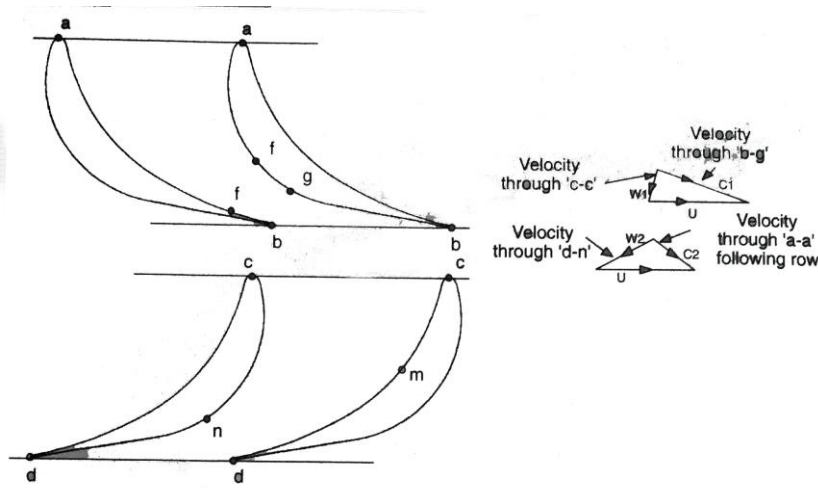


Figura 5.13 Escalonamiento de reacción

Escalonamientos de álabes estacionarios (impulso)

Consideraciones importantes de los álabes estacionarios de impulso:

- Las coronas de álabes estacionarios tienen una entrada a baja velocidad que es la velocidad del vapor que viene del escalonamiento de control o la velocidad de arrastre de los álabes móviles del escalonamiento previo. Esta velocidad incrementa durante su paso hasta un máximo 'b'. La distancia "b-g" representa el cuello.
- La parte más grande de este incremento de velocidad aparece en relativa poca distancia, entre "f-f" y "b-g". Por lo tanto, es necesario reducir al mínimo la fricción en esta parte de la superficie.
- Las deposiciones duras que aparecen en "a-f" en las caras de presión y succión pueden causar la obstrucción del flujo y la separación de la capa límite si son demasiado profundos y rugosos.
- El borde de estela "g-b" es la región donde el vapor tenderá a separarse de la superficie del cuerpo del álabes, dependiendo de la curvatura de la región.

Escalonamientos de álabes móviles(impulso).

Esta forma del perfil tiene un gran ángulo de desviación, forzando al vapor con deposiciones en suspensión a un contacto más cercano a la cara de presión. Por lo tanto, se deben considerar los siguientes factores:

- En la entrada del escalonamiento, la velocidad máxima es “c-c” y la máxima alcanzada en el paso del álabe.
- El vapor se expande de la posición “d-d” donde se elimina la energía cinética del vapor y la velocidad es la mínima.
- El acabado en estas superficies suele ser más rugoso en la cara de presión que en la de succión.
- La región de la cara de succión “c-k” posee una alta velocidad que provocará la separación del flujo si se llega a tener demasiada rugosidad con deposiciones pesadas.
- La cara de succión “n-d” es similar a la parte de los estacionarios “g-b” en canal del estacionario, pero estas velocidades son mucho menores.

Escalonamientos móviles y estacionarios (50% reacción, reacción).

El perfil del álabe para los álabes estacionarios y móviles son idénticos en el 50% de los escalonamientos de reacción. Además, el ángulo de desviación es más pequeño. Se debe prever la influencia de las deposiciones a la hora de diseñar los álabes de reacción con el objetivo de minimizar su influencia.

Además, las velocidades máximas en cada uno de estos escalonamientos serán menores ya que la entalpía usada para pasar a través de cada escalonamiento es sustancialmente de menor proporción que la energía total disponible en la turbina. Sin embargo, la distribución de las velocidades en el escalonamiento es algo parecida al de impulso, en el que la velocidad es mínima a la entrada del escalonamiento estacionario; máximo en la descarga, máximo a la entrada de los álabes móviles y mínimo a la descarga de estos. Se reconoce también que en el escalonamiento de reacción, los álabes móviles producirán un incremento de la velocidad, pero la mayor parte del incremento de velocidad será eliminada desde el vapor por los álabes del rotor del escalonamiento.

Aunque hay muchas similitudes en general con respecto a la velocidad, hay que tener en cuenta ciertas diferencias con respecto al acabado de los álabes del rotor y del estator:

- La entrada a los álabes del rotor no tiene una porción como “c-k” con posibilidad de separación del flujo, como en el ángulo de entrada ronda los noventa grados permite alcanzar una superficie más grande de control del vapor.
- El ángulo de desviación de los álabes es menor, por lo que los contaminantes transportados en el vapor no serán forzados a mantener contacto con la cara de presión o con los álabes del escalonamiento con el mismo grado de aceleración.

Es obvio que la evaluación del acabado superficial es difícil, debido a la compleja naturaleza de los patrones de deposición. Con experiencia, el operador o el ingeniero encargado del proceso pueden hacer las pruebas pertinentes para determinar las pérdidas por acabado superficial, siendo posible el cálculo de las pérdidas de la unidad con un cierto grado de exactitud.

5.3.7 Deposiciones asociadas a la caldera de plantas de combustible fósil.

Como se ha comentado con anterioridad, es necesario un control exhaustivo de los componentes químicos presentes en la caldera, con el objetivo de asegurar la máxima vida de la caldera, la turbina de vapor, el condensador y las bombas, por otro lado, reducir los gastos de mantenimiento de la caldera y el mantenimiento de un trabajo térmico óptimo.

Los elementos compuestos y características del fluido de operación más problemáticos para la turbina de vapor y la caldera:

Escamas de calcio (Ca): El calcio se forma junto con sulfatos (sobre todo ácido sulfhídrico SO_4) y otros compuestos para formar sulfato de calcio, bicarbonato cálcico, carbonato de calcio, ácido clorhídrico, y nitrato de calcio. Durante la evaporación, estos químicos se adhieren a los tubos de la caldera formando escamas. Su formación incrementa con la relación de evaporación por lo que serán más duros en aquellos lugares donde la temperatura del gas sea mayor. Las escamas no son conductoras del calor lo que lleva a una disminución del calor transferido en los tubos de la caldera, y puede resultar en la rotura de estos debido a las altas temperaturas del metal de los tubos. La formación de las escamas también obstruye el sistema de tuberías y puede causar un atasco de las válvulas de seguridad.

Escamas de Magnesio (Mg): ocurre lo mismo que con las escamas de calcio.

Sílice (SiO₂): la sílice puede formar escamas a presiones por debajo de 4.14 MPa. Alrededor de esta presión, la sílice empieza a volatilizarse, pasando junto con el vapor hasta potenciales deposiciones en los álabes y diafragmas de la turbina. Estas deposiciones cambian la superficie de los componentes del paso del vapor resultando en pérdidas de energía. El grado de pérdida depende de la cantidad de deposiciones, su espesor y su grado de rugosidad. Por ejemplo, si el área de la tobera del primer escalonamiento ha sido reducida un 10%, la salida del vapor de la turbina será aproximadamente un 3% menor. Una pérdida similar aparece si la turbina de gas recibe vapor con objeto de aumentar la potencia.

Sodio (Na): El sodio se puede combinar con iones de hidróxido formando hidróxido de sodio. Las zonas que sufren más tensiones de las tuberías de la caldera y la turbina de vapor pueden ser atacadas por este compuesto provocando la aparición de grietas por corrosión bajo tensión. Esto era un problema en las calderas más antiguas con los calderines remachados debido a las tensiones y grietas en las zonas remachadas. El final de los tubos soldado sigue siendo atacado por este tipo de impurezas.

Cloro (Cl): cloruros de calcio, magnesio y sodio, y otros metales se encuentran con normalidad en suministros naturales de agua. Todos estos cloruros son muy solubles en agua, por lo tanto, pueden ser transportados con el vapor hacia la turbina de vapor. Los cloruros se encuentran frecuentemente en las deposiciones de la turbina y causarían corrosión austenítica del acero inoxidable y picadura del acero 12 Cr. Los materiales resistentes a la corrosión se protegen creando una capa de óxido en la superficie. Este óxido se conoce por su nombre genérico "cerámico". Todos los cerámicos se picarán si son expuestos a cloruros. Una vez que la pieza metálica se encuentra bajo tensión por tracción, la grieta aparecerá en la parte sometida a tensión. Normalmente aparecerá más de una grieta causando un patrón con forma de tela de araña. Las fuentes más comunes de cloro son las fugas del condensador.

Hierro (Fe): no se encuentra una gran cantidad de hierro en el agua sin tratar, pero una gran concentración puede causar desde la oxidación de las tuberías hasta la exfoliación de los tubos de la caldera. El hierro se encuentra en forma de partícula, de un tipo que no se disuelve en agua. El aspecto perjudicial del hierro es que puede causar erosión por partículas sólidas, que causa una erosión importante de la turbina de vapor, así como de los componentes del paso de vapor.

Aceite: el aceite es un gran aislador de calor, y la adherencia del aceite a la superficie de los tubos expuestos a altas temperaturas puede causar un sobrecalentamiento y daño del tubo.

Oxígeno (O₂): el oxígeno se encuentra en el agua de alimentación y su presión parcial es relativamente alta por lo que requerirá una temperatura cercana a la de disolución para desasociarse del agua. El oxígeno combinado con el agua atacará al hierro causando corrosión. El hidróxido de hierro es altamente insoluble y se precipita en superficies a alta temperatura. Esta precipitación se llama magnetita u oxidado. Lo más cerca que se encuentre el agua de la temperatura de saturación, más cantidad de corrosión aparecerá.

Dióxido de carbono (CO₂): El dióxido de carbono puede reaccionar con el agua para formar ácido carbónico (H₂CO₃). Este ácido puede causar problemas en el conjunto y líneas de retorno. El dióxido de carbono puede originarse desde las fugas de aire del condensador o del bicarbonato (HCO₃) alcalino del agua de alimentación.

pH: el valor del pH del agua es medido para comprobar su alcalinidad o acidez y tiene influencia directa en las propiedades corrosivas. Toda agua contiene iones alcalinos (hidróxidos, OH) e iones de hidrógeno (H). El producto de la concentración es siempre aproximado a 10⁻¹⁴. El valor del pH del agua es el logaritmo del recíproco del valor del ion de H. Si el agua es neutra, la concentración de iones de OH y H son ambas 10⁻⁷. Un pH por debajo de 7 indica un agua ácida, por encima de 7 el agua es alcalina. Un bajo pH en ciertas partes es la segunda causa por corrosión en el acero templado de la caldera. Alrededor de aproximadamente 400 °C, la corrosión del acero templado aparece con la formación de magnetita, un antiadherente estanco que hace de barrera entre el agua de la caldera y el acero. La corrosión se detiene una vez se haya formado la capa de magnetita. Puede aparecer corrosión rápida si la capa protectora es perturbada, por lo que se debe tener controlada la química del agua para mantener esta capa. Unas condiciones ácidas, pueden destruir la capa de magnetita, sin embargo, el agua de la caldera se mantiene en el rango alcalino de pH de 9.0 a 10.5.

Foaming: es la formación de burbujas o espuma en la superficie del líquido. Está causado por la alta concentración de sólidos suspendidos. La espuma ocupará gran parte del espacio de la superficie de tubo disponible del dispositivo de separación, incrementando las velocidades locales y el transporte hacia otras zonas

de la caldera.

Arrastre de gotas de agua [priming]: El arrastre de agua es una descarga espasmódica y violenta de agua y vapor en la zona del vapor. Las gotas de agua son transportadas junto con el vapor al interior del paso del vapor causando daños en la turbina de vapor.

Transporte de impurezas a lo largo del paso del vapor [Carryover]: cuando los sólidos de la caldera de agua son transportados en la mezcla húmeda con el vapor a pesar de que no hay indicación de formación de foaming o arrastre de gotas, es considerado como carryover. Los secadores trabajan con cambios repentinos en la velocidad del vapor, por lo que estas partículas son separadas por fuerza centrífuga.

5.4 Corrosión del paso de vapor

Uno de los componentes más importante en el paso de vapor son los álabes y a su vez son los más susceptibles de sufrir corrosión. La corrosión y posterior fallo puede venir precedida de grandes tensiones, compuestos agresivos transportados por el vapor, todo esto pudiéndose agravar con las altas temperaturas presentes en los diferentes lugares del paso del vapor.

Como se ha visto con anterioridad, en la figura 6.7.1, aparecen las zonas más susceptibles de actividad corrosiva. Una vez las partículas corrosivas han entrado, pueden ser transportadas a través del ciclo, con la posibilidad de depositarse y acumularse durante la operación, resultando en el daño o fallo del componente, que puede condicionar el funcionamiento de la unidad, forzando su actuación durante largos periodos de tiempo.

Los agentes corrosivos concernientes contienen compuestos o elementos que tienen sulfuro, sodio, fósforo o cloro. Son frecuentemente introducidos en el sistema por numerosas zonas de ingreso, por el mal funcionamiento de los equipos de purificación de agua o limpiado químico y los tratamientos de preservación transportados en el ciclo del agua, aunque estas impurezas pueden entrar al ciclo desde otras fuentes.

Para la correcta operación de la turbina, es necesario unos niveles muy altos de pureza en el fluido de trabajo, por lo que es necesario prestar especial atención a aquellos equipos que trabajan además con otro fluido, del que no se requiere un nivel de pureza tan especial, por lo que será necesario una buena separación entre los fluidos. A pesar de que todos los equipos en cierta medida son susceptibles de corrosión, el que más influye en la eficiencia de la unidad y a su vez el más sensible es la turbina, por lo que se requerirá la limpieza para mantener la fiabilidad del sistema.

Los compuestos corrosivos, una vez capturados y transportados por la humedad, serán depositados en las superficies de los componentes del paso de vapor de la turbina, donde fluirán junto a las capas de humedad formadas y serán transportadas hacia los recovecos de la turbina, donde se acumularán. Una vez aparezca el cambio en las condiciones del vapor, aumentará su concentración y se hará químicamente agresivo bajo estas nuevas condiciones del vapor.

La presencia de recovecos es uno de los factores principales para la aparición de varias formas de corrosión. Los escondrijos aparecen en partes ensambladas del paso del vapor y aparecen de forma natural en el ensamblaje, ajuste por contracción y en ciertas circunstancias, la acumulación de errores en la fabricación de ciertas partes.

5.4.1 Localización de recovecos en los elementos constructivos de la turbina.

Las zonas más importantes, donde tienen lugar la presencia de recovecos son los siguientes:

Agujeros de las espigas de la cubierta

Las cubiertas son vinculadas a la sección exterior del cuerpo del álabe mediante remachado a tiras de acero, usando espigas producidas de forma integral en el álabe. Se produce entonces un gran número de cavidades en las cuales se pueden lavar los iones corrosivos. La figura 5.14 muestra la sección transversal de una espiga de dos tipos diferentes. Normalmente se deja alrededor de la espiga una circunferencia de radio "cl". Ya que estas espigas se forman para producir un completo (o casi completo) llenado del agujero de la cubierta, las cavidades que aparecen en estas zonas pueden sufrir la ingesta de fluido de trabajo del ciclo, por lo tanto, este es un lugar en el que comúnmente aparece corrosión, y desafortunadamente es difícil de detectar en los primeros escalonamientos donde aparecen picaduras y se pueden iniciar las grietas.

En el proceso de acoplamiento también se pueden producir tensiones residuales en las fijaciones remachadas, que pueden desarrollar corrosión.

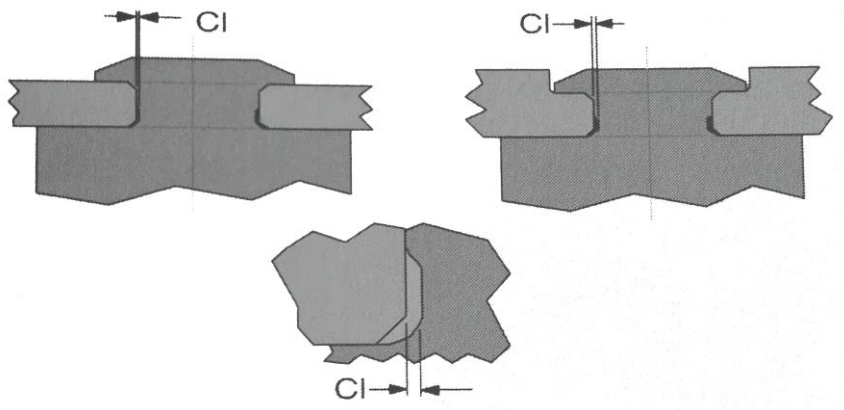


Figura 5.14 Recovecos en los componentes del paso de vapor

Agujeros de los alambres antivibración

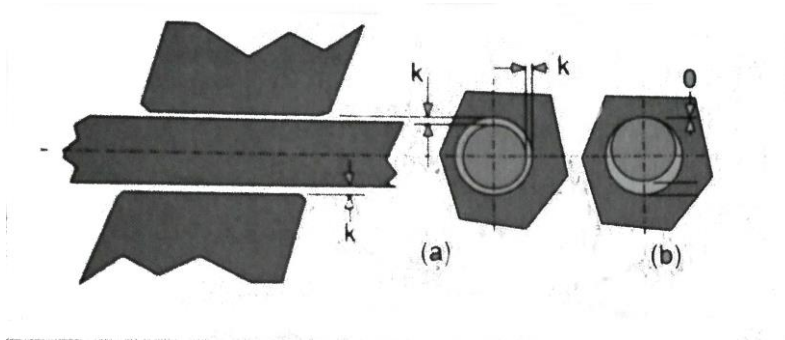


Figura 5.15 Pérdidas del alambre antivibración

En alambre para ataduras continuos, el alambre puede soltarse, por lo que son a menudo unidos a los álabes mediante soldadura fuerte. En algunos diseños se encuentra fallo en el alineamiento del alambre con el agujero, lo que puede llevar a que aparezcan tensiones residuales, tracción y compresión en el álabes y el alambre. En los alambres que no presentan la tensión adecuada, como el que se esquematiza en la figura 5.15, la poca distancia entre el álabes y el agujero recogerá las impurezas, que posteriormente actuarán como agentes corrosivos. Como se muestra en a), el alambre se sitúa de forma concéntrica en el agujero, dejando una distancia “ k ” entre el agujero y el alambre. En plena operación, la fuerza centrífuga empujará el alambre hasta permanecer en contacto con el límite del agujero, dejando en la parte opuesta una distancia de “ $2k$ ” entre el alambre y el agujero, actuando como recoveco donde se concentran las sustancias corrosivas.

Cuando el alambre ha sido soldado en el montaje es normal que la soldadura pierda tensión cuando la unión presenta tiras gruesas de soldaduras, como en la figura 5.16 en esta situación se promueve la formación de pequeñas cavidades que pueden actuar como recovecos.

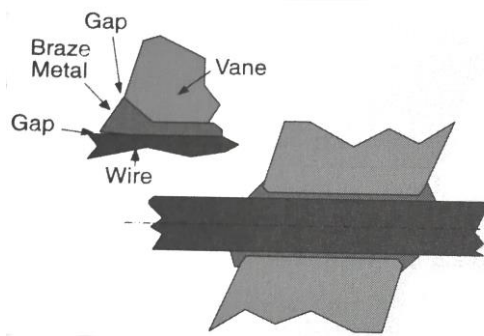


Figura 5.16 Alambre para ataduras soldado

Ajuste por contracción

Posiblemente la acción corrosiva más crítica, que pone en peligro el paso del vapor, aparece en el ajuste por contracción entre el eje central y los discos. En estas zonas se utiliza el ajuste por contracción para establecer el disco en su posición axial correcta y transmitir la fuerza desde el álabe hasta el centro del eje. En este ajuste por contracción, el eje central se encuentra bajo compresión, sin embargo, el disco montado tiene tensiones tangenciales en la superficie del ajuste. Durante la operación, estas tensiones son aliviadas de alguna manera, pero una vez la velocidad de la turbina disminuye hasta la parada, los niveles de tensiones aumentan. Estos discos se van secando a medida que la turbina se va parando, por lo que, bajo estas condiciones los iones corrosivos llegan a concentrarse más y ser más agresivos.

A pesar de la dificultad que presentan los iones corrosivos para entrar en estas zonas, dicha ingesta se produce, debido las muescas de protección contra el embalamiento del eje, en varias posiciones axiales de los discos. Las muescas causan discontinuidad en el ajuste y en las tensiones, por los que son regiones donde se iniciarán las grietas.

Superficie de contacto de la raíz del álabe con el rotor

La figura 6.2.3 muestra una parte de los álabes del escalonamiento del rotor, que han sufrido corrosión. La raíz de los álabes es de entrada tangencial del tipo montaje en horquilla simple remachada. En situaciones como esta, es inevitable que las sustancias corrosivas encuentren el camino hacia el área de transferencia de carga del cierre, en este caso, las superficies que con alta concentración de tensiones inician su acción corrosiva cuando las condiciones del medio favorecen dicha actividad, esta es la causa de la mayoría de los fallos. En los peores casos, la llanta se romperá, provocando reparaciones costosas. En las situaciones más graves, será necesario la eliminación de los álabes del escalonamiento y probablemente sustitución del rotor.

El daño más frecuente en el paso de vapor y en los álabes es la corrosión por picadura, la rotura por corrosión bajo tensión y la fatiga por corrosión.

5.4.2 Tipos de corrosión

La corrosión se define como un daño o deterioro de un metal que aparece cuando este reacciona al medio. La corrosión puede ser seca o húmeda, dependiendo del medio y del contenido de humedad. La relación de reacción corrosiva se encuentra también influenciada de forma importante por la temperatura del medio, ya que se pierde más material cuanto más alta es la temperatura.

Los mecanismos de corrosión pueden envolver tanto reacciones electromecánicas, como ser resultado directo de la reacción química entre el corrosivo y la superficie metálica. En las turbinas de vapor, la corrosión es generalmente húmeda y resultado de la reacción directa entre el compuesto corrosivo y la superficie metálica con la que tiene contacto.

La corrosión se iniciará siempre en una superficie expuesta al medio corrosivo. Puede aparecer sobre toda la superficie o localizada en una zona. La corrosión localizada causará picaduras pequeñas que se desarrollarán hacia otras superficies no afectadas. En el caso de la corrosión localizada, la superficie se encuentra normalmente en contacto con el corrosivo de forma concentrada.

Es frecuente mientras la unidad de encuentra parada durante largos periodos de tiempo sin la ventaja de la protección por el recubrimiento del gas, sufrirá corrosión de las superficies más susceptibles que tienen la concentración más diluida a la hora de la parada. Como se ha dicho, no es necesaria una presencia elevada de agentes corrosivos. La acción del vapor condensado será suficiente para causar el inicio del proceso de corrosión.

La figura 5.17 muestra una parte de la junta horizontal de la unidad que ha permanecido muchos años sin ser usada. Este tipo de corrosión no aparece durante la operación y no será considerada a partir de ahora. Sin embargo, cuando la unidad es parada y es improbable que vuelva a operar en un periodo de tiempo, es prudente considerar las consecuencias de este periodo y las ventajas del nitrógeno o el sistema de sellado mediante otro gas inerte.

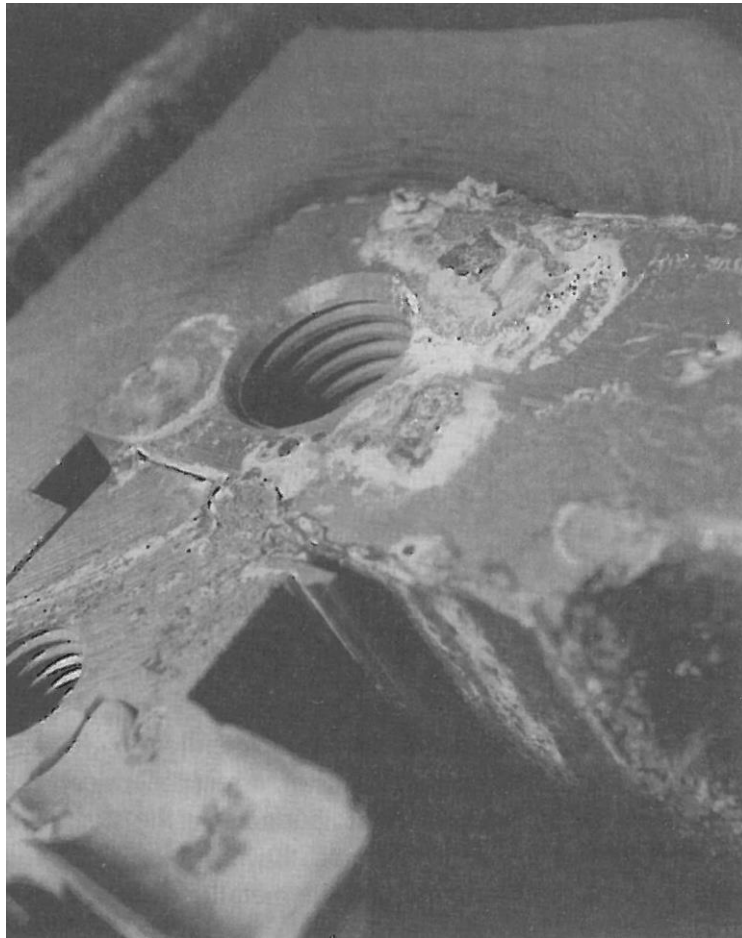


Figura 5.17 Junta horizontal sin uso durante un gran número de años

Para la corrosión húmeda, además de ser dependiente de la temperatura del medio que rodea a la superficie, la relación de reacción es muy dependiente de la concentración de los corrosivos. Esta es una consideración muy importante en las turbinas de vapor, ya que en algunas situaciones (como cuando se para la unidad por poco tiempo, pero se enfría) se forman charcos de condensado en algunas partes del paso del vapor. Una vez el agua se ha evaporado, estos charcos concentrarán los iones corrosivos en el agua y en recovecos del paso del vapor. Una vez esta agua se ha eliminado o evaporado, la concentración de los corrosivos se hace más grande, exponiendo la superficie metálica a una concentración de corrosivos superior y, por lo tanto, a una mayor relación de material dañado.

La figura 5.18 muestra los álabes móviles de una turbina tras una parada, se ha permitido levantar y enfriar. Posiblemente la temperatura local era mayor que la temperatura normal de operación, una vez el vapor continuó fugando por las válvulas. Se puede observar corrosión por picadura, y por la forma de su patrón es posible que los corrosivos se hayan concentrado en el borde de los charcos causando esa característica picadura circular.

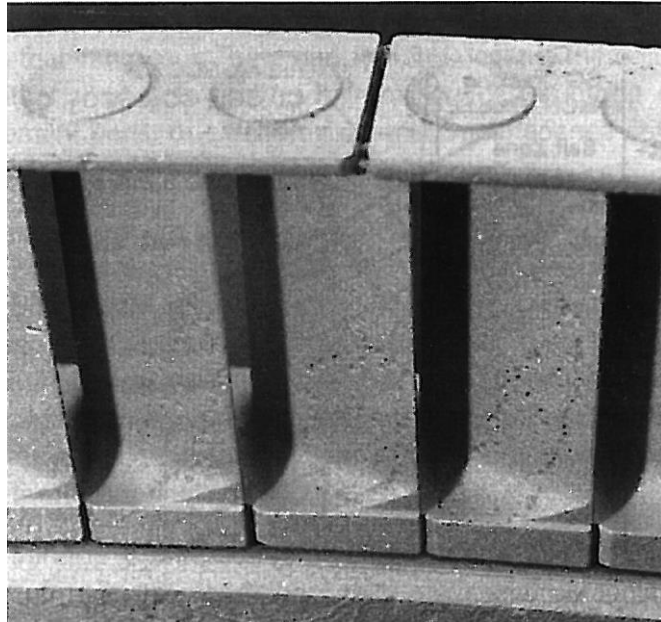


Figura 5.18 Álabes del rotor que han sufrido picadura en la superficie

Otra operación que puede provocar el ataque corrosivo es colocar la unidad en un virador durante largos periodos, cuando los componentes están calientes y cualquier elemento corrosivo se hará más activo conforme el agua se vaya evaporando.

5.4.3 Efecto de las impurezas en el fallo de los álabes.

La figura 6.8.4 muestra el diagrama de Mollier para el vapor, indicando la línea de expansión para la sección de baja presión de una unidad típica e identificando las regiones en las que aparecen concentraciones de impurezas. Este diagrama indica la razón de porqué una gran cantidad de fallos aparecen en esta región donde coexisten la formación, deposición y concentración de contaminantes.

Posiblemente el escalonamiento más importante en las turbinas de utilidad es el L-1, donde la repetición de los fallos continuos fuerza la unidad en servicio. La relación total de fallo en los álabes de una turbina de una planta de combustible fósil donde se puede observar el predominio del fallo en el escalonamiento L-1. Aunque no todos los fallos son debidos a la acción de la corrosión, una gran parte de ellos pueden ser atribuidos a varios tipos de acción corrosiva en el paso del álabe y la raíz.

Dentro de la turbina de vapor, existen un gran número de mecanismos de corrosión que pueden aparecer. Este daño y degradación de la calidad de la unidad la fuerzan, se requieren, por tanto, sustituciones caras de las partes, o paradas de mantenimiento. Los mecanismos de corrosión más comunes son los siguientes:

Corrosión de las grietas

La corrosión de las grietas se inicia en pequeñas grietas o recovecos hacia los que los iones agresivos migran y se coleccionan. En el paso de la turbina de vapor (en una disposición compleja de componentes ensamblados) hay muchos tipos de recovecos. El daño que aparece y la formación de picadura puede entonces actuar como centro de concentración de tensiones que pueden causar posteriores daños.

Dentro del paso del vapor, muchas de los recovecos se encuentran en zonas cuyas condiciones de vapor varían de húmedo a seco. Están también sujetos a cambios en la temperatura como consecuencia del cambio de carga, o incluso el cambio de las condiciones de vapor entregado por la caldera sobrecalentado o recalentado.

Las condiciones dentro de una grieta o un recoveco pueden llegar a ser muy agresivos químicamente, una vez la concentración de los iones corrosivos aumenta. Esta concentración puede aparecer localmente, ya que las condiciones del vapor dentro de cualquier escalonamiento no son constantes, variando con la posición radial, los posibles efectos del vapor secundario y las fugas y un gran número de otras circunstancias que aparecen dentro con un conjunto complejo de parámetros que cambian. Bajo estas condiciones, puede aparecer la reacción de corrosión cuando las partes del paso del vapor permanecen en condiciones estables para la corrosión.

Posiblemente una de las condiciones más dañinas dentro de los recovecos aparece cuando la unidad es parada. En este momento, un incremento de la temperatura a través de la sección de baja presión de la unidad puede volver iones inertes en una solución agresiva.

Corrosión por picadura

Los componentes que se encuentran alrededor de la región húmeda son particularmente susceptibles de la corrosión por picadura. Este fenómeno aparece cuando la superficie de varios componentes, normalmente el cuerpo de los álabes estacionarios y móviles. Sin embargo, se puede notar a menudo en el tambor y la cara de los discos de algunas unidades y en la entalladura en los puntos del sello del eje (figura 6.3.4) la picadura indica normalmente la presencia de cloro.

La corrosión por picadura es un fenómeno superficial, y se tiene como resultado de la reacción corrosiva de un corrosivo agresivo en la superficie del metal. Las picaduras formadas con este tipo de corrosión son básicamente semicirculares, con la profundidad de la picadura del orden de la mitad del ancho de la picadura. El crecimiento de la picadura es normalmente lento con un cierto grado de auto propagación, con iones agresivos retenidos en la picadura y continuando la corrosión, usando estos mismos iones libres. La picadura es similar a la corrosión de las grietas, en las que puede acumularse y concentrarse corrosivos suficientes para causar daños.

Como en la corrosión de grietas, la picadura puede volverse activa cuando se para la unidad y las condiciones del medio que rodea la superficie cambia.

Encontrar la picadura del tipo mostrado en la figura 5.19 es de gran dificultad, ya que en esta situación la picadura aparece en la superficie del tambor. Está claro que el material del tambo es más susceptible que el de los álabes a sufrir este daño, pero lo que no se saben son las condiciones de las ranuras de los álabes del tambor. Habrá mantenido la ingesta de iones corrosivos a través del hueco axial entre el bloque de la raíz de los álabes y la superficie de transferencia de carga de la ranura de álabes del tambor.

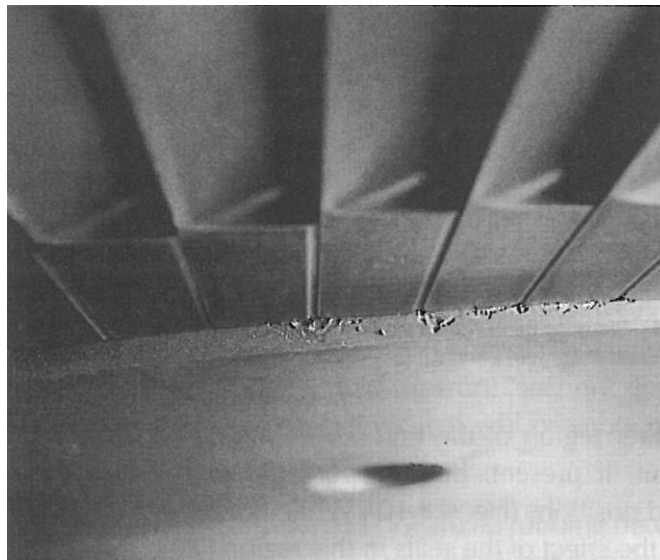


Figura 5.19 Corrosión or picadura del tambor del eje

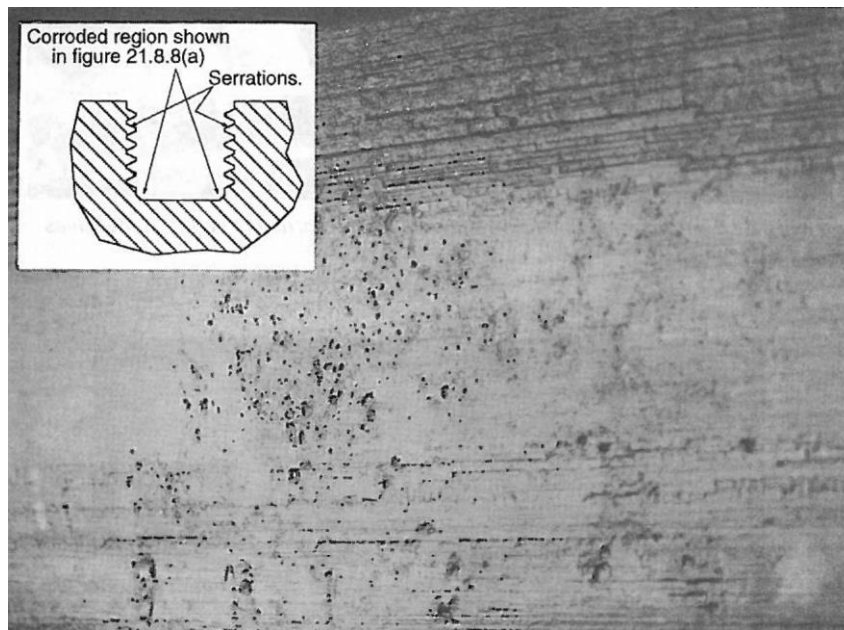


Figura 5.20 Corrosión en el soporte de los álabes

La figura 5.20 (a) muestra la base de la ranura de la raíz en un rotor tipo tambor después de eliminar el álabe. La erosión en la base de la ranura indica la ingesta de iones corrosivos y la picadura es bastante clara. Este tipo de corrosión no se considera muy peligrosa en esta zona. La picadura es también evidente en la entalladura, mostrado en la figura 5.20 (b). En estas regiones de altas tensiones, pueden aparecer otras formas de corrosión.

Otra región de la unidad donde la picadura no es común, pero si se encuentra presente, con el potencial para causar daño, es en las posiciones finales del eje. A pesar de que no es normal que aparezcan, reduce el efecto del sellado en esta región cuando aparece, y hace al eje más susceptible de daño por agrietamiento, particularmente si hay cambios en la sección transversal en esta región.

La variación de las condiciones del vapor a través de las juntas de estanqueidad es más cercana de una operación de laminado. El cambio en las condiciones térmicas demuestra como el vapor se expande a su paso por los sellos del final del eje, y como se puede mover rápidamente de condiciones secas a condiciones húmedas, convirtiéndose en sobrecalentado. Por lo tanto, las sustancias corrosivas en el vapor fugado, depositado en el eje, corroerá, causando probablemente una importante pérdida de material. Aunque el sellado de la sección de baja presión es compacto, se producirá ingesta de aire que promoverán la corrosión debida al oxígeno.

Otro factor a tener en cuenta es el roce entre los elementos del cierre de laberinto, que causa calentamiento local. El enfriamiento del vapor provocará endurecimiento y, en consecuencia, una mayor susceptibilidad al ataque corrosivo adyacente a las superficies endurecidas.

Por último, si el generador no se encuentra anclado correctamente puede haber una descarga estática a través de la región de sellado, causando otro tipo de corrosión por chispas.

Agrietamiento por corrosión bajo tensión

Este fenómeno por el que las grietas se inician en una superficie metálica, propagándose por el material, rompiendo la estructura cristalina del metal. El agrietamiento por corrosión bajo tensión es un estado común encontrado en el paso de la turbina de vapor, que afecta más a los componentes móviles de la turbina de vapor. Este mecanismo puede causar paradas costosas. También puede causar fallos catastróficos.

Para que aparezca, los componentes deben de estar sujetos a una combinación de tensión de tracción y de un medio corrosivo. Los materiales de los componentes sujetos a estos iones corrosivos serán también susceptibles de este tipo de corrosión. Las grietas inducidas por corrosión son de naturaleza quebradiza, normalmente ramificadas y serán trans-granulares o intergranulares dependiendo de la composición del material, las propiedades mecánicas, el nivel local de tensión y el medio.

El agrietamiento por corrosión bajo tensión puede llevar a la rotura frágil a unos niveles de tensión menores que

los necesarios para causar el fallo en un medio no corrosivo. La relación a la que la inducción de corrosión o la iniciación de la grieta asistida y la propagación, depende de la tensión y la temperatura presente para ayudar a la reacción química, influenciado por el medio. Deberá permanecer expuesto durante largos periodos a un medio corrosivo para iniciar la grieta, pero una vez que se forma, el fallo se puede propagar rápidamente. Una gran cantidad de componentes en el paso del vapor en el que existen tensión de tracción residual ya sea por el diseño o de forma accidental, como consecuencia de la fabricación. En estas partes este tipo de fallos puede aparecer de inmediato.

Cuando el metal fundido se enfría, la solidificación empieza aleatoriamente en un gran número de núcleos, que crecen en una matriz regular, para formar granos de la aleación. Estos granos tienen una estructura atómica idéntica. Ya que no están alineados en el mismo eje, existen huecos entre ellos (por lo que este hueco tiene una composición diferente) se conocen como límite de grano.

Hay dos formas de SCC: trans-granular e intergranular. Los resultados dependen de las variables que se ven envueltas. Sin embargo, cada tipo de grieta crecerá en una relación determinada por su medio, el nivel de tensión al que está sometido, y la temperatura local. Se describe a continuación los dos tipos de grietas.

- Corrosión intergranular: bajo condiciones normales, la posibilidad de inconsistencias y deficiencias en el límite de grano son anticipadas y permitidas por las propiedades mecánicas del material. De forma parecida, la dimensión de los componentes individuales en términos del nivel de tensión que experimentarán durante la operación es seleccionado, por lo que operarán de forma segura cuando se producen desde estos materiales. Sin embargo, cuando el material cada uno de estos componentes se produce, está sujeto a un medio corrosivo, el límite de grano puede llegar a ser reactivo y corroerá preferiblemente la del cristal puro de la aleación, esto es, el límite de grano, puede desintegrarse a una relación más rápida que los cristales de la aleación. Esto permite la iniciación de la grieta y que crezca entre ellos. Bajo estas circunstancias los cristales puros del metal permanecerán sin ser afectados, pero finalmente se desprenderán de la estructura sólida del material.

La corrosión que aparece y ataca a los constituyentes del límite de grano se llama corrosión intergranular. Este tipo de corrosión acaba en la desintegración de la aleación en el límite de grano. Dejando posiblemente pequeños cristales de la aleación base, separado del sólido. Las grietas intergranulares es un mecanismo común que conduce las grietas por la turbina de vapor. Las capas protectoras en la base de las grietas son continuamente rotas por las tensiones locales, con granos no afectados por los iones corrosivos presentes en el borde de la grieta.

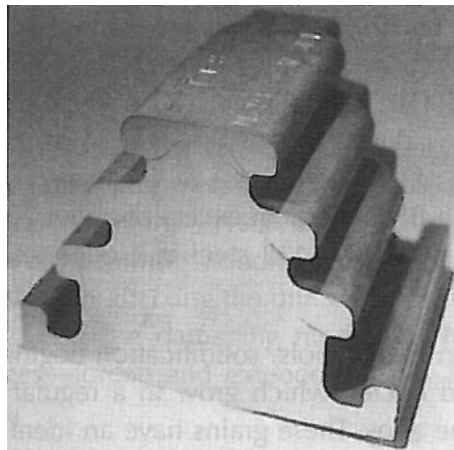


Figura 5.21 Grietas causadas por la corrosión bajo tensión

Las grietas pueden ramificarse o ir directamente a través del material. La figura 5.21 muestra la sección de corte del tambor de una turbina, que llevaba álabes con entrada tangencial. Esta parte del tambor ha sufrido un agrietamiento intergranular iniciado en las esquinas redondeadas.

La corrosión intergranular aparece en regiones del material que están sujetas a algún tipo de tratamiento térmico. Otro proceso de tratamiento térmico que alivie la tensión del ciclo puede reducir la tendencia del material a este tipo de daño.

- Corrosión trans-granular: este tipo de corrosión en cierto modo es menos común que la intergranular, pero aparece bajo ciertas circunstancias en materiales del paso de vapor. Acero austenítico (usado en ciertos componentes del paso del vapor) son más susceptibles a esta forma de daño).

A diferencia de las grietas intergranulares, las grietas trans-granulares se inician en la superficie de los cristales de la aleación. Estas grietas se propagan en una serie de pasos discretos, como el clivaje de los granos individuales, la grieta pasa a través del plano cristalino. El crecimiento de la fractura se ve interrumpido cada vez que se alcanza el límite de grano, y en dicho límite, la grieta deberá ser iniciada otra vez. Estas grietas de clivaje del cristal representan la fractura frágil a través de los cristales individuales de la aleación.

La figura 5.22 es una grieta trans-granular en el radio de la raíz de un álabe de rotor. La figura 5.23 muestra la entrada axial del rotor con las grietas claramente visibles. Una supervisión de las deposiciones en la superficie en esta raíz indica la presencia de un alto contenido de sulfuro y el agente corrosivo era el ácido sulfhídrico.



Figura 5.22 Grieta transgranular en la raíz del álabe



Figura 5.23 Apariencia de la grieta en la raíz del álabe

Haciendo los granos del metal más pequeños, se reduce la probabilidad de propagación de la grieta transgranular. Desafortunadamente, el mecanismo exacto no se conoce completamente.

Aquellos escalonamientos de la turbina con más probabilidad de padecer agrietamiento por corrosión bajo tensión son aquellos en la sección de baja presión donde se comienza la condensación del vapor. Las regiones del paso del vapor más susceptibles a este problema son aquellas sujetas a alta tensión de tracción, que típicamente se encuentra en los agujeros de los alambres, cubiertas y remaches, y la raíz o cierre de las uniones del álabe y el cierre del rotor. En estas partes la tensión por tracción suele ser alta y los problemas asociados a los efectos de las cargas variables. Estas zonas, por lo tanto, se consideran de riesgo, asociadas normalmente al fallo intergranular.

La acción corrosiva que aparece en las paradas será principalmente del tipo picadura. La picadura producirá una concentración de tensiones y agrietamiento cuando la unidad vuelva a servicio. Sin embargo, hay partes del paso de vapor donde el esfuerzo de tracción se encuentra presente incluso en las paradas. Estas partes de la unidad incluye el ajuste por contracción, que existirá donde los componentes, incluyendo los discos, se encuentren ajustados a un eje central. También se incluye en este tipo de componentes aquellos donde haya tensión, como en los alambres para ataduras y el cuerpo del álabe deformado por una mala alineación de los puntos de contacto de agujeros y alambres e introduciendo el ensamblaje forzado. Las cubiertas que están unidas por remaches son, a menudo “trabajadas en frío” para formar una cabeza aceptable que pueda contener también esfuerzos de tracción en patrones relativamente complejos.

En el ajuste por contracción entre la superficie del eje del rotor y el diámetro del tambor, hay una región del rotor donde el agrietamiento por corrosión bajo tensión puede ser grave. Un lugar común para el inicio de la grieta es en las ranuras que es necesaria para mantener al tambor en una posición central en sobrevelocidades de emergencia cuando el ajuste por contracción de haya perdido. La ranura representa una discontinuidad importante y es donde a menudo se inician las grietas por tensión.

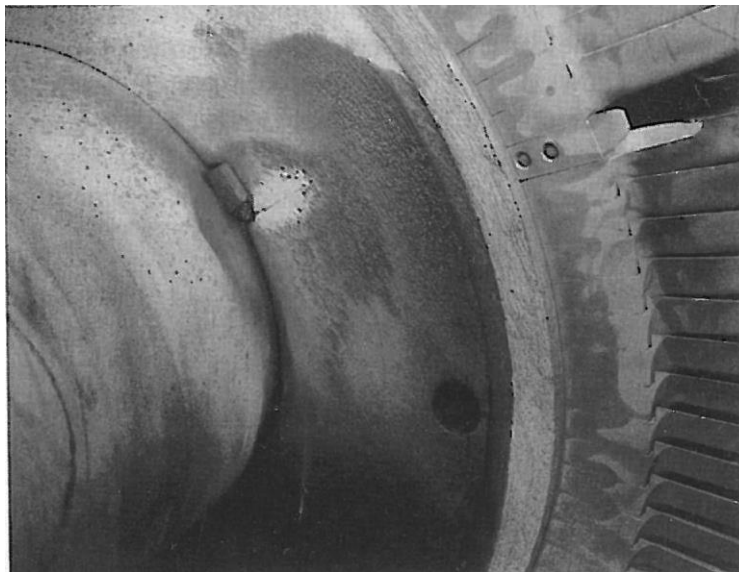


Figura 5.24 Evidencias de Grietas producidas por la corrosión bajo tensión

La figura 5.24 muestra una grieta iniciada en una ranura, que cruza en dirección radial.

Algunos diseños específicos son usados hoy en día para minimizar los efectos de la concentración de tensiones. Estos diseños ayudan a eliminar discontinuidades en el disco o tambor. También hay diseños específicos que los localizan en áreas de bajas tensiones. Estos cambios representan una mejora del diseño.

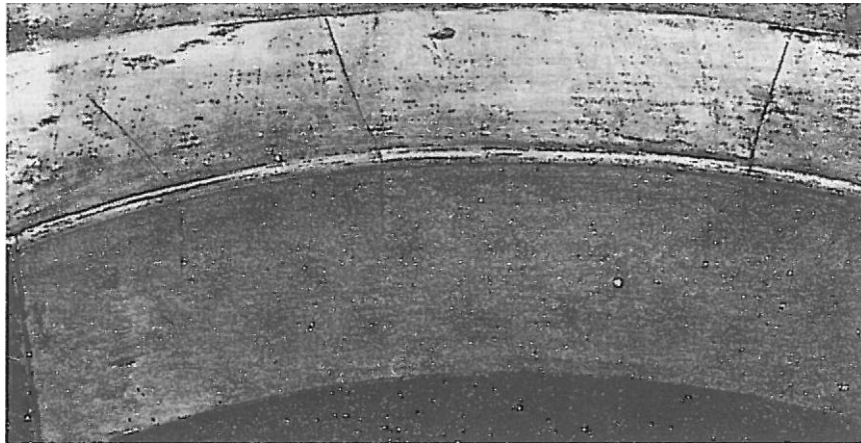


Figura 5.25 Porción de un disco que ha fallado. Se observan las grietas radiales

Sin embargo, mientras las ranuras son conocidas por las grietas, lo son también por iniciarlas en otras posiciones tangenciales lejos de la ranura. Se puede ver un gran número de este tipo de grietas en posiciones tangenciales en la figura 5.25, que es una parte del disco que ha fallado.

En general si se han seguidos las consideraciones de diseño del paso de vapor, la tensión resultante deberá estar por debajo de los valores límites requeridos para iniciar el fallo. Por lo tanto, cuando aparece un fallo, son resultados de condiciones anormales que son difícil de controlar.

Fatiga por corrosión

Un material puede fallar debido al fenómeno de la fatiga de alto ciclo (HCF), si está sujeta a cargas cíclicas de una magnitud suficiente. También aparecerá un fallo de una relación importante acelerada si:

- Un componente sujeta a una carga cíclica de la suficiente magnitud que cause fallo en el medio del vapor por fatiga a alto ciclo.
- Se encuentra simultáneamente sujeta a un medio corrosivo.

Este fenómeno (fallo bajo la influencia de un medio corrosivo) es llamado fatiga por corrosión. La fatiga por corrosión se puede iniciar en una superficie sin picadura, esto es, no hay necesidad de una discontinuidad mecánica como picadura o grietas para que se inicie este tipo de corrosión.

La fatiga por corrosión es, en realidad, un caso especial del agrietamiento por corrosión bajo tensión, en el que las fuerzas cíclicas conducen la grieta. En este tipo de fallo, una superficie extensa de fallo es cubierta por los productos de la corrosión y el fallo final de la superficie aparece por el mecanismo de ruptura. Este tipo de fallo se diferencia del agrietamiento por corrosión bajo tensión en que la tensión aplicada es cíclica y el fallo es un mecanismo de tipo fatiga, presentando las marcas concoideas asociadas al HCF. Este tipo de fallos tiene tendencia a iniciarse en esos puntos donde los productos corrosivos se concentran, y un alto nivel de concentración de tensiones cause efectos elevados locales de tensión. Este tipo de grietas pueden ser transgranulares o intergranulares. Sin embargo, estos fallos de fatiga por corrosión suelen ser de naturaleza transgranular.

Las regiones del álabe de más tensión, cercanas a la sección de la raíz y en la parte que soporta la mayor parte de la carga de la raíz aparecen las partes más susceptibles del paso de vapor. Esto es debido a que en tensiones directas y alternas se encuentran en altos niveles en estas regiones. La sección de baja presión de la unidad es relativamente fácil para los corrosivos de retenerse y concentrarse. Sin embargo, hay muchos fallos importantes que se inician en los agujeros del alambre para ataduras y las cubiertas, donde condiciones similares pueden existir.

Las condiciones totales que rodean a las situaciones de fatiga por corrosión son complicadas ya que los niveles de tensión pueden variar desde aquellos niveles bajos de tensión directa hasta los niveles altos de tensión alterna;

o al revés, altos niveles de tensión directa con una amplitud baja alterna. Puede producirse cualquier combinación de magnitud para estos tipos de carga.

Otra variable que afecta a la relación con la que aparece el daño incluye la concentración de corrosivos aplicadas al componente que induce el fallo, la temperatura local del medio, y la posibilidad de numerosos ciclos en los que los componentes experimenten un medio húmedo y seco. Desafortunadamente es imposible predecir la aparición de fatiga por corrosión, y se sabe que este tipo de fallos fuerzan el funcionamiento de la unidad por grandes periodos.

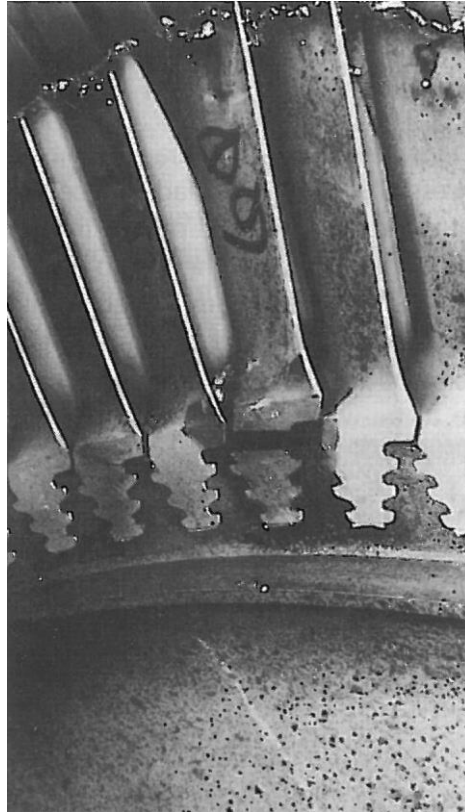


Figura 5.26 Álabes con elementos fracturados en la zona de sustentación

Un fallo típico en el escalonamiento de baja presión L-1 en la raíz de los álabes se muestra en la figura 5.26. La apariencia general de la cara del tambor con corrosión superficial es vista, con un álabe agrietado en la parte del rincón redondeado

5.4.4 Factores que afectan a la relación de crecimiento de la grieta.

Una vez la grieta se ha iniciado y crece hasta un tamaño suficiente con el que continuar su propagación, hay algunas condiciones que promueven este crecimiento, y su presencia en cierto grado afectará a la relación con la que estas grietas se propagan. Las más importantes son:

Niveles de estrés

El agrietamiento por corrosión bajo tensión requiere esfuerzo de tracción para iniciar la propagación de las grietas. Estas grietas crecen principalmente en direcciones perpendiculares a la dirección de la tensión principal. Cada ramificación crece en prácticamente la misma dirección perpendicular. El mecanismo actual por el que la grieta se propaga es el crecimiento continuo desde la base de la grieta rompiendo el óxido u otras capas que existan. Cuanto más alto sea el nivel de estrés, con más facilidad se romperá la capa y, por tanto, más rápido crecerá la grieta.

Para que se inicien las grietas, se requiere un umbral de tensión. El valor de este estrés es sensible al material, su

composición, sus propiedades mecánicas (límite elástico, dureza y resistencia al impacto) y cualquier tratamiento térmico al que ha sido sometido. Los diferentes corrosivos también lo influyen.

Concentración de corrosivos

Cuanto más concentrado se encuentre el corrosivo, más rápido se propagará la grieta. Esto es obvio y actuando en cualquier condiciones del medio para concentrar o diluir su concentración, influirán en la relación de crecimiento de la grieta.

Temperatura del medio

La temperatura de la pieza que sufre el ataque corrosivo se encuentra influenciada directamente la temperatura del medio que la rodea. La temperatura influenciará el crecimiento de la grieta concentrando corrosivos (haciéndolos más agresivos) y, como consideración secundaria, modificando las propiedades mecánicas del material en una pequeña cantidad. Por esta razón, el cambio de temperatura en el paso del vapor cambiará la relación de crecimiento de la grieta.

La tensión de tracción y las altas temperaturas se encuentran siempre presentes en la turbina de vapor durante la operación, y a menudo se encuentran presentes en algún grado durante la parada, cuando la unidad permanece caliente. Por lo tanto, la potencial acción corrosiva se encuentra siempre presente y su prevención (o minimización) se alcanza por el control de la calidad del agua, ya que la mayoría de las sustancias corrosivas son introducidas en el paso del vapor a través del fluido de trabajo.

5.5 Prevención y mantenimiento

La manera más efectiva de eliminar los compuestos acumulados en el paso de vapor es abriendo la unidad, quitando el rotor y el diafragma o los álabes estacionarios y limpiar mecánicamente los elementos del paso de vapor con arenilla u otras sustancias capaces de eliminar todas las deposiciones. Estos tipos de operaciones de limpieza deben ser una parte integral de cualquier parada larga, tanto si el rotor permanece in situ o es llevado a reparar. Los equipos portátiles de lavado a presión serán transportados al lugar donde se realice la limpieza, para reducir considerablemente el coste. Una vez la unidad está dispuesta a abrirse en una parada normal de mantenimiento en un ciclo de cuatro años o más, cabe destacar la importancia de la química y el control de la pureza del agua entre estas paradas.

Las deposiciones en el paso del vapor empeoran el funcionamiento total del mismo. El limpiado por presión ayudará a eliminar cierto tipo de deposiciones y devolverle la eficiencia. Desafortunadamente, ningún proceso de limpieza eliminará gran cantidad de compuestos agresivos que hayan sido transportados hasta los recovecos donde permanecerán en diferentes lugares a lo largo del paso del vapor.

Las deposiciones en el cuerpo del álabe, así como en las paredes laterales provocan la pérdida de la eficiencia del escalonamiento. Esta pérdida de eficiencia aparece como consecuencia de la separación del flujo inducida y la turbulencia del vapor. Estas deposiciones pueden contener también iones corrosivos que bajo ciertas condiciones pueden causar corrosión. Por lo tanto, cuando la unidad es abierta para su inspección y el paso de vapor está disponible, es un procedimiento normal limpiar estos componentes. Esto se hace normalmente con procesos de limpieza por presión, aunque el limpiado a mano es más efectivo, es una tarea más intensa y más cara.

Se pretende, por tanto, restablecer unas condiciones lo más cercanas posibles a las originales considerando una solución de compromiso entre su funcionamiento, tiempo de operación estimado y coste. El restablecimiento de las condiciones iniciales de los componentes del paso del vapor no es posible, ya que supondría un sobre coste de la operación.

Sería imprudente, la vuelta a servicio de una unidad en la que se han identificado diferentes tipos de deposiciones corrosivos. Esto podría causar un sobre coste que, si se hubiese reemplazado al principio, así como un mal funcionamiento del sistema.

Por otro lado, se necesita controlar el agua de alimentación de la caldera, para evitar la deposición de las

impurezas en el paso de vapor.

5.5.1 Métodos de limpieza del paso de vapor

La eliminación de deposiciones es un proceso normal empleado cuando la unidad está fuera de servicio. Se realiza este proceso debido a dos principales requerimientos:

- Eliminación de los compuestos que deterioran la eficiencia.
- Revisión no destructiva de los componentes. Para tratar de realizarle pruebas a los componentes cubiertos con deposiciones sin resultados importantes.

Se evaluarán un gran número de consideraciones para seleccionar el método de limpieza más apropiado. En alguna ocasión, cuando la unidad haya sido parada después de un corto periodo de operación (por ejemplo, una inspección de garantía), en el proceso de limpiado mientras se eliminan las deposiciones, se empeorará la calidad de la superficie, lo que requerirá el uso de revisión no destructiva. Un método de limpieza demasiado agresivo puede causar el deterioro de la superficie llegando incluso a producirse microrroturas escondidas en deformaciones microscópicas del material de la superficie.

Mientras estas son consideraciones menores, sobre todo para una unidad madura, el proceso de limpieza seleccionado debe considerarlos. Los procesos de limpieza disponible son:

Limpieza a presión del paso del vapor

La limpieza a presión de los componentes del paso del vapor es un procedimiento normal de mantenimiento y una actividad normal en cada parada. Si un operario intenta realizar una evaluación de la eficiencia en una parada, se deben evaluar en primer lugar, los componentes con mayor impacto en la eficiencia de la expansión antes de eliminar cualquier sedimento. La acción de eliminar las deposiciones puede ser sencilla, puede existir la posibilidad de que el tipo de limpieza cause un nivel deterioro mayor y si no es controlado y realizado con cuidado. Por lo tanto, para limpiar efectivamente los componentes, ciertos parámetros del proceso de limpiado deben ser controlados:

Material

El material usado debe ser de una calidad que elimine las deposiciones sin eliminar el material de la superficie de los componentes. Los materiales más utilizados para el lavado a presión son:

- Arenilla, gravilla (carburo de silicio): esto debe ser especificado con su tamaño, forma y edad. El grado en el que esta grava puede ser reutilizada o reciclada debe ser también establecidos. La grava puede ser usada con efectividad en chorros de agua. Esto limpia la superficie eliminando las deposiciones y no deja la capa de polvo típica restante del uso de la gravilla a presión. No es posible recuperar mucha de la gravilla para reutilizarla.
- Óxido de aluminio: Este material elimina las deposiciones y deja la superficie limpia. Utilizando este método existe la pequeña posibilidad de que las partículas oscurezcan pequeñas grietas escondiendo cualquier fisura.
- “cáscara de nuez”: es un material efectivo, y deja la superficie en condiciones excelentes en términos de acabado y la habilidad de prueba no destructiva. Este método es más caro en términos de material de limpieza, y tiempo requerido para limpiar efectivamente la superficie.
- Perla de vidrio (“glass bead”): ha sido demostrado como un medio que trabaja bien. El tiempo de exposición normal para este tipo de lavado es mayor que con el uso de gravilla, pero su impacto con la superficie metal es menos agresivo siendo más difícil causar daños. Es mejor usarlo después del lavado con gravilla y revisiones no destructivas.
- Óxido de zirconio. Este es un método más avanzado de limpieza. El medio es una tierra abrasiva extraída de minas en Florida. Las partículas son lanzadas sobre la superficie, eliminando las deposiciones mientras se produce una mínima rugosidad en la superficie.
- Bolas de dióxido de carbono. Un proceso capaz de limpiar los componentes del paso del vapor con menos daños. El proceso no ha sido probado de forma sostenible para los componentes del paso de

vapor, pero es utilizado ampliamente en la industria nuclear y puede ser desarrollado para su uso en componentes del paso del vapor.

Aire a presión

El aire a presión sobre los componentes es crítico. Esta presión debe ser controlada, ya que como cualquier medio utilizado a presión puede deformar la superficie si la presión del aire llega a ser muy alta, incluso para periodos cortos. La presión del aire debe ser calibrada por el uso de "Almen Targets". Se encuentra normalmente entre 30-50 psi.

Tamaño y forma de la tobera

La forma y tamaño de la tobera del espray puede influenciar en la intensidad del impacto. Con un cierto medio, un exceso presión o un exceso del tiempo de exposición pueden causar daños.

Distancia de la salida a la superficie objetivo

Esto es difícil de controlar ya que el paso del vapor no presenta una superficie plana. Se deben considerar las regiones más críticas (aquellas que son más sensibles a sufrir deformación mecánica) deben ser consideradas cuando se mueve el chorro sobre las superficies de los componentes.

El ángulo de la inclinación del espray

El ángulo del espray, como la distancia del espray, es difícil de definir y controlar en ninguna aplicación particular. De hecho, el ángulo con el que el medio de limpieza lanza el chorro en la superficie no es constante para el contorno superficial de los álabes y las paredes laterales.

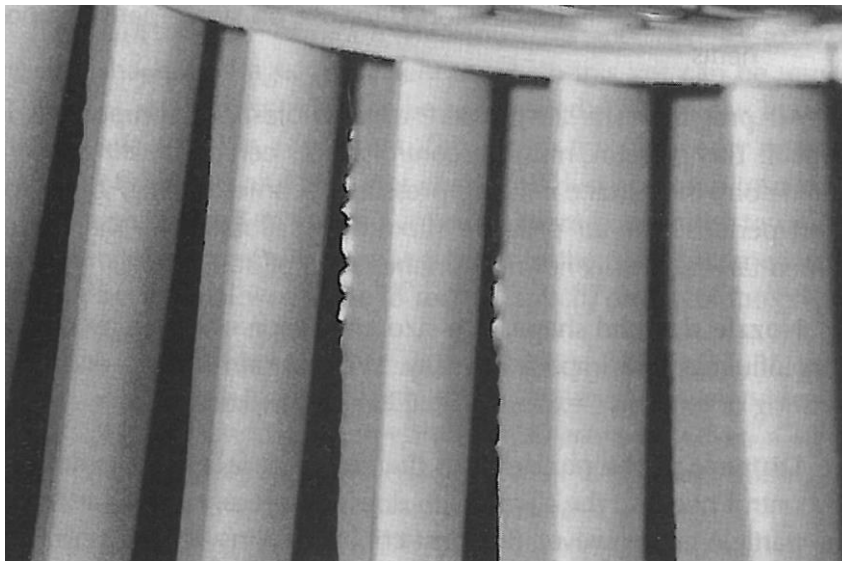


Figura 5.27 Borde de estela dañado por un control pobre del proceso de lavado

El lavado a presión es un procedimiento rutinario, pero si no se controla puede causar daño a los álabes. La Figura 5.27 muestra el borde de estela de un escalonamiento estacionario que ha sido lavado a presión sin controlar el proceso. En este caso el fino borde de estela ha sido degradado y raleado como consecuencia de la erosión por partículas sólidas. Este borde de salida se ha doblado bajo el efecto del medio de limpieza (200 micra de arenilla).

Este daño puede ser evitado por una revisión inicial de la superficie del álabe y condiciones generales y, por tanto, eligiendo un procedimiento adecuado. La zona más adecuada para recalibrar el procedimiento es en el borde de estela del álabe, eligiendo uno en el que estos no sean dañados. Cuando los elementos son devueltos a servicio, requerirán su cambio en futuras paradas, por lo que los álabes de sustitución pueden ser encargados en la parada presente para cambiarlos en cuatro o cinco años. La realidad es que el álabe se encuentra dañado hasta el punto mostrado en la figura 6.4.1 donde se requiere alguna acción correctiva en la parada presente.

Limpieza a mano de los componentes del paso del vapor

Hay situaciones en las que el lavado a mano de la superficie es necesario o justificado. Normalmente si se emplea

el lavado a mano, involucra agentes químicos y se realizada sobre componentes individuales, utilizando un disolvente sobre un cepillo o bayeta. Este tipo de limpieza es ventajosa cuando se tienen pequeñas cantidades de deposiciones y la superficie original se encuentra presente en los componentes del paso del vapor. Es importante que el disolvente utilizado no contenga azufre, cloro sodio, fósforo o cualquier constituyente que pueda formar compuestos agresivos bajo la acción del vapor y/o del calor.

Ocasionalmente el operario elegirá eliminar las escamas a mano. Es normal que no se recomiende realizar la limpieza a mano con cualquier dispositivo metálico o duro con cualquier tipo de filo. A menudo la cara convexa se puede limpiar usando un paño de lima fina en la superficie de los dos bordes. Sin embargo, es difícil de limpiar la cara cóncava de esta manera, ya que la curvatura de la superficie y el difícil acceso al completo canal de expansión. Se prefiere la voladura abrasiva.

Agua de lavado online

Este tipo de lavado se ha considerado inefectivo debido a que algunas deposiciones pueden tener compuestos solubles e insolubles. Los compuestos solubles se eliminarán por lavado, pero los insolubles no, hasta que el agua los elimine mecánicamente como resultados de algún tipo de fuerza de impacto.

Un ejemplo de esto es el óxido comúnmente formado por el hierro y el cobre. Estos serán difíciles de eliminar por el agua de lavado, y hasta que todas las escamas son eliminadas, la eliminación de estas pequeñas partículas se lleva a cabo cambiando las condiciones de la superficie causando separación del flujo, particularmente en aquellos escalonamientos con gran número de Reynolds.

Sin embargo, ciertas unidades adquieren beneficios del uso del lavado con agua. Este es el caso particular para unidades con condiciones bajas de vapor, se ha demostrado que es efectivo en unidades geotérmicas que operan con vapor saturado.

5.5.2 Directrices para el tratamiento del agua de alimentación de la caldera

Como se ha tratado con anterioridad, una parte importante de la problemática de la contaminación del vapor proviene de la entrada del agua de alimentación. Estas impurezas suelen ser solubles y por tanto las zonas donde causan daños, son aquellas partes del ciclo donde disminuye la solubilidad considerablemente. Limitando la concentración de iones corrosivos a través del ciclo de la planta hasta niveles apropiados, así como un nivel de impurezas del agua tolerable en la turbina protegerán de forma adecuada la caldera y demás componentes del ciclo.

Directrices para el tratamiento químico del agua de una planta de combustible fósil

Para establecer el tratamiento necesario del agua de alimentación, se debe conocer previamente la concentración de impurezas presentes en el agua de la caldera. El desarrollo de estas directrices es vital para para la disponibilidad de la unidad y la confianza de los equipos presentes, así como el soporte para controlar la deposición y posterior corrosión de los componentes de la turbina.

Las directrices se diferencian entre diseño de ciclos con o sin recalentamiento y son necesarios el nivel de acción necesario para contaminantes en el tambor de la caldera en un amplio rango, 4.14 MPa hasta 19.65 MPa, resumiendo todos los puntos de control, monitorizando y controlando los parámetros, los valores marcados como objetivo y los niveles de acción en el diagrama de un ciclo, para cada ciclo que interviene en el proceso y cada tratamiento de compuesto químico.

Las directrices que se establecen para el control del agua de la caldera, agua de alimentación y las impurezas presentes en el vapor son:

- Las unidades de planta fósil que utilicen tratamiento de todos los volátiles, tratamiento de oxígeno, tratamiento caustico y tratamientos de fosfatos.
- Las unidades que tienen un paso por caldera (“one-through”) usarán tratamiento de todos los volátiles.

La tabla 7.2 muestra una comparación de los límites normales del vapor para cada tipo de química. La tabla 7.3 muestra los límites que se establecen para el agua de alimentación de la caldera.

Table 7-2
Comparison of Normal Steam Limits in Fossil Plants

Parameter	Oxygenated Treatment (OT), All-Volatile Treatment (AVT) Equilibrium Phosphate Treatment (EPT)	Phosphate Treatment (PT)	Caustic Treatment (CT)
Na, ppb	3	5	2
Cl, ppb	3	3	2
SO ₄ , ppb	3	3	2
Cation conductivity, $\mu\text{S}/\text{cm}$	< 0.15	< 0.3	< 0.3
SiO ₂ , ppb	10	10	10
TOC, ppb	100	100	100

Source: R.B. Dooley⁸¹**Table 7-3**
Summary of Feedwater Chemistry Limits for Fossil Plant All-Ferrous and Mixed Metallurgy Feedwater Systems

Cycle Chemistry Parameter	AVT (mixed metallurgy)	AVT (all-ferrous)	Oxygenated Treatment (OT)
pH ₂₅ °C	8.8 - 9.1	9.2 - 9.6	8.0 - 8.5 ¹ 9.0 - 9.5 ²
Ammonia, ppm	0.15 - 0.4	0.50 - 2.00	0.02 - 0.07 ¹ 0.3 - 1.5 ²
Cation conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	< 0.2 < 0.15	< 0.2 (< 0.1)	(< 0.15)
Fe, ppb	< 10 (< 5)	< 5 (< 2)	< 5 (< 1)
Cu, ppb	< 2 (< 2)	< 2 ³ (< 1)	< 2 ³ (< 1)
Oxygen, ppb	< 5 (< 2)	1 - 10	30 - 150 ¹ 30 - 50 ²
Oxidizing-reducing potential (ORP) ⁵ , mV	< 0 ⁶	> 0	> 100

Source: R.B. Dooley⁸¹

Notes: 1 For once-through units.
2 For drum units.
3 Applicable if copper alloys in condenser.
4 Values in parenthesis represent the achievable and desirable levels.
5 ORP throughout this book refers to platinum versus Ag/AgCl₂.
6 Usually less than -300 mV will be monitored when a reducing agent is present.

Tratamiento del agua de la caldera de la planta fósil

El objetivo principal del tratamiento del agua de la caldera es asegurar que el vapor contiene las mínimas impurezas para proteger la turbina y que el tratamiento puede neutralizar la ingesta de cualquier contaminante que pueda causar el fallo de la tubería. Se disponen de cinco opciones de tratamiento del agua de la caldera:

- Tratamiento de equilibrio de fosfato (EPT).
- Tratamiento de todos los volátiles (AVT).
- Tratamiento caustico (CT).
- Tratamiento de oxigenación (OT)

Para las unidades once-through el agua de la caldera es controlada por los tratamientos del agua de alimentación.

Tratamiento de fosfatos

El uso de fosfatos para el tratamiento del agua de la caldera se ha utilizado durante más de 70 años. Los fosfatos proporcionan una buena protección sobre los ácidos e hidróxidos, reduciendo su dureza residual, formando un residuo eliminable (hidroxiapatita).

La figura 7.6 muestra el desarrollo del tratamiento de los fosfatos. Un control coordinado del pH y del fosfato,

como se muestra en la figura 7.6a, fue iniciado en 1942 para proteger los tubos del generador de la fragilización caustica, así como los efectos de las fugas del condensador de agua altamente contaminada.

Los propietarios de muchas turbinas han experimentado el escondite de fosfato en la caldea, (un decremento del fosfato y un incremento del pH con el incremento de la carga), y la vuelta de estos (cuando la carga de la unidad es disminuida, aparece un incremento de los fosfatos con una disminución del pH). Como resultado del incremento de la sensibilización, el fosfato escondido será síntoma de problemas de control subyacentes, por lo tanto, se realizarán las investigaciones y acciones correctivas pertinentes.

Dos tratamientos de fosfatos evolucionan como aproximación a las soluciones de los problemas anteriores: el tratamiento de los fosfatos aumentando los rangos de control sobre la relación molar de 2.8 de fosfato de sodio y permitiendo la operación por encima de 1ppm de hidróxido libre, tratamiento de fosfato en equilibrio, que opera con niveles de fosfato más bajos con hasta 1 ppm libre de hidróxido. La figura 7.6 c muestra el rango para este tipo de tratamiento. En la figura 7.7 se comparan los rangos de los tres tratamientos. Se nota que en el tratamiento de fosfatos congruente (CPT) se aplica sobre una relación molar entre el Na y el PO_4 de 2.1 a 1.8. La figura muestra el más frecuente que se usa en el rango por debajo de una relación molar de 2.6.

Bajo el tratamiento del fosfato en equilibrio, las **excursiones** de alto pH son controladas con el sangrado del calderín y/o reduciendo la presión de la caldera; cuando aparecen variaciones hasta bajos niveles de pH se realizan acciones para compensarla con dosis adecuadas de fosfato de trisodio e hidróxido de sodio, o con reducciones de presión.

El tratamiento de fosfatos puede ser considerado como una extensión del tratamiento de fosfatos en equilibrio hasta niveles superiores de fosfatos (entorno al 3ppm) y quizás para unidades de baja presión. El tratamiento de fosfatos tiene más tolerancia si una unidad es más susceptible a la ingesta de contaminantes.

Con el tratamiento de los fosfatos, la elección dependerá de la problemática específica que acompaña a la unidad. Los objetivos clave desde la perspectiva de la caldera son eliminar o minimizar el fosfato escondido y usar solo el fosfato de trisodio como la adición de fosfato. Este tratamiento permite para la adición de NaOH corregir el bajo nivel de pH en el arranque, e incrementarlo si se produce la entrada de pequeños contaminantes. Es permitido hasta 1 ppm de NaOH libre. Cuando se opera en el rango de hidróxido libre, existe la posibilidad de que este pase al vapor. Por lo tanto, es fundamental controlar los niveles de sodio manteniéndolos por debajo de 3ppb cuando se opera con el tratamiento de fosfatos.

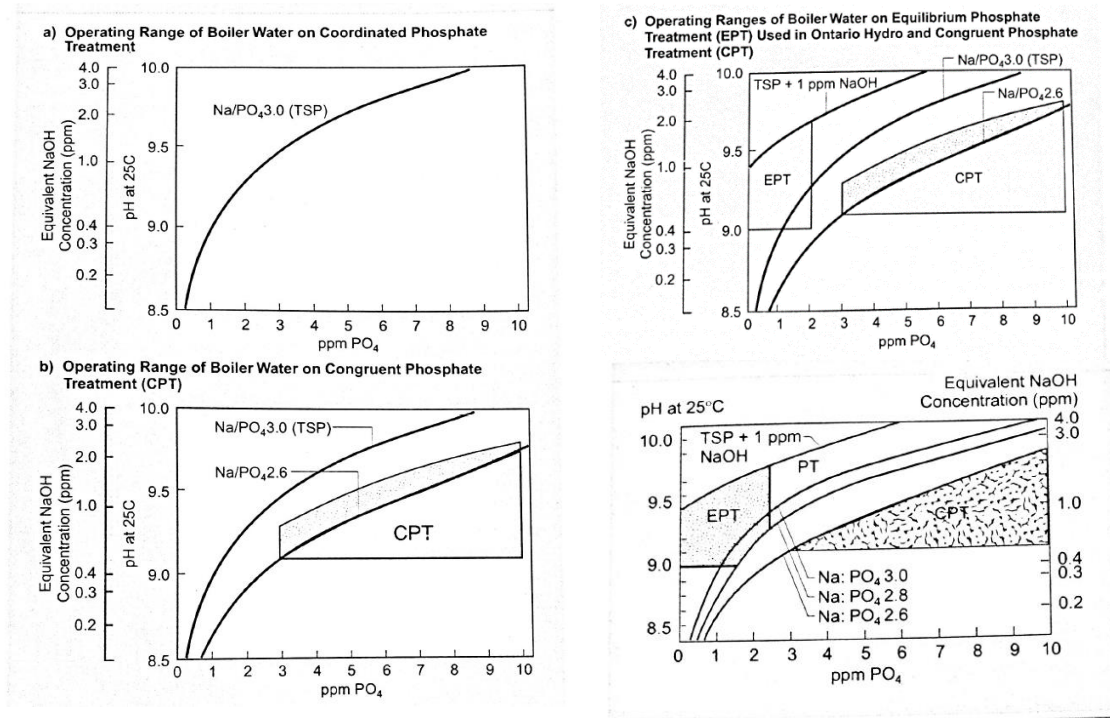


Figure 7-6. Historical development of pH-phosphate control ranges in the absence of ammonia. TSP is trisodium phosphate. Source: S.F. Whirl and T.E. Purcell⁸²; J. Stodola⁸⁵

Figure 7-7. Schematic of operating ranges of boiler water on equilibrium phosphate treatment (EPT), phosphate treatment (PT), and congruent phosphate treatment (CPT). TSP is trisodium phosphate. Source: R.B. Dooley, A. Aschoff, and F. Pocock⁷⁹

Tratamiento de todos los volátiles

Bajo este tipo de tratamiento no se incorporan partículas sólidas a la caldera de agua, aunque la adición de NaOH o Na₃PO₄ es permitida para mantener en el arranque de la unidad unos valores adecuados del pH o como respuesta a la ingesta de contaminantes. Se deberá operar junto con un filtro de condensado, aunque en algunas unidades con calderín que tienen este tipo de tratamiento no lo incorporan. La pureza del vapor necesita alcanzar unos requerimientos mostrados en la tabla 7.2. Específicamente, los niveles de sodio, cloro y sulfato deben ser inferiores a 3ppb. Una importancia particular se le debe asignar a los niveles de impureza durante el arranque de la unidad, especialmente si se añade NaOH.

Tratamiento cáustico

Históricamente se ha justificado este tipo de tratamiento cuando la operación de la planta se produce bajo grandes niveles de hidróxido de sodio (>10ppm) y fosfato de sodio (>10ppm), estandarizado en las décadas de 1950 y 1960. Una vez la unidad comienza a funcionar a presiones más altas, la corrosión de los tubos de agua de la caldera es importante. NaOH es también el químico más común en las deposiciones en los álabes del último escalonamiento de la turbina de baja presión. Como resultado se tiene una amplia variedad de tratamientos de fosfatos.

Después de la aparición temprana de varios problemas, se ha considerado el refinado de la aplicación del hidróxido de sodio y se ha estimado su uso satisfactorio en plantas de potencia de 50.000 MW.

La clave para el uso satisfactorio de las líneas tratamiento caustico es limitar la concentración de impurezas aniónicas, particularmente cloruros y el control estricto del hidróxido de sodio; se necesita una concentración mínima de NaOH para prevenir las condiciones ácidas y alcanzar los beneficios requeridos, pero el máximo nivel debe ser estrictamente controlado para prevenir el raspado caustico en la caldera, transportados al vapor y posterior daño austenítico de los sobrecalentadores y turbinas. Este control se alcanza con el seguimiento continuo del agua de alimentación, agua de la caldera y vapor, particularmente para los cloruros, sodio, y concentraciones alcalinas. En el caso de que no se pudiesen obtener valores satisfactorios, se debe investigar las causas de estos valores, y si es necesario, reducir la concentración de impurezas y acondicionamiento químico en la caldera.

Idealmente para prevenir la deposición, el vapor de la caldera de alta presión no debe contener más de 2 ppb de sodio, la concentración en unidades que tienen un buen funcionamiento es menos de 1 ppb.

Tratamiento del agua de alimentación de la unidad

El objetivo principal del tratamiento del agua de alimentación es la entrega del agua de alimentación a la entrada del economizador con las mínimas impurezas y compuestos corrosivos para todos los tipos de operación. Este último punto es la clave de la química del vapor como algunos de los mecanismos que aparecen en el paso del vapor son influenciados o iniciados por deposiciones causados por hierro o cobre en la corrosión del agua de alimentación.

Para los sistemas de agua de alimentación, ferrosos (“all-ferrous”) y metalurgia mixta (“mixed metallurgy”), el tratamiento del agua necesario será el de todos los volátiles (“all-volatile”) lo que implica que el amoníaco puede ser usado en sí mismo o combinado con el uso de hidracina o un agente reductor alternativo (eliminador de oxígeno). Un resumen de los límites químicos del agua de alimentación para sistemas ferrosos y metalurgia mixta en unidades fósiles en la tabla 7.3. También se muestra en la tabla los niveles de productos corrosivos alcanzables y deseables en el agua de alimentación. Para sistemas con metalurgia mixta, se requieren condiciones reductoras (reducir el potencial de oxidación (ORP) $\ll 0$ mV) para distintos periodos de operación incluyendo las paradas, mientras que para sistemas ferrosos, se prefiere un medio oxidante (ORP > 0 mV) para agua de alta pureza.

Se pretende tener el nivel del pH del agua de alimentación entre los valores 8.8 y 9.1 para sistemas de mezcla de hierro y cobre y entre 9.2 y 9.6 para sistemas ferrosos, para desoxigenar mecánicamente el agua de alimentación en el condensador y el purgador y desoxigenar químicamente por la adición de agentes reductores.

Se puede realizar tratamiento de todos los volátiles a todas las unidades y sigue siendo el método elegido para plantas con metalurgia mixta (hierro y cobre) en el tren de agua de alimentación y/o para unidades sin filtros para condensado.

En sistemas de desoxigenación de agua de alimentación, los niveles bajos del oxígeno ($\ll 1$ ppb) en conjunto con altos niveles de agentes reductores (como las hidracinas, N_2H_4) tiene como resultado la reducción de las condiciones reductoras en los materiales del agua de alimentación. Bajo este tipo de condiciones, tampoco los óxidos normales (Fe_3O_4) protegen la superficie de la aleación ferrosa en el tren de agua de alimentación o se rompen, si aparece un evento donde se tiene una excesiva producción y transporte de productos corrosivos o aparece la corrosión de flujo acelerado.

Es de gran utilidad una breve revisión de los agentes reductores para establecer el estado actual del uso de hidracina. Antes de la década de 1950 se utilizaba sulfito de sodio para desoxigenar el agua de alimentación de la caldera, hasta que, en 1950 empezó a utilizar en Alemania hidracina para eliminar dicho oxígeno disuelto además de para evitar los problemas asociados a la acidez del vapor y del condensado asociado al método anterior. Hasta este momento, todos los trenes de agua de alimentación estaban formados por aleaciones basadas en cobre. En un periodo transitorio, se desarrollan y aplican alternativas a la hidracina independiente de la metalurgia del sistema. Desafortunadamente, ninguna tiene la propiedad principal y más importante de la hidracina, esta no reacciona o produce productos de la descomposición que afecten al desarrollo total del ciclo de la planta. Esto es especialmente importante para la química del vapor, ya que la mayoría de las alternativas orgánicas se rompen en la parte del ciclo de alta temperatura, obteniéndose como resultados niveles altos de ácidos orgánicos como el acético y fórmico en el vapor. Esto puede provocar niveles atípicos en la conductividad del vapor con niveles mayores de $0.4 \mu S/cm$, siendo los niveles deseados menores de $0.15-0.2 \mu S/cm$ como se muestra en la tabla 7.2.

Tratamiento del agua de alimentación para sistemas ferrosos

Para este tipo de trenes de agua de alimentación, la opción más aceptada es de desoxigenación por el tratamiento de todos los volátiles o el tratamiento oxigenado (OT). La figura 7.8 muestra la diferencia principal entre el tratamiento de todos los volátiles, que pretende minimizar la corrosión y la corrosión por flujo acelerado usando agua de alimentación con un pH alto, y el tratamiento oxigenado que confía en el agua oxigenada de gran pureza para minimizar la corrosión y la corrosión por flujo acelerado en el tren de agua de alimentación.

Para el tratamiento de todos los volátiles, el condensado es desaireado en dos partes del ciclo: el condensador y el purgador (desaireador). Se usa hidracina como acondicionador del agua de alimentación debido a la dificultad

para alcanzar los niveles de oxígeno de 5ppb a través del ciclo usando solo la desaireación térmica. Se utilizan unos niveles de pH alrededor de 9.2 y 9.6. Para el tratamiento oxigenado, se mantienen niveles de oxígeno alrededor de 30 -150 ppb a través de toda la planta. Esto es posible reduciendo los niveles de pH (8.0 a 8.5) debido al uso de oxígeno como inhibidor de la corrosión.

La mayoría de las unidades que operan bajo el control de tratamiento de todos los volátiles puede alcanzar los requisitos y niveles de acción, y tener una buena disponibilidad. Sin embargo, en el transcurso de los años han aparecido varios problemas, a pesar de que se haya aplicado apropiadamente el tratamiento, se puede producir un transporte sustancial de elementos corrosivos en la planta (de 100s hasta 1000s ppb), particularmente durante transitorios y la puesta en marcha de la unidad. Esto puede producir deposición de contaminantes presentes en el agua de alimentación provocando una amplia variedad de tipos de daño en la turbina, así como influenciar en el fallo de los tubos de la caldera. Como consecuencia de estos problemas el tratamiento de oxigenación ha sido considerado el mejor en la práctica para ciertas plantas.

La adición en pequeñas cantidades de oxígeno (> 5 ppb) a agua de alta pureza (con conductividad catiónica < 0.15 $\mu\text{S}/\text{cm}$) proporciona una reducción sustancial de productos en el agua de alimentación. Esto sucede debido a que la capa protectora de óxido se forma por la presencia de pequeñas cantidades de oxígeno. Especialmente, oxihidróxido de hierro (III) (FeOOH) que bloquea los poros de la magnetita original y reduce el transporte de oxígeno e iones de hierro a través de la capa. Estas capas de oxihidróxido de hierro (III) tiene una solubilidad menor en el agua de alimentación que la magnetita.

Sistemas de agua de alimentación metalurgia mezclada

La corrosión de las aleaciones de cobre en los sistemas de condensado y agua de alimentación es función del oxígeno, dióxido de carbono y del amoníaco. Los sistemas de agua de alimentación de mezcla de aleaciones (aleaciones en base de cobre) necesitan por lo general un medio reductor ($\text{ORP} \ll 0 \text{ mV}$) y de este modo serán necesarios hidracina o agentes reductores alternativos. La química del agua de alimentación se debe optimizar en todos los rangos posibles de operación de la unidad.

5.5.3 Directrices para la química de una planta nuclear

Los límites comunes en el vapor y el agua de alimentación de una planta nuclear se muestran en las tablas 7.4 y 7.5.

Table 7-4
Typical Steam Limits in Nuclear Plants

Parameter	PWR		BWR ¹
	RSG ²	OTSG ³	(see note 4)
Na, ppb	< 0.05	< 3	< 0.05
Cl, ppb	< 0.1	< 5	< 0.05
SO ₄ , ppb	< 0.1	< 3	< 0.05
Silica, ppb	NL	< 10	NL
Cation conductivity, $\mu\text{S}/\text{cm}$	< 0.2 ⁵	< 0.2 ⁵	—
Conductivity, $\mu\text{S}/\text{cm}$	—	—	< 0.065 ⁶

Notes:

RSG—recirculating steam generator
OTSG—once-through steam generator
NL—no limit established

1 Steam values are not typically measured. Values in this table are taken as nominally 1% of reactor water limits.

2 Sodium and chlorine are not normally measured. Values in this table are based on feedwater values. Steam will always be less than the feedwater values.

3 Steam values are not normally measured. Values in this table are based on feedwater values. Steam will always be less than the feedwater values.

4 Sodium limit can be estimated from conductivity limit.

5 Typical values can be substantially higher for plants using alternative amines as a result of organic acid contribution from breakdown of amines.

6 Steam value is not normally measured. Value in this table is based on feedwater limit. Steam values will be less than feedwater values.

Table 7-5
Typical Feedwater Limits in Nuclear Plants

Parameter	PWR		BWR
	RSG	OTSG	
pH _{25°C}	a	a	
Ammonia, ppm	a	a	
Cation conductivity, $\mu\text{S}/\text{cm}$	< 0.2	< 0.2	
Specific conductivity, $\mu\text{S}/\text{cm}$			< 0.065
Fe, ppb	< 5	< 5	< 5
Cu, ppb	< 1	< 1	< 0.5
O ₂ , ppb	< 5	< 3	15 - 200
H ₂ , ppm			

Notes:

RSG—recirculating steam generator
OTSG—once-through steam generator
a—based on site-specific program

Reactores de agua presurizados (PWR)

En el flujo secundario la química del agua es típicamente alcalina y libre de oxígeno. Se tienen cuatro tipos diferentes de tratamientos de agua: tratamiento de todos los volátiles, fosfato coordinado, tratamiento oxigenado, y octadecilamina (ODA).

De estos tratamientos, el más óptimo es el tratamiento de volátiles donde se alcanza el control del pH y química por la adición de un poco de reactivo alcalino al agua desmineralizada combinándolo con condiciones libres de oxígeno. El control alcalino se alcanza utilizando amoníaco, morfina o etanolamina que pueden contribuir en el aumento de la conductividad del vapor (0.4-0.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Esta es la principal diferencia con los tratamientos de la planta fósil. Estos volátiles no se concentran en el generador de vapor.

Se alcanzan condiciones libres de oxígeno mediante agentes reductores, el más frecuente es hidracina (50-600 ppb) añadido para reducir el flujo de oxígeno y para asegurar la reducción del flujo de óxido de hierro hacia el interior del generador. Este nivel de hidracina se usa también para la aparición de ataque intergranular y agrietamiento por corrosión bajo tensión de tuberías de Inconel 600 que suele presentar problemas graves de corrosión. La hidracina no se usa normalmente para proteger contra la presencia anómala de oxígeno como la que aparece con las fugas excesivas en el condensador.

Otros aditivos, como el óxido de titanio y el ácido bórico, se usan también para modificar o influenciar en la deficiencia de pH de los generadores de vapor nuclear.

Si no se encuentran aleaciones de cobre se usa normalmente un pH mayor de 10 a 25 C. si se disponen de aleaciones de cobre, preocupan la corrosión del amoníaco y la formación de compuesto volátiles de amoníaco y cobre. Como resultado no se debe exceder una temperatura del medio que resulte un pH superior a 9.2 y controlar el exceso de oxígeno en el interior del flujo mediante eyectores de aire o defectos mecánicos (como por ejemplo reducir la fuga interna del condensador).

La selección de un valor apropiado de pH y de aminas se encuentra en una solución de compromiso entre niveles aceptables de corrosión de varios materiales presentes en el sistema de agua-vapor, la operación de desmineralización, y el coste de los desechos de la desmineralización. Si la amina es volátil, tenderá a permanecer en la fase vapor y dejará las zonas ricas en líquido aguas abajo desprotegidas. La rotura de las aminas puede llevar a la partición de ácidos orgánicos provocando un exceso de conductividad catiónica de 0.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Reactores de agua en ebullición (BWR)

En este tipo de reactores las condiciones son normalmente neutras y oxigenadas, con un ciclo lo más puro posible, en algunas unidades las condiciones cambian a neutras y reducido debido a problemas con la integridad del material.

el agua de alimentación de estas unidades pasa a través del núcleo del reactor. La radiólisis causada por los neutrones y los campos gamma descomponen hasta los compuestos más estables, por lo que no se utilizan agentes de tratamiento como el amoníaco en el agua de alimentación. Se cree que la presencia de productos descompuestos tiene un riesgo inaceptado para el revestimiento del combustible, las vasijas del reactor y los componentes internos. Por lo tanto, este tipo de plantas nucleares usa agua pura con la presencia mínima de contaminantes. Se trata con pH neutro.

Se encuentran dos tipos de enfoques principales: química normal del agua y química del agua hidrogenada.

La química de agua normal ha sido el enfoque principal de la química del agua de las plantas BWR, en este tipo de química el oxígeno presente en el agua se encuentra entre 15-50 ppb; el contenido de oxígeno de la línea principal de vapor es del orden de 18.000 ppb. El incremento de mil veces por la radiólisis del agua en el núcleo del reactor. Los altos niveles de oxígeno son beneficiosos para proteger la parte de alta presión del sistema de extracción del BWR. Sin embargo, estos niveles de oxígeno pueden llevar al agrietamiento por corrosión intergranular de las tuberías de recirculación austeníticas. También hay que ser conscientes que los componentes internos de la vasija del reactor pueden sufrir daño por este tipo de corrosión intergranular y agrietamiento por tensión asistida por la irradiación. Los problemas que acarrea el oxígeno llevan al segundo tipo de tratamiento.

Bajo un tratamiento de la química del agua hidrogenada, el hidrógeno se inyecta en el agua de alimentación final. Esto reduce la concentración de equilibrio del oxígeno a lo largo de las vasijas del reactor y el lazo de recirculación. Adicionalmente, el hidrógeno inyectado (aproximadamente 1-2 ppm) reducirá la línea principal de oxígeno hasta 5 ppm (de 18ppm del tipo de tratamiento anterior). Las dos desventajas que presentan este tipo de tratamiento son el aumento de la probabilidad de daño por corrosión de flujo acelerado en áreas donde el sistema de vapor que ha sido protegido con niveles de alto oxígeno y un largo incremento en la relación de radioactividad en el área que rodea a las tuberías del vapor.

REFERENCIAS

- Sanders, W. P. A Review of Steam Turbine Blade Operating Problems, I. Mech. E., Toronto, 1981
- Summer, W. J., J. H. Vogan, y R. J. Lindinger. Reducing Solid Particle Erosion Damage in Large Steam Turbines, American Power Conference, Chicago, 1995
- Heyman, F. J. Notes on Solid Particle Erosion in Steam Turbines: A Brief Review and Bibliography, ASME, New York, 1974
- Viswanathan, R. Damage Mechanisms and Life Assessment of High-temperature Componentes, ASM Internatinal, Metal Park, Ohio, 1989
- Ayno, S., S. Suzue, M. Muramatsu, and M. Yamada. High-temperature Blade Deterioration and Life Assessment Techniques, EPRI, California, 1987
- Rieger, N. F. Blade and Rotor Reliability Improvements, EPRI Seminar, New York, 1991
- Broek, D. Elementary Engineering Fracture Mechanics, Martinus Nijhoff, 1982
- Skelton, R. P. The Prediction of Crack Growth Rates From Total Endurance in High Strain Fatigue, Fatigue Engineering Material Structure, Vol. 2, 1979
- Sanders, W. P. Moisture Damage in the Turbine Steam Path and its Impact on Life Extension, Turbomachinery International, Vol. 33, 1992ç
- EPRI research project 2818-07: Turbine Efficiency Improvement Investigation, prepared by Stress Technology, Inc., Rochester, New York
- Sanders, W. P. Water Droplet Formation and Flow Leading to Bucket Erosion in Steam Turbines, Canadian Electrical Association Meeting, Winnipeg, 1967
- Engel, O. G. "Erosion Damage to Solid caused by High Speed Collision with Rain", Journal of Research of the National Bureau of Standars, 1958
- Dickenson. R. "How to Stop Water-Induction Damage", Powe, 1979
- Boiler Water limits and Steam Purity Recommendations for Watertube Boilers, American Boiler Manufacturers Association, 1982
- Schofield, P. "Maintaining Optimum Steam Turbine Generator Performance", EPRI, 1981
- Cycle Chemistry Corrosión and Deposition: Correction, Prevention and Control, EPRI, 1993

