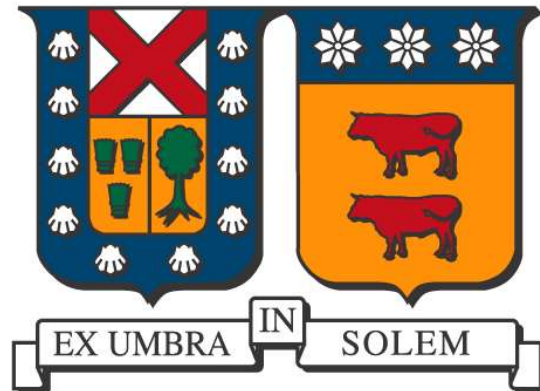


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO, CHILE



**DOCUMENTACIÓN DEL DESARME A TURBINA DE VAPOR
"NADROWSKI" E INVESTIGACIÓN DE TECNOLOGÍAS ACTUALES
APLICABLES A LA MISMA**

HUGO PATRICIO VILLAGRÁN GODOY

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROFESOR GUÍA: DR. ING. ALEJANDRO SÁEZ CARREÑO

PROFESOR CORREFERENTE: ING. RAFAEL MENA YANNSEN

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi profesor guía el Dr. Ing. Alejandro Sáez, por sus enseñanzas, su paciencia e inmensa dedicación en la labor académica, nunca acaparando sus conocimientos, sino más bien, siempre preocupado, profesional y dispuesto a compartir su experiencia para el crecimiento profesional del alumno.

A todos y a cada uno de los profesores de la Universidad, por entregarme los conocimientos y herramientas que me convertirán en un profesional capaz de enfrentarse a los nuevos desafíos.

Gracias a los funcionarios del Laboratorios de Energías Renovables (L.E.R), por su buena disposición, atención y amabilidad en todo lo referente al desarme de la turbina de vapor Nadrowski.

Gracias a mi familia por la paciencia, comprensión y esfuerzo que han puesto en mi formación. Nada de esto sería posible sin su amor incondicional.

Gracias a las personas que, de una manera u otra, han sido claves en mi vida profesional, y por extensión, en la personal. Mis mejores amigos, por estar conmigo en los momentos de flaqueza, sin su colaboración este trabajo hubiera sido mucho más complicado y menos entretenido. A mis compañeros y amigos de la Universidad, por nutrirme de nuevas experiencias que me ayudaron a crecer como persona, y por impulsarme a ser lo que soy hoy en día.

DEDICATORIA

A mi madre, tía y lela, mujeres esforzadas y trabajadoras.

Pilares fundamentales en mi vida.

Han entregado todo por verme sonreír.

Les amo.

A mi padre, un trabajador incansable.

Siempre me ha apoyado de manera incondicional.

Por su comprensión y amor.

Te amo.

RESUMEN

Nuestra universidad (UTFSM) posee una turbina de vapor modelo C375-SG II Curtis, la cual fue diseñada por J. Nadrowski y fabricada en 1975 por la empresa Dresser-Rand. Se pretende que a futuro este equipo pueda ser utilizado en una mini central térmica con propósitos académicos, sin embargo, debido a su desuso y no mantenimiento presenta varios problemas que afectan directamente a su funcionamiento.

Esta memoria se centra, en una primera instancia, en la descripción de todo lo que fue el proceso de desarme de la turbina, el cual tuvo como propósito tener una vista preliminar del estado de los componentes más importantes del equipo. Toda la documentación servirá de referencia ante cualquier intervención que se deba realizar al equipo ya sea para su reparación, mantención y/o posterior funcionamiento.

Han pasado más de cuarenta años desde la fabricación de esta turbina a vapor, las tecnologías relacionadas a estos equipos también han avanzado. Por esta razón, es que en una segunda parte esta memoria abarcará una investigación sobre cómo modernizar elementos claves del equipo, con el fin de poder mejorar su rendimiento.

ABSTRACT

Our university (UTFSM) owns a steam turbine model C375-SG II Curtis, it was designed by J. Nadrowski and manufactured by the company Dresser-Rand. In the future this equipment is intended to be used in a mini thermal power plant for academic purposes. However, due to its lack of use and maintenance it has several problems that directly affect its operation.

The first part of this thesis focuses on the description of everything that was in the process of disarming the turbine, the purpose of this process serves as a preliminary view of the state of its most important components. All the documentation will serve as reference for any intervention that needs to be made on the equipment, whether it be repairs, maintenance, and/or future operations.

More than forty years have passes since the manufacture of this steam turbine, technologies related to this equipment have also advanced. For this reason, as second part for this thesis, it will cover the investigation on how to modernize key elements of the equipment that will help improve its performance.

GLOSARIO

Q	:	Calor
Q_{abs}	:	Calor absorbido
Q_{ced}	:	Calor cedido
W	:	Trabajo
c	:	Velocidad absoluta del fluido
u	:	Velocidad tangencial
w	:	Velocidad relativa
η	:	Eficiencia
γ	:	Coeficiente volumétrico
δ_0	:	Longitud holgura de diseño en aletas del rotor
δ_1	:	Longitud holgura post desgaste en aletas del rotor
Φ	:	Factor de flujo

TABLA DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN	12
1.1.	OBJETIVOS	13
1.1.1.	Objetivos generales.....	13
1.1.2.	Objetivos específicos.....	13
2.	Marco teórico.....	14
2.1.	Turbina de vapor	14
2.2.	Principio de funcionamiento	14
2.2.1.	Elementos principales de la turbina de vapor.....	15
2.2.1.1.	Rotor.....	15
2.2.1.2.	Álabes	16
2.2.1.3.	Carcasa	16
2.2.2.	Elementos auxiliares de las turbinas de vapor.....	17
2.2.2.1.	Pistón de equilibrio	17
2.2.2.2.	Cojinetes.....	17
2.2.2.3.	Sistema de regulación o gobierno.....	17
2.2.2.4.	Sistema de lubricación	18
2.2.2.5.	Sistema de sellado.....	18
2.2.2.6.	Dispositivos de protección	19
2.3.	Clasificación de las turbinas de vapor	19
2.3.1.	Turbina de vapor de reacción y de acción.....	20
2.3.1.1.	Eficiencia.....	21
2.3.1.2.	Etapas de las turbinas de vapor	22
3.	Desarrollo	24
3.1.	Características generales de la turbina de vapor Nadrowski.....	24
3.2.	Planos de la turbina de vapor Nadrowski	26
3.2.1.	Estudio del plano mediante secciones	26
3.2.2.	Estudio de los planos mediante sistemas	28
3.3.	Previo al desarme turbina de vapor.....	30
3.3.1.	Programaciones de trabajo	30
3.3.2.	Condiciones de trabajo.....	31

3.4.	Desarme de la turbina de vapor	32
3.4.1.	Trabajo de desarme I.....	32
3.4.1.1.	Husillo en cono	32
3.4.1.2.	Cilindro de válvula de cierre rápido	33
3.4.1.3.	Piping de lubricación	34
3.4.1.4.	Válvula de apertura manual	35
3.4.1.5.	Válvula de cierre rápido	36
3.4.1.6.	Válvula reguladora de velocidad y pilotaje hacia manómetro de entrada de vapor	37
3.4.1.7.	Observaciones y comentarios generales sobre el trabajo de desarme I	38
3.4.2.	Trabajo de desarme II.....	38
3.4.2.1.	Tapa protectora y pilotaje hacia manómetro de la salida de vapor	38
3.4.2.2.	Flange descarga de vapor	40
3.4.2.3.	Observaciones y comentarios generales sobre el trabajo de desarme II	41
3.4.3.	Trabajo de desarme III.....	42
3.4.3.1.	Caja reductora	42
3.4.3.2.	Tapa trasera del intercambiador de calor	42
3.4.3.3.	Observaciones y comentarios generales sobre el trabajo de desarme III	43
3.5.	Posterior al desarme de la turbina (documentación)	43
3.6.	Nuevas tecnologías que se podrían aplicar a la turbina de vapor (modernización)	45
3.6.1.	Tecnología del sellado avanzado del eje	46
3.6.1.1.	Sellos con recubrimiento abrasivo	46
3.6.1.1.1.	Descripción de la solución y validación.....	47
3.6.1.1.1.1.	Retorno rápido de la inversión.....	47
3.6.1.1.1.2.	Ejemplo de servicios de recubrimiento abrasible para turbinas de vapor	47
3.6.1.1.1.3.	Aplicaciones de recubrimientos abrasibles para turbinas de vapor	48
3.6.1.1.1.4.	Función de los recubrimientos abrasibles en los sellos de laberintos	49
3.6.1.1.1.5.	Caso de roce en el sello de laberinto	49
3.6.1.1.1.6.	Función del recubrimiento abrasible en los sellos del eje y pistón de equilibrio	50
3.6.1.1.1.7.	Función de los sellos abrasibles en rotor tipo cerrado y álabes estacionarios	51
3.6.1.1.1.8.	Tecnología de los materiales abrasibles	52

3.6.1.1.1.9.	Prueba de rendimiento	53
3.6.1.1.1.10.	Flexibilidad del servicio de aplicación del recubrimiento abrasible	54
3.6.1.1.1.11.	Servicios de recubrimiento para componentes de gran tamaño	55
3.6.1.1.1.12.	Aplicaciones de recubrimiento in situ.....	55
3.6.1.1.1.13.	Beneficios del uso del recubrimiento abrasible.....	57
3.6.1.2.	Empaquetadura retráctil	58
3.6.1.2.1.	Efectos de la deformación.....	59
3.6.1.2.2.	Mejora de los componentes	59
3.6.1.2.3.	Factores de rendimiento.....	63
3.6.1.3.	Sello de cepillo retráctil.....	64
3.6.1.3.1.	Consideraciones en la aplicación de los sellos de cepillo	67
3.6.2.	Reemplazo de álabes.....	69
4.	CONCLUSIONES	73
5.	REFERENCIAS.....	75
6.	Anexos.....	76
A.	“TECHNICAL DATA” DE LA TURBINA DE VAPOR NADROWSKI.	76
B.	PLANOS DE LA TURBINA DE VAPOR NADROWSKI.....	79
C.	ESQUEMA OLEOHIDRÁULICO DE LA TURBINA DE VAPOR NADROWSKI.....	85
D.	PROGRAMACIONES DE TRABAJO PARA EL DESARME DE LA TURBINA DE VAPOR NADROWSKI.	86
E.	DOCUMENTACIÓN DEL DESARME DE LA TURBINA DE VAPOR NADROWSKI.....	95

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 - Esquema bloques de ciclo de vapor Rankine	14
Ilustración 2 - Funcionamiento turbina de vapor.....	15
Ilustración 3 - Rotor.....	16
Ilustración 4 – Carcasa, estator	16
Ilustración 5 - Principio de operación de las turbinas de vapor; a) Turbina de acción; b) Turbina de reacción	20
Ilustración 6 - Comparación de la eficiencia del empaletado de acción y reacción.	21
Ilustración 7 - Turbina de acción. a) Escalonamiento de presión Rateau, b) Escalonamiento de velocidad o Curtis.....	23
Ilustración 8 - Estado de la turbina de vapor Nadrowski	24
Ilustración 9 - Plano de detalle: Entrada de vapor - Válvula de cierre rápido - Válvula reguladora .	27
Ilustración 10 - Bloque de descansos - Sensor de velocidad - Bomba de aceite	27
Ilustración 11 - Plano detalle: Rodete - Eje - Descarga del flujo	28
Ilustración 12 - Plano de la turbina mediante sistemas.....	29
Ilustración 13 - Esquema oleohidráulico de la turbina Nadrowski	29
Ilustración 14 - Ejemplo de una programación de trabajo	30
Ilustración 15 - Mesa de trabajo	31
Ilustración 16 – Elemento accionador de la válvula reguladora de velocidad.....	32
Ilustración 17 - Cilindro de válvula de cierre rápido	33
Ilustración 18 - Uso del brazo hidráulico para traslado de elementos pesados	34
Ilustración 19 - Piping de lubricación	35
Ilustración 20 – Soplete para calentar pernos de válvula de apertura manual	35
Ilustración 21 - Válvula de apertura manual en lugar de reposo.....	36
Ilustración 22 - Válvula de cierre rápido	36
Ilustración 23 – Pilotaje manómetro de entrada vapor.....	37
Ilustración 24 - Válvula reguladora de velocidad	37
Ilustración 25 – Pilotaje manómetro de salida de vapor	38
Ilustración 26 - Tapa protectora.....	39
Ilustración 27 - Flange a la descarga de vapor	40
Ilustración 28 - Herramientas en mal estado.....	40
Ilustración 29 - Rodete de la turbina expuesto	41
Ilustración 30 - Caja reductora	42
Ilustración 31 - Tapa trasera del intercambiador de calor	43
Ilustración 32 - Ejemplo de uno de los documentos de desarme.....	44
Ilustración 33 - Gráfico de tipo de central eléctrica a través del tiempo.....	45
Ilustración 34 - Período de amortización para recubrimientos aplicados in situ	47
Ilustración 35 - elementos para la aplicación de recubrimiento abrasible.....	48
Ilustración 36 - Tipos de sellos de laberintos	49
Ilustración 37 - Caso de roce en sello de laberinto	50
Ilustración 38 - Función del sello abrasible en sellos de eje y pistón de equilibrio	51
Ilustración 39 - Recubrimiento aplicado en carcasa y en álabes estacionarios.....	51

Ilustración 40 - Esquema del recubrimiento abrasible	52
Ilustración 41 - Prueba de oxidación a largo plazo para diferentes materiales.....	53
Ilustración 42 - Ejemplos de resultados post prueba de abrasibilidad	54
Ilustración 43 - Prueba de abrasibilidad.....	54
Ilustración 44 - Aplicación de un sistema de recubrimiento abrasible en la mitad superior de la carcasa divida de una turbina de gran tamaño de alta presión.....	55
Ilustración 45 - Preparación previa a la aplicación del recubrimiento.....	56
Ilustración 46 - Rociado del recubrimiento abrasible a turbina de vapor de 900MW.....	57
Ilustración 47 - Deformación debido al gradiente térmico.....	58
Ilustración 48 - Arqueamiento del rotor (rotor bowing).....	58
Ilustración 49 - Sellos convencionales.....	60
Ilustración 50 - Parte de una empaquetadura retráctil de sello helicoidal.....	61
Ilustración 51 - Empaquetadura de resorte convencional	62
Ilustración 52 - Empaquetadura retráctil de resortes helicoidales.....	62
Ilustración 53 - Los sellos de cepillo son capaces de reducir dramáticamente las fugas en comparación a los sellos de laberintos de borde afilado convencionales.....	64
Ilustración 54 - Sección a través de sello de cepillo típico	65
Ilustración 55 - Vista lateral del sello de cepillo.....	65
Ilustración 56 - Comparación de flujo a 0.015 pulgadas de holgura entre un sello laberinto de 7 bordes afilados y una combinación de sello cepillo - sello laberinto.....	66
Ilustración 57 - Desgaste del sello de cepillo para diferentes valores de rigidez	68
Ilustración 58 - Geometría de un sello de cepillo retráctil.....	68
Ilustración 59 - Álabes cilíndricos.....	69
Ilustración 60 - Álabes 3DS/3DV	70
Ilustración 61 - Gráfico comparativo entre la eficiencia de los álabes 3DS y álabes de tipo cilíndrico	71
Ilustración 62 - Ángulos de flujo calculados y medidos	71

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Diferencias entre turbina de acción y reacción.....	22
Tabla 2 - Resumen de las características de la turbina de vapor Nadrowski	25
Tabla 3 - Ejemplo de servicio de recubrimiento abrasible en turbina de vapor	48

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día la UTFSM está desarrollando un proyecto que consiste en la construcción de un Laboratorio de Energías Renovables (L.E.R), con el fin de proveer un espacio para la investigación de energías alternativas dentro del mismo establecimiento. Para este propósito, se pretende instalar una mini central térmica que funcionará a partir de la generación de gas de síntesis.

Esta memoria se centra en la turbina a vapor “Nadrowski”, uno de los equipos principales del proceso. Ésta, junto a otros equipos, pertenecían a la ex – planta térmica ubicada en el Laboratorio de Termofluidos (L.T.F) de La UTFSM Casa Central. Sin embargo, presenta diversos problemas como corrosión, deterioro, obstrucciones, entre otros, causados en su mayoría por el no uso del equipo.

En una primera etapa se presentará la documentación del proceso de desarme de la turbina a vapor, que tiene por propósito tener una vista preliminar del estado del equipo y sus componentes. Además, servirá de referencia ante cualquier intervención que se deba realizar en el equipo ya sea en su reparación o posterior funcionamiento.

En una segunda etapa se hará una investigación relacionada a cómo modernizar la turbina, es decir, implementación de nuevas tecnologías que ayuden a mejorar el rendimiento del equipo. Esta modernización se centrará principalmente en dos elementos de la turbina, estos son el sellado del eje y el diseño de los álabes. En ambos casos se describirá el principio de funcionamiento, su aplicación y sus beneficios, así como también en algunos casos sus limitaciones.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivos generales

- Desarmar la turbina de vapor “Nadrowski” para poder identificar de manera preliminar los elementos que impidan el buen funcionamiento del equipo.
- Crear la documentación para el desarme de la turbina de vapor “Nadrowski” que pueda servir de referencia oficial para una futura intervención del equipo.
- Investigar tecnologías actuales que permitan mejorar el desempeño de la turbina de vapor “Nadrowski”.

1.1.2. Objetivos específicos

- Estudiar, analizar, y comprender las características, y los planos de la turbina de vapor “Nadrowski” para la familiarización total del equipo.
- Crear programaciones de trabajo (P.T) que especifiquen los equipos a intervenir, herramientas a utilizar, procedimientos a realizar y consideraciones de seguridad.
- Documentar la mayor cantidad posible de material en los trabajos de desarme del equipo.
- Elaborar archivos que describan de manera clara cómo desarmar los diversos elementos y componentes de la turbina a vapor “Nadrowski”.
- Investigar nuevas tecnologías para el sellado del eje de la turbina.
- Indagar sobre los diseños más recientes en los álabes de la turbina que permitan mejorar el rendimiento del equipo.

2. Marco teórico

2.1. Turbina de vapor

Una turbina de vapor es una turbomáquina motora [1], que transforma la energía de un flujo de vapor en energía mecánica a través de un intercambio de cantidad de movimiento entre el fluido de trabajo (el vapor) y el rodete, órgano principal de la turbina, que cuenta con álabes los cuales tienen una forma particular para poder realizar el intercambio energético. Las turbinas de vapor están presentes en diversos ciclos de potencia que utilizan un fluido que pueda cambiar de fase, entre éstos el más importante es el Ciclo Rankine.

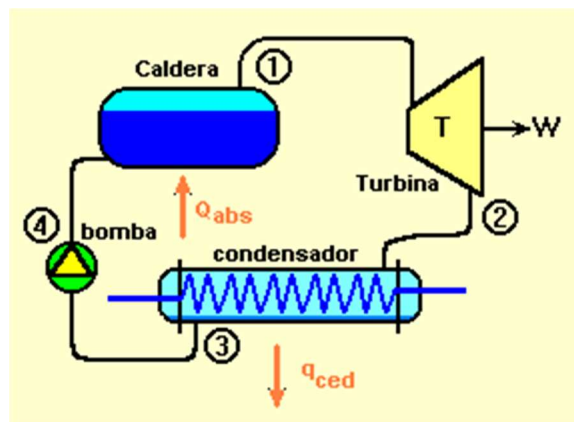


Ilustración 1 - Esquema bloques de ciclo de vapor Rankine

La bomba recolecta condensado a baja presión y temperatura. Típicamente una presión menor a la atmosférica, estado (3) y comprime el agua hasta la presión de la caldera (4). Este condensado a menor temperatura de la temperatura de saturación en la caldera es inyectada a esta. En la caldera primero se calienta, alcanzando la saturación y luego se inicia la ebullición del líquido. En (1) se extrae el vapor de la caldera y luego se conduce el vapor a la turbina. Allí se expande, recuperando trabajo, en la turbina, hasta la presión asociada a la temperatura de condensación (2). El vapor que descarga la máquina entra al condensador donde se convierte en agua al entrar en contacto con las paredes de tubos que están refrigerados en su interior (típicamente por agua). El condensado se recolecta al fondo del condensador, donde se extrae (3) prácticamente como líquido saturado. Allí la bomba comprime el condensado y se repite el ciclo.

2.2. Principio de funcionamiento

El vapor entra a una tobera en donde se expandiona [2], obteniéndose un chorro de vapor con gran velocidad.

- En el principio de acción o de impulso la tobera se encuentra fija y el chorro de vapor se dirige en contra de una paleta móvil. La fuerza del chorro actúa sobre la paleta y la impulsa, produciendo el movimiento de la rueda.
- En el principio de reacción la tobera se encuentra montada en la rueda y puede moverse libremente. La alta velocidad del vapor de salida provoca una reacción en la tobera, haciendo que la rueda se mueva en sentido opuesto al chorro de vapor.

Elementos de una turbina de vapor

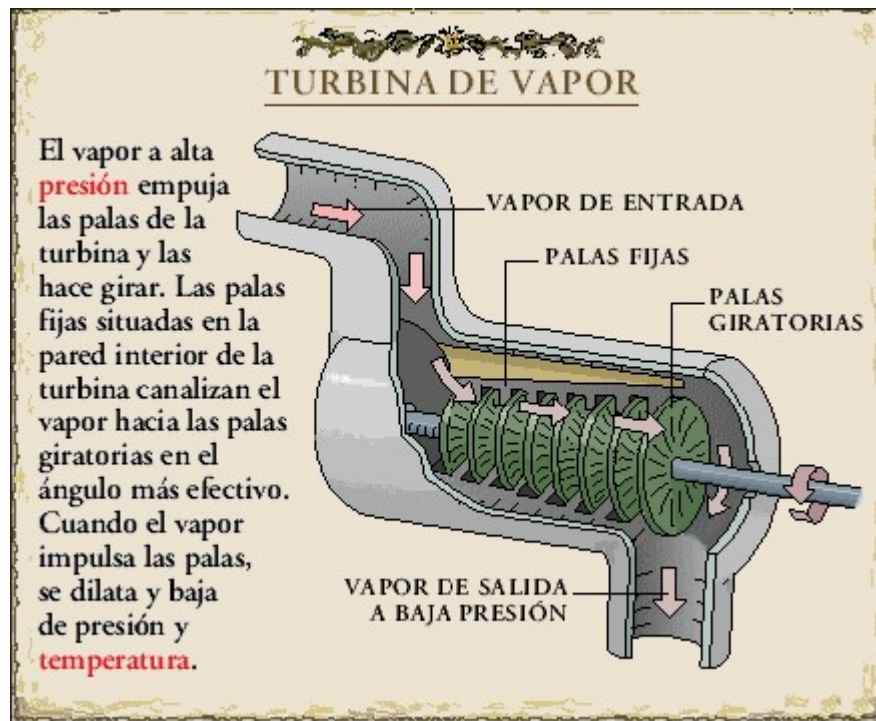


Ilustración 2 - Funcionamiento turbina de vapor

2.2.1. Elementos principales de la turbina de vapor

2.2.1.1. Rotor

Es el elemento móvil del sistema. La energía desprendida por el vapor en la turbina se convierte en energía mecánica en este elemento. Dado que la turbina está dividida en un cierto número de escalonamientos, el rotor está compuesto por una serie de coronas de alabes, uno por cada escalonamiento de la turbina. Los alabes se encuentran unidos solidariamente al eje de la turbina moviéndose con él.

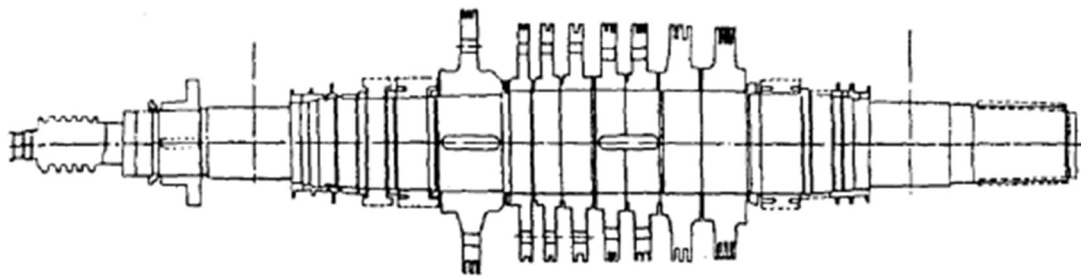


Ilustración 3 - Rotor

2.2.1.2. Álabes

Los alabes fijos y móviles se colocan en ranuras alrededor del rotor y carcasa [3]. Los alabes se pueden asegurar solos o en grupos, fijándolos a su posición por medio de un pequeño seguro, en forma perno, o mediante remaches. Los extremos de los alabes se fijan en un anillo donde se remachan, y los más largos a menudo se amarran entre sí con alambres o barras en uno o dos lugares intermedios, para darles rigidez.

2.2.1.3. Carcasa

La carcasa se divide en dos partes: la parte inferior, unida a la bancada y la parte superior, desmontable para el acceso al rotor. Ambas contienen las coronas fijas de toberas o alabes fijos. La función principal de la carcasa es proporcionar estanqueidad al proceso. Las carcasas se realizan de hierro, acero o de aleaciones de este, dependiendo de la temperatura de trabajo, obviamente las partes de la carcasa de la parte de alta presión son de materiales más resistentes que en la parte del escape. La humedad máxima debe ser de un 10% para las últimas etapas.

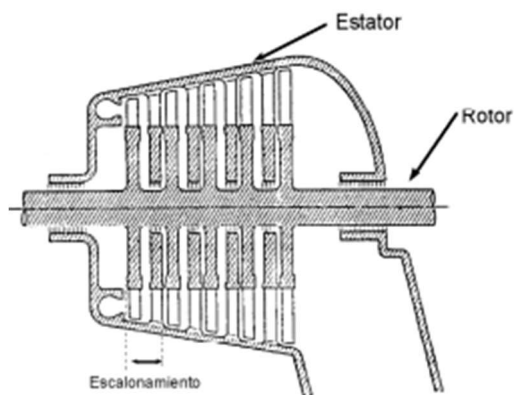


Ilustración 4 – Carcasa, estator

Normalmente se encuentra recubierta por una manta aislante que disminuye la radiación de calor al exterior, evitando que el vapor se enfríe y pierda energía disminuyendo el rendimiento de la turbina. Esta manta aislante suele estar recubierta de una tela impermeable que evita su degradación y permite desmontarla con mayor facilidad.

2.2.2. Elementos auxiliares de las turbinas de vapor

De los elementos fundamentales de una turbina, existen otros elementos auxiliares que son tan importantes como los anteriores.

2.2.2.1. Pistón de equilibrio

En todas las turbinas de reacción existe un empuje axial, que tiende a desplazar el rotor hacia el sentido del flujo de vapor. En la zona de entrada de vapor a la turbina de alta presión, el rotor está configurado para formar un pistón de equilibrio o émbolo de compensación el cual está diseñado para producir el empuje hacia la terminal de entrada de vapor a la turbina, estando en condiciones normales.

2.2.2.2. Cojinetes

Hay dos tipos de cojinetes en las turbinas de vapor, las cuales se conocen como cojinetes principales o de carga y el cojinete de empuje.

Los **cojinetes de carga** soportan el peso del rotor de la turbina, impidiéndole cualquier movimiento del mismo en una dirección vertical. Sin embargo, si el rotor no está perfectamente balanceado, los cojinetes estarán sometidos a vibraciones considerables que puedan sobrecargarlos. Están lubricados por aceite forzado a presión y no solamente tienen por objeto su lubricación, sino mantenerlos a la temperatura de operación correcta.

El **cojinete de empuje** tiene como función absorber los empujes axiales a lo largo del eje y mantener el rotor en su posición correcta con respecto a las partes fijas de la turbina.

2.2.2.3. Sistema de regulación o gobierno

La función de los reguladores en las turbinas es la de mantener constante la velocidad de rotación de la misma al variar la carga. Es decir, mantener la condición de operación.

Para el caso de los generadores de corriente alterna se exige una frecuencia constante para lo cual debe mantenerse con mucha exactitud la velocidad de giro de la turbina. En general existen dos tipos de reguladores el regulador centrífugo o de bolas y el regulador hidráulico.

El regulador centrífugo o de bolas como su nombre lo indica está compuesto por unos contrapesos adheridos a la flecha, que se mueven hacia adentro o hacia fuera dependiendo de la velocidad de la turbina. Este movimiento de balanceo se aprovecha para que, por medio de un mecanismo, se abra o se cierre la válvula de admisión a la turbina manteniendo la velocidad constante.

Los reguladores hidráulicos operan regularmente mediante bombas centrífugas o de engranes montados directamente sobre la flecha de la turbina. Estas bombas trabajan con el aceite lubricante de la propia máquina, y tienen dos funciones que desempeñar, lubricar las chumaceras de la máquina y sirven como gobierno de la misma.

2.2.2.4. Sistema de lubricación

Para la lubricación, existen dos sistemas diferentes:

- Sistema de lubricación con anillo
- Sistema de lubricación a presión

El sistema con anillo levantador de aceite consiste solamente en la colocación de anillos en las chumaceras de tal manera que al girar levantan el aceite del recipiente de la chumacera y lo depositan en el interior de ésta. Para mantener una temperatura adecuada del aceite lubricante, se coloca un serpentín en la caja de aceite de la chumacera por el interior del cual circula agua. La cantidad necesaria de ésta se controla por medio de una válvula.

El sistema de lubricación a presión está constituido por una bomba, la cual impulsa el aceite lubricante hasta las chumaceras de la máquina. Previamente el lubricante pasa por un enfriador para mantener la temperatura deseada y por un filtro para evitar que las impurezas lleguen a las chumaceras. De las chumaceras regresa el aceite caliente por gravedad al tanque de aceite.

2.2.2.5. Sistema de sellado

En las partes del eje o rotor que sale de la envolvente, se requiere de la instalación necesaria de empaquetaduras, ya que en el lado de alta presión no permiten fugas de vapor hacia la atmósfera y ya en el lado de baja presión para evitar la entrada de aire, y por consiguiente pérdida de vacío en el condensador. Los sellos o empaquetaduras se utilizan también en las carcasas y rotores entre los álabes fijos y los móviles. Los sellos son laberintos, donde el vapor se va estrangulando en los diferentes pasos hasta reducir su presión.

Para evitar fugas de vapor por los claros que quedan entre la carcasa de la turbina y la flecha se han ensayado varios sistemas de sellos, pero el más usual, y que se ha popularizado más por su sencillez es el que está constituido por anillos de carbón. Están formados por varias secciones sostenidas en su periferia por un resorte de acero. Es importante que las superficies de unión sean esmeriladas perfectamente y solamente se coloca entre ellas un material sellante plástico, cuya característica principal debe ser su

resistencia a las altas temperaturas, es decir, que no debe endurecerse y formarse quebradizo.

2.2.2.6. *Dispositivos de protección*

Existen ciertas condiciones de operación que deben ser evitadas por las turbinas por su alto grado de riesgo como son las vibraciones, velocidad excesiva de giro, bajo vacío, operar sin lubricación, excesivo desplazamiento axial, alto nivel en los calentadores de alta y baja presión y otras más. Es por eso que las turbinas cuentan con las siguientes protecciones: disparo por bajo vacío, por alto nivel en el calentador de alta presión y baja presión, por selenoide, por altas vibraciones, por sobrevelocidad.

La protección de sobrevelocidad cuando por cualquier causa, a una turbina de vapor se le disminuye la carga en forma repentina, tendera a aumentar su velocidad de rotación, hasta valores muy altos, que podrían en peligro las partes de que está formada, e inclusive ocasionar su destrucción total. Para evitar daño se han diseñado los dispositivos "de sobre velocidad" los cuales, mediante mecanismos, al alcanzar la turbina una velocidad predeterminada, cierra en forma momentánea la válvula de admisión de vapor, llamada de cierre rápido, haciendo que la turbina se pare.

Este dispositivo de sobre velocidad se calibra para que opere generalmente con una velocidad de 10 a 15% mayor que la velocidad de trabajo.

La **válvula centinela** es una válvula de seguridad pequeña instalada en la parte superior de la carcasa y su función es la de operar una alarma cuando la presión en la caja de la turbina alcanza valores peligrosos, avisando en esta forma que hay algo anormal en la operación de la turbina.

La **válvula de relevo** atmosférica se instala entre la brida de escape de la turbina y la primera válvula de bloqueo en la línea de escape, y su función es la de proteger la carcasa de la turbina. Esta válvula deberá ser de un tamaño suficiente que permita el paso de la cantidad máxima de vapor que pasa por la turbina, sin que se eleve la presión arriba de valores permisibles.

2.3. *Clasificación de las turbinas de vapor*

Existen turbinas de vapor en una gran variedad de tamaños, desde unidades de 1 HP (0.75 kW) usadas para accionar bombas, compresores y otro equipo accionado por flecha, hasta turbinas de 2.000.000 HP (1.500.000 kW) utilizadas para generar electricidad. Hay diversas clasificaciones para las turbinas de vapor modernas, y por ser turbomáquinas son susceptibles a los mismos criterios de clasificación de éstas.

La clasificación de las turbinas de vapor puede hacerse según la forma de aprovechamiento de la energía contenida en el flujo de vapor (reacción o acción), según el número de etapas (multietapa o monoetapa), según la dirección del flujo de vapor (axiales o radiales), si existe

o no extracción de vapor antes de llegar al escape y por último por la presión de salida del vapor (contrapresión, escape libre o condensación).

2.3.1. Turbina de vapor de reacción y de acción

Las turbinas de acción transforman la energía de presión del vapor en velocidad en las toberas y el impulso del vapor a velocidad es el que mueve el rotor. En las turbinas de acción, el vapor pasa a través de las boquillas y alcanza los álabes. Éstos absorben una parte de la energía cinética del vapor en expansión, lo que hace girar la rueda y con ella el eje al que está unida. La turbina está diseñada de forma que el vapor que entra por un extremo de la misma se expande a través de una serie de boquillas hasta que ha perdido la mayor parte de su energía interna.

Las turbinas de acción habituales tienen varias etapas, en las que la presión va disminuyendo de forma escalonada en cada una de ellas.

En las turbinas de reacción, hay diferente presión a ambos lados de las ruedas de los álabes y esto es lo que impulsa el rotor. Mientras discurre el vapor entre los álabes móviles, disminuye su presión puesto que el espacio entre álabes es variable. En ellas se produce un efecto parecido al que sustenta a los aviones. En las dos caras del ala de un avión hay una diferencia de presión, debido a la forma de la misma, que induce una diferencia de velocidades y que dan como consecuencia la diferencia de presiones antedicha.

La mayor parte de las veces los modelos son mixtos constando, primero de una rueda de acción, seguido de otras de reacción. Por lo general, las turbinas pequeñas son de acción y las grandes de reacción o mixtas [4].

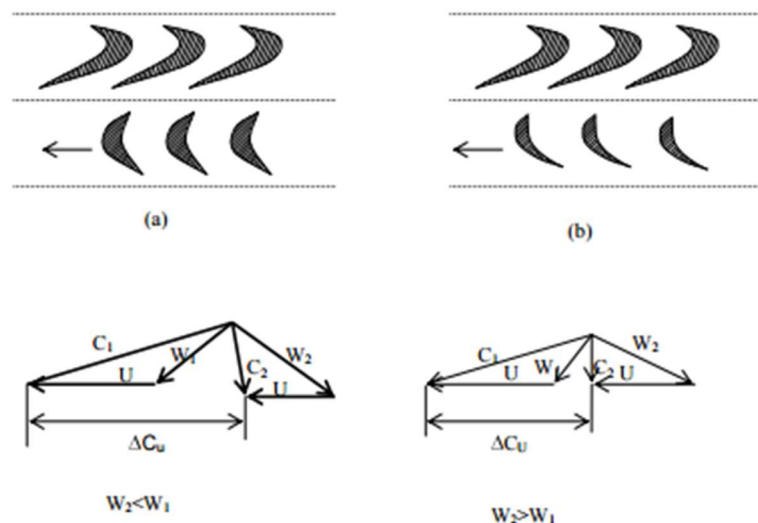


Ilustración 5 - Principio de operación de las turbinas de vapor; a) Turbina de acción; b) Turbina de reacción

2.3.1.1. Eficiencia

Para comparar los diseños de acción y reacción, resulta útil tomar una característica adimensional, siendo el más adecuado el coeficiente volumétrico. Si en primer lugar se compara el empaletado de acción (curva a) con el de reacción, con sellado en la punta, es decir, sin aro de refuerzo (curva b) se llega a la relación expresada en la tabla 1 también, a partir de la ilustración 6, se puede ver que, con la turbina de reacción, es posible tener una mejora apreciable en la eficiencia, en especial con los bajos coeficientes volumétricos, al usar aros de refuerzo (curva c). Sobre bases económicas, esta técnica se ha convertido en una práctica estándar para las turbinas de estaciones generadoras, por encima de cierta capacidad.

El costo y la experiencia con velocidad variable son aspectos posibles, para hallar la eficiencia global de la turbina de reacción, también se deben tomar en cuenta las pérdidas debidas al émbolo compensador de empuje. Sin embargo, contemplado en su conjunto, se mantienen el hecho de que la máquina de acción tiene sus ventajas cuando, se mantiene el hecho de que la máquina de acción tiene sus ventajas cuando sus capacidades son bajas, en tanto que para las capacidades nominales medianas y elevadas, resulta importante especificar, los méritos de la construcción del tipo de reacción [2].

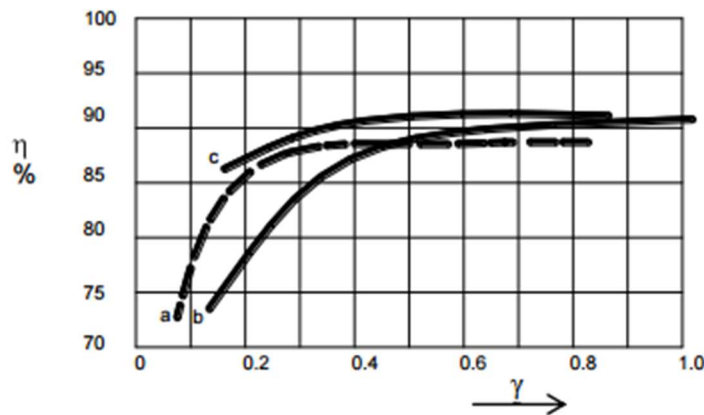


Ilustración 6 - Comparación de la eficiencia del empaletado de acción y reacción.

Características	Turbinas de acción	Turbinas de reacción
Eficiencia	Mejor con coeficientes volumétricos pequeños, peor con coeficientes volumétricos medianos y grandes.	Mejor con coeficientes volumétricos medianos y grandes.
Rotor	Construcción de disco	Construcción de tambor
Empaletado	Unas cuantas etapas, amplias en la dirección axial.	Más etapas, angostas en la dirección axial. Álabes fijos montados en la carcasa.

	Álabes fijos montados en diafragmas. Álabes móviles en el disco del rotor.	Álabes móviles en el tambor.
Mantenimiento	Transcurre un tiempo más largo entre reacondicionamientos.	Tiempo transcurrido un tanto más corto entre reacondicionamientos importantes.

Tabla 1 - Diferencias entre turbina de acción y reacción

Debemos recordar que, la eficiencia de una turbina se define como el cociente entre la energía producida por la misma y la energía disponible.

2.3.1.2. Etapas de las turbinas de vapor

Los escalonamientos de las turbinas tienen por objeto disminuir la velocidad del rodete conservando una velocidad de los álabes próxima al vapor óptimo con relación a la velocidad del chorro, es decir, esencialmente una mitad de la velocidad del chorro en los rodetes de las turbinas de acción con un solo escalonamiento, y la equivalente a la velocidad del chorro en los rodetes de reacción. La velocidad de un chorro de vapor puede ser muy elevada, dependiendo de la presión y la temperatura iniciales del vapor, así como también de la contrapresión. Si toda la energía se transformase en trabajo útil con un solo escalonamiento, sería necesario que la turbina girase a una velocidad comprendida entre 20.000 y 40.000 r.p.m. Tal velocidad exigiría un reductor mecánico de dimensiones desproporcionales.

Los dos tipos de escalonamiento utilizados corrientemente son: de presión y de velocidad. En el primer caso la caída de presión se produce en grupos de toberas, de forma que la velocidad resultante del vapor es suficientemente baja para ser absorbida por una velocidad razonable de rodete. Este proceso se repite tantas veces como sea necesario para expandir el vapor completamente, y se denomina comúnmente escalonamiento Rateau.

El escalonamiento de velocidad consiste en producir una gran caída de presión en un grupo de toberas y utilizar la velocidad resultante del vapor en tantos grupos de álabes como sean necesarios. Este método de escalonamiento se conoce por principio de Curtis. La ilustración 7.a representa una turbina de acción con dos escalonamientos de presión (Rateau) y la ilustración 7.b, otra con dos escalonamientos de velocidad Curtis.

La capacidad de transformación de energía del escalonamiento Curtis es más grande que la del escalonamiento Rateau con menos escalonamientos y con una construcción más económica. Sin embargo, el principio Rateau es más eficiente [5].

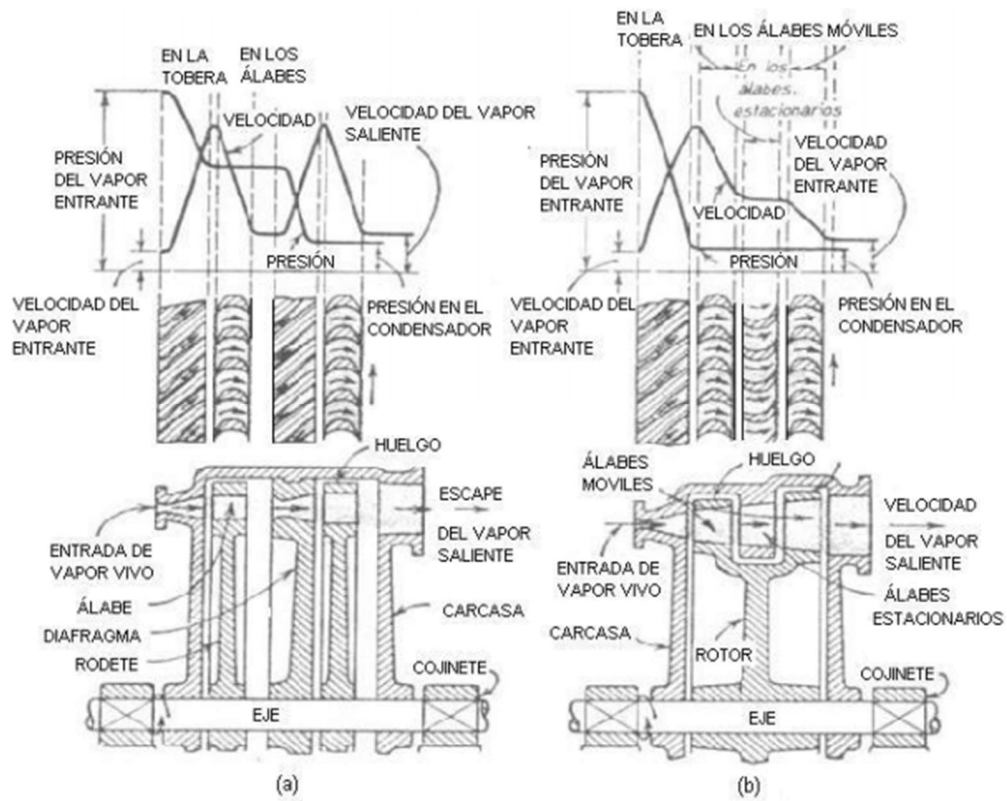


Ilustración 7 - Turbina de acción. a) Escalonamiento de presión Rateau, b) Escalonamiento de velocidad o Curtis

3. Desarrollo

3.1. Características generales de la turbina de vapor Nadrowski

Como se ha mencionado, la turbina de vapor constituye el equipo corazón del ciclo de generación de la central térmica. Esta es la encargada de utilizar la energía contenida en el vapor y transformarla en energía mecánica rotatoria para generar electricidad a través de un generador acoplado a ésta.

La turbina a vapor Nadrowski es de acción de una rueda de paletas (Curtis). La regulación de la velocidad del vapor se efectúa por medio de una cámara de inversión. El regulador de la turbina acciona una válvula de doble asiento cónico que controla el paso del vapor a la caja de potencia de la misma. La obturación, cierre o sello de esta máquina entre el estator que es la carcasa y el rotor que es eje del rodete se hace por medio de anillos de carbón y de laberinto, este sector de cierre está provisto de una línea de vapor de obturación y además debe tener una tubería de escape de vapor.

Dispone, para el arranque, de una bomba manual para elevar la presión del aceite y éste actúa sobre la válvula que permite el ingreso del vapor para su puesta en marcha. El eje de la turbina por medio de ruedas dentadas acciona una bomba de aceite que aspirará aceite del depósito, impulsándolo a través del enfriador y del filtro hasta el cilindro, para accionamiento rápido y a todo el sistema de lubricación.

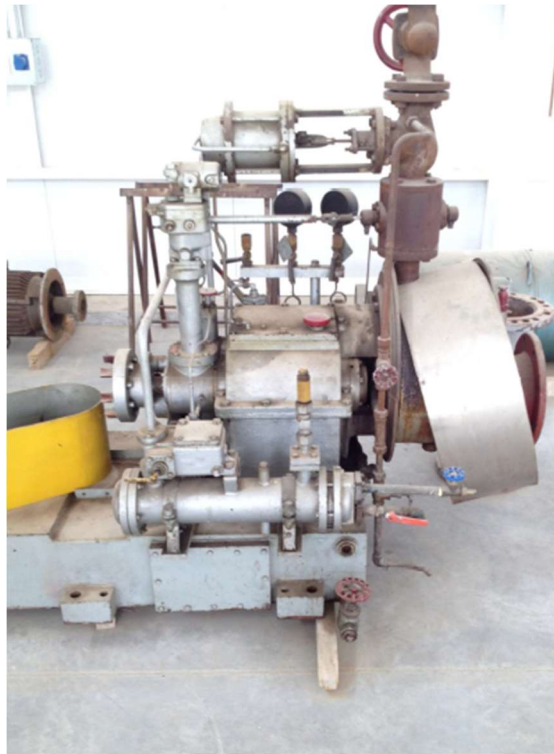


Ilustración 8 - Estado de la turbina de vapor Nadrowski

La máquina está dotada en el extremo del eje con un dispositivo que consiste en un anillo excéntrico, el cual se desplaza y produce el cierre cuando la velocidad excede entre un 10 – 15% de lo normal. En caso de disparo se cierra la válvula principal de entrada de vapor, ayudada al mismo tiempo por la presión de un resorte dispuesto en el interior de la válvula. Antes de arrancar nuevamente la máquina después de un disparo de la válvula de acción rápida, hay que esperar a que la turbina esté totalmente detenida, seguidamente girar el volante o manilla del actuador hacia su posición original para conseguir nuevamente la puesta en marcha.

A continuación, se presenta una tabla con la ficha técnica del equipo la cual fue traducida del documento original y resumida para aportar los datos característicos esenciales de la turbina. Cabe destacar que la ficha entregada por el proveedor de la turbina se mantiene aún en su totalidad, se encuentra en dos idiomas inglés y alemán. (Véase Anexos A).

Máquina	Turbina a Vapor
Modelo	C375-SG II Curtis, 2 saltos de velocidad
N°	6742/74
Año Fabricación	1975
Fabricante	J. Nadrowski (Dresser-Rand) Auf Esch 28, 33619 Bielefeld, Germany Benfield
Potencia Normal	64 [kW] (87 [HP])
Potencia Máxima	73,5 [kW] (100 [HP])
Velocidad Normal	6375 [rpm]
Velocidad Máxima	7331 [rpm]
Relación de Transmisión	4,25 a 1
Gama de Regulación de Velocidad	-5,00%
Velocidad de Acoplamiento	1500 [rpm]
Velocidad de Acoplamiento Máxima	1725 [rpm] (actúa mecanismo de corte rápido)
Velocidad Crítica de la Turbina	8800 [rpm]
Presión de Vapor Normal	14 [bar]
Presión de Vapor Máxima	16 [bar]
Temperatura de Vapor Normal	270 [°C]
Temperatura de Vapor Máxima	280 [°C]
Presión de Vapor de Escape	0,5 [bar] abs.
Temperatura Vapor de Escape	128 [°C]
Capacidad bomba principal de aceite	65 [l/min]
Potencia Requerida	1,3 [HP]
Filtro de aceite	40 [micras]
Aceite de lubricación	DIN DVM 365-363
Control de Temperatura agua Refrigeración	25 - 28 [°C]
Cantidad de Agua Refrigeración Aceite	1 [m3/h]
Presión de aceite Normal	2 - 5 [bar]
Presión de aceite Mínimo	1 [bar]
Temperatura de aceite mínimo	45 [°C]
Temperatura de aceite máximo	75 [°C]
Capacidad de aceite	80 [l]
Válvula de alarma de escape	2,5 [bar]

Tabla 2 - Resumen de las características de la turbina de vapor Nadrowski

3.2. Planos de la turbina de vapor Nadrowski

Antes de todo, lo primero fue recopilar los planos pertenecientes a la turbina que se encontraban a disposición en el Laboratorio de Termofluidos. Esto tenía como fin el comprender el funcionamiento del equipo, familiarizarse con los diversos elementos que componen al equipo y además darnos una visión global de cómo empezar a seccionar los lugares de intervención para el desarme.

Uno de los grandes inconvenientes que se presentó en esta tarea fue que todos los planos se encontraban en alemán por ende hubo un primer trabajo de traducción e interpretación de los elementos.

Hubo dos formas de abordar el análisis de los planos, la primera consistió en “seccionar” a la turbina, es decir, primero estudiar todo lo que compone a la entrada del flujo, luego todo lo que forma parte del rodete y salida del flujo, hasta finalmente estudiar lo que son el bloque de descansos, bombas de aceite e intercambiador.

Como manera de complementar la comprensión y familiarización del equipo se procedió, en segunda etapa, a clasificar al plano y los elementos de la turbina según los siguientes sistemas:

- Sistema de aceite y lubricación y control.
- Sistema de potencia.
- Sistema de control.
- Sistema de vapor.
- Estructura.

Ambas formas de abarcar los planos contribuyeron enormemente en su interpretación. El saber qué sección de la turbina se estaba analizando o específicamente cuál sistema, permitió darle un contexto y así evitar traducciones literales desde el alemán (Véase Anexos B).

3.2.1. Estudio del plano mediante secciones

En una primera instancia se analiza los planos a través de secciones, siguiendo el proceso del flujo de vapor a través de la turbina. A continuación, se mostrarán los planos específicos que se crearon.

Observación: el primer plano en detalle comprendió la entrada del flujo de vapor, junto con el mecanismo de la válvula de cierre rápido y la válvula reguladora de velocidad.

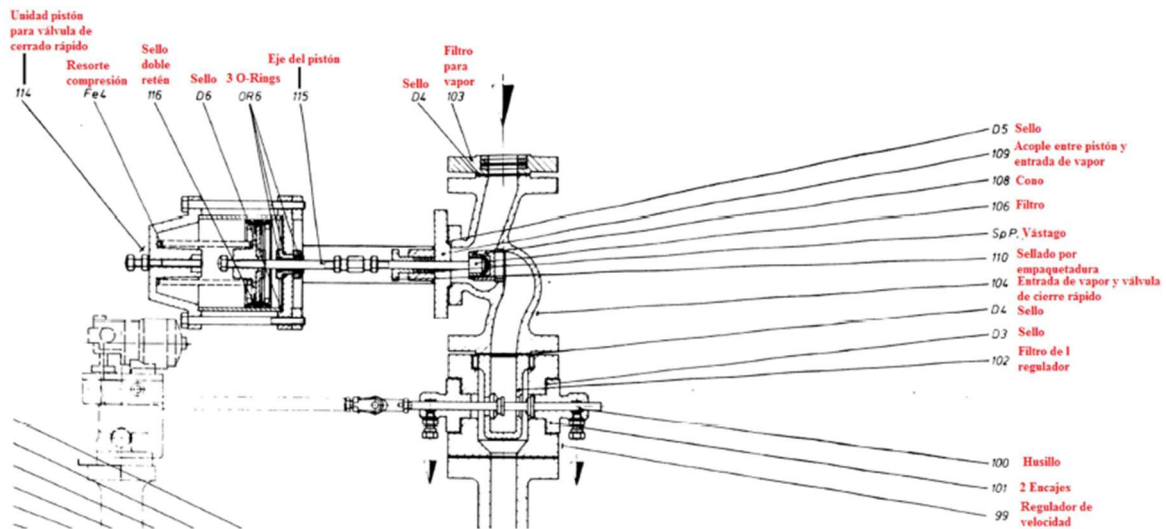


Ilustración 9 - Plano de detalle: Entrada de vapor - Válvula de cierre rápido - Válvula reguladora

Observación: el segundo plano en detalle muestra los elementos del rodete, parte del eje acoplado al rodete, sellos y todo lo que comprende la descarga del flujo de vapor.

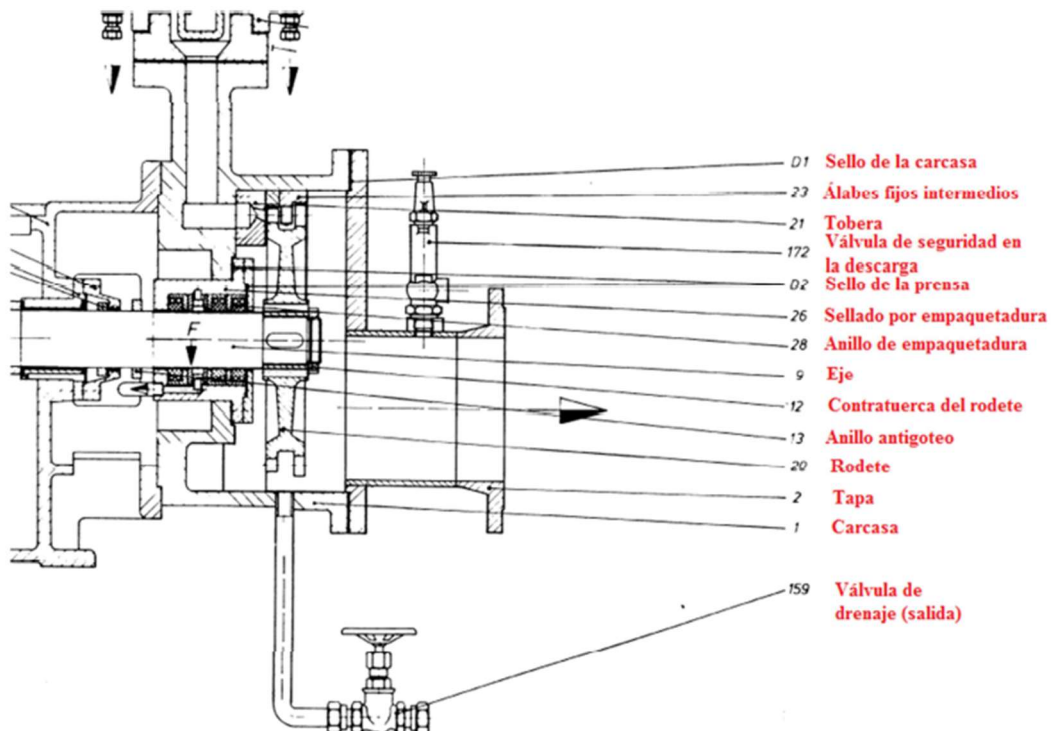


Ilustración 10 - Bloque de descansos - Sensor de velocidad - Bomba de aceite

Observación: en el tercer plano en detalle se observa principalmente los cojinetes del eje, sellos, el sensor de velocidad y bomba principal de aceite.

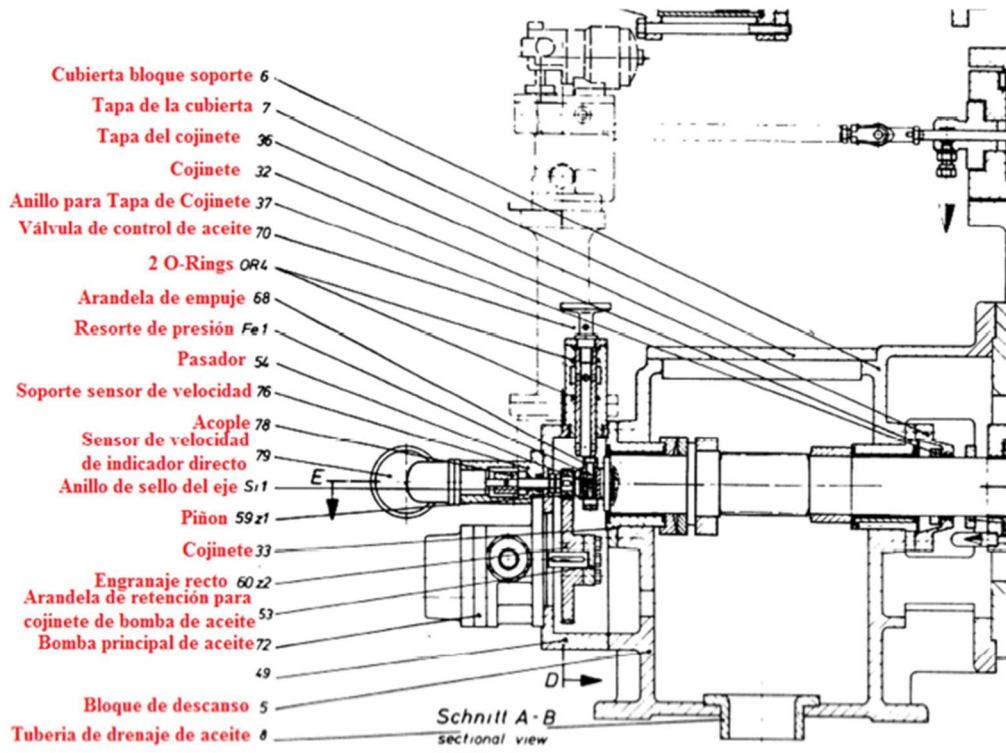


Ilustración 11 - Plano detalle: Rodete - Eje - Descarga del flujo

Es importante destacar que el análisis del intercambiador de calor se realizó de manera separada. Se decidió estudiar las partes descritas anteriormente para tener un primer acercamiento que permita entender lo que conlleva el proceso de desarme de la turbina, mostrando las partes esenciales de ésta.

3.2.2. Estudio de los planos mediante sistemas

De modo de que el desarme de la turbina se realice con la máxima rigurosidad posible y, que cada elemento sea correctamente identificado y clasificado, se procedió a asociar a cada elemento de los planos a sistemas.

A continuación, se muestra una parte del resultado luego de realizar la labor de clasificado de todos los elementos de los planos.

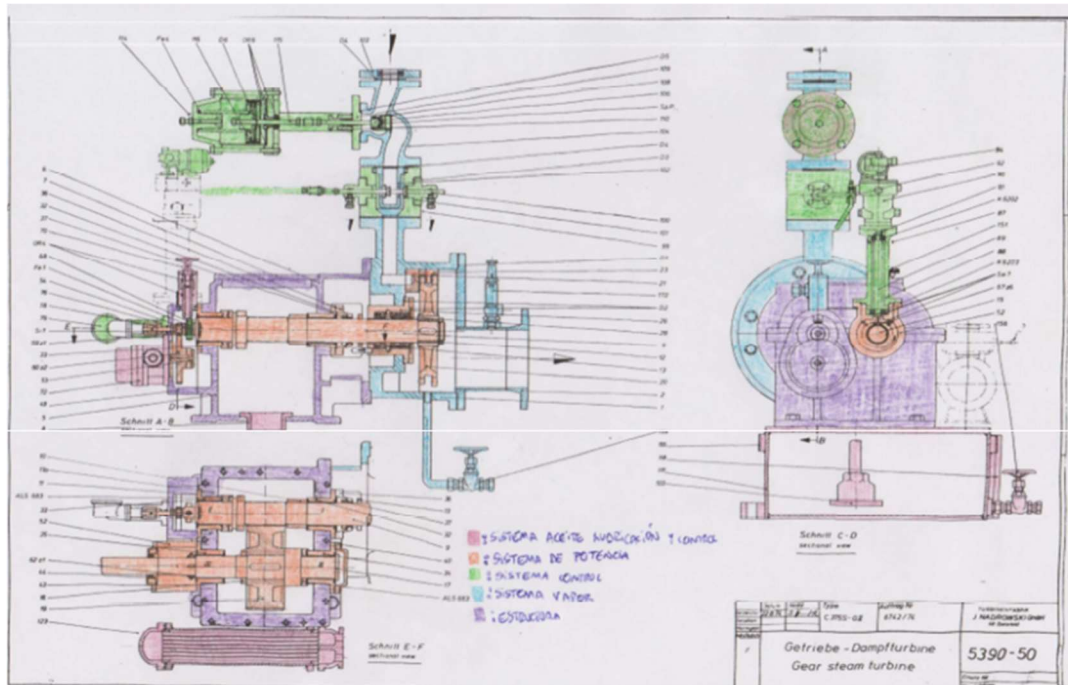


Ilustración 12 - Plano de la turbina mediante sistemas.

Los elementos podían ser asociados a un sistema de lubricación, sistema de potencia, sistema de control, sistema vapor y estructura formada básicamente por la carcasa de la turbina. A partir de este proceso se desarrolló una matriz de trabajo la cual detallaba los sistemas, los elementos particulares pertenecientes a cada sistema, sus características, además sus especificaciones (marca, modelo, material, número de serie, etc).

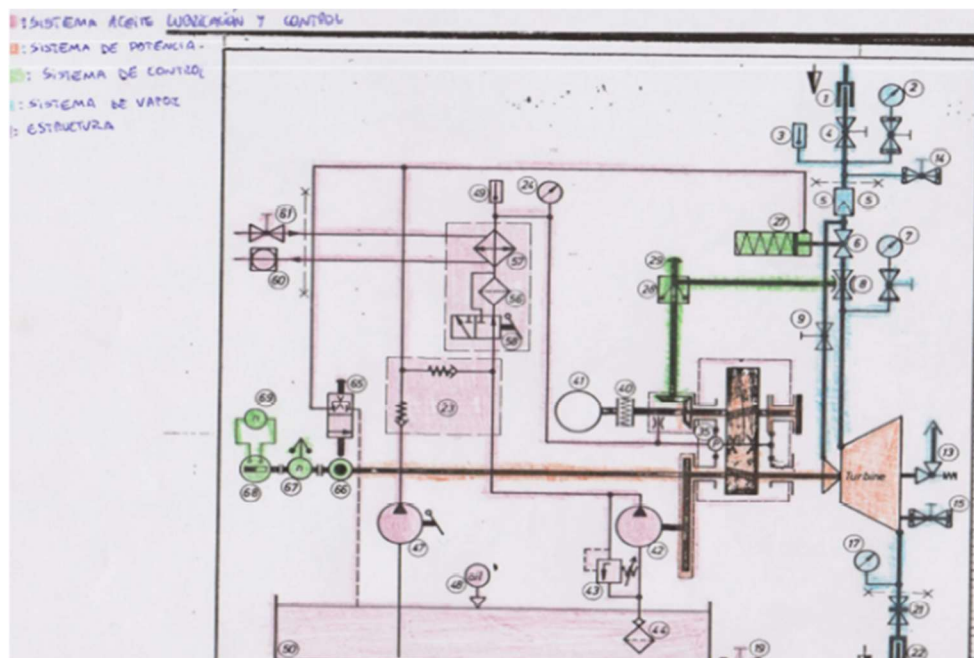


Ilustración 13 - Esquema oleohidráulico de la turbina Nadrowski

Se realizó el mismo procedimiento con el esquema óleo-hidráulico de la turbina (Véase Anexos C).

3.3. Previo al desarme turbina de vapor

Dada la complejidad y responsabilidad que conlleva el proceso de desarme del equipo, requería que el trabajo fuera de la manera más profesional posible, por esto mismo se elaboraron programaciones de trabajo que aseguraran tanto la integridad del equipo como del personal a cargo del desarme.

3.3.1. Programaciones de trabajo

Estos documentos generados para mantener el orden y seguridad en los trabajos fueron revisados y aprobados cuidadosamente por el profesor Alejandro Sáez, autorizando la entrada a la intervención del equipo.

Programación de Trabajo N°		001
Fecha:		
1.- Descripción de Faena		
Mantenimiento mayor turbina J. Nadrowsky GMBH		
1.1.- Equipos a intervenir		
Piping de vapor de Ingreso		
Válvula de parada rápida (6 P.D. / 104 P.D.)		
Válvula de regulación (8 P.D. / 99 P.D.)		
Husillo en cono (100 P.D.)		
Válvula apertura manual		
1.2.- Precauciones con equipos o componentes:		
Piping de manómetro instrumentación de vapor Ingreso.		
1.3.- Trabajo por realizar:		
Retirar y dejar identificado cada uno de los componentes que intervienen en el acceso de vapor, que sería piping y válvulas de acceso y reguladoras.		
2.- Personal		
	Nombre	HH
Responsable académico:		Firma
Asistente académico:		
Alumno responsable:		
Personal de apoyo:		
	1	
	2	
	3	
	4	
	5	
	6	
3.- Período de intervención		
Desde	Hora	Día
Hasta		Mes
4.- Herramientas, materiales y equipos		
4.1.- Herramientas		
Llaves de punta y corona medidas métricas: 17, 24 y 32 [mm].		
4.2.- Materiales		
Paños de limpieza		
Bolsas plásticas		
Trapos		
Masking Tape		
Marcador permanente		
4.3.- Equipos		
5.- Riesgos asociados y elementos de seguridad		
5.1.- Riesgos asociados		
Caídas en baja altura de elementos pesados.		
Daño en manos por manipulación de piezas metálicas con incrustaciones.		
5.2.- Elementos de seguridad		
Lentes de seguridad		
Guantes		
Buzo protector		
Zapatos de seguridad		

Ilustración 14 - Ejemplo de una programación de trabajo

Como se observa en la *ilustración 14*, en las programaciones de trabajo se nombran todos los elementos que se van a intervenir, incluyendo su código en la matriz de sistemas. Además, exponen con cuáles elementos se deben tener especial cuidado a la hora de realizar el desarme. Dentro de este mismo contexto se explica de manera concisa qué se hará en la intervención.

Otro requisito de las programaciones de trabajo era identificar el personal que iba a estar a cargo de la labor del desarme. De esta manera, implícitamente se da un grado de responsabilidad a cada uno de los que participantes.

Finalmente, se nombran todas herramientas, materiales, equipos y elementos de seguridad necesarios en la faena, junto con describir los riesgos asociados. Esto último, para mantener alerta y crear consciencia de la seguridad que se requiere en este tipo de trabajos (Véase Anexos D).

3.3.2. Condiciones de trabajo

Se debe destacar que la primera actividad previa al desarme consistió en dejar el lugar de trabajo en óptimas condiciones, para evitar que se produjera algún tipo de accidente. Hay que recordar que la turbina se encuentra en el taller del L.E.R. por ende se ordenó y limpió la zona dejándola libre de equipos y/o elementos externos que no tuvieran relación con el trabajo a realizar. Adicional a esto, se dispuso de una mesa donde se mantenía el ordenar de la labor.



Ilustración 15 - Mesa de trabajo

La programación de trabajo a un lado para ir observando los detalles cada vez que fuese necesario, las herramientas de trabajo que se requerirían para la intervención de la faena de desarme y un espacio para todas las piezas que eran desarmadas para luego ser clasificadas y etiquetadas.

3.4. Desarme de la turbina de vapor

3.4.1. Trabajo de desarme I

El primer trabajo de desarme consistió en retirar e identificar cada uno de los componentes correspondientes a:

- Elemento de accionamiento de válvula reguladora.
- Pilotaje hacia manómetro de entrada de flujo
- Válvula de parada rápida.
- Válvula de apertura manual.

3.4.1.1. Husillo en cono



Ilustración 16 – Elemento accionador de la válvula reguladora de velocidad

El procedimiento para el desarme del elemento accionador de la válvula regulación fue bastante sencillo, utilizando llaves de punta y corona (13[mm], 14[mm] y 17[mm]) se soltaron los pernos indicados en la *ilustración 16*. Una vez retirado el elemento, se etiquetó y selló en una bolsa hermética.

3.4.1.2. Cilindro de válvula de cierre rápido

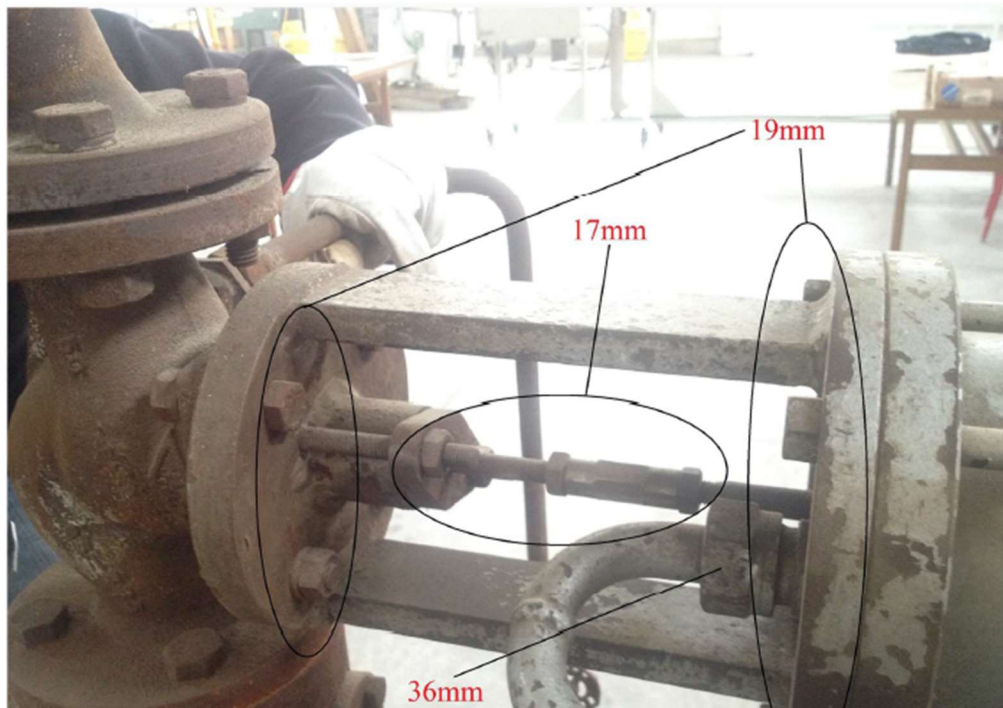


Ilustración 17 - Cilindro de válvula de cierre rápido

Este elemento tomó más trabajo, se debieron soltar todos los pernos y tuerca que se observan en la *Ilustración 17* utilizando llaves de punta y corona (17[mm], 19[mm] y 36[mm]). Sin embargo, se debió tener especial cuidado en luego de sacar la tuerca de 36[mm] de diámetro sellar inmediatamente el extremo expuesto con paños para evitar que ingresen impurezas.

El traslado del cilindro hacia el lugar de reposo se realizó con el uso conjunto de un brazo hidráulico y eslingas, esto con el fin de asegurar un trabajo seguro y eficiente.



Ilustración 18 - Uso del brazo hidráulico para traslado de elementos pesados

3.4.1.3. Piping de lubricación

Si bien en una primera instancia no se consideró lo que era el piping de lubricación en la programación de trabajo, fue necesario realizar esta intervención ya que la idea de este proyecto es analizar todos los componentes posibles de la turbina y mantenerlos en las mejores condiciones posibles.

El procedimiento consistió en soltar las tuercas de los extremos del piping y, extraerlo de la turbina manteniendo siempre la precaución de sellar los extremos con plástico, así evitar el ingreso de impurezas.



Ilustración 19 - Piping de lubricación

3.4.1.4. Válvula de apertura manual



Ilustración 20 – Soplete para calentar pernos de válvula de apertura manual

De la misma manera que los procedimientos anteriores, utilizando llaves de punta y corona y, llave de dado (24[mm] y 28[mm]) se sacaron los pernos correspondientes. Sin embargo, dado el agripamiento de los pernos se debió calentar previamente la zona utilizando un soplete, como se observa en la *ilustración 20*. Más allá de esto, no se presentó ningún otro

tipo de inconveniente, no fue necesario el uso del brazo hidráulico para trasladar la válvula hacia el lugar de reposo.



Ilustración 21 - Válvula de apertura manual en lugar de reposo

3.4.1.5. Válvula de cierre rápido



Ilustración 22 - Válvula de cierre rápido

Dado que ya se había calentado la zona previamente, el agripamiento de los pernos no fue un problema y se soltaron fácilmente, cabe mencionar que antes se sacó la conexión de tubería que iba hacia la válvula utilizando una llave francesa como se muestra en la *ilustración 22*. La válvula y sus componentes fueron marcados con plumón para luego saber exactamente su posición a la hora del armado.

3.4.1.6. *Válvula reguladora de velocidad y pilotaje hacia manómetro de entrada de vapor*



Ilustración 23 – Pilotaje manómetro de entrada vapor

El procedimiento para el retiro de la válvula reguladora velocidad consistió en una primera instancia en retirar el pilotaje hacia el manómetro que tenía conectado, al igual que los demás pipings se procedió a sellarlo en los extremos, evitando que se contamine su interior. Una vez realizado esto, se marcó la válvula con plumón para saber su posición exacta en la turbina, luego se soltaron sus respectivos pernos, finalmente se retiró de la turbina para dejarla en reposo sobre la mesa de trabajo.



Ilustración 24 - Válvula reguladora de velocidad

3.4.1.7. *Observaciones y comentarios generales sobre el trabajo de desarme I*

Los elementos en general se encontraban en buenas condiciones para el tiempo en que estaba detenido el equipo, los sellos si bien estaban deteriorados es algo que se contempla cambiar constantemente cuando se hacen intervenciones de esta magnitud.

Todo se dejó claramente clasificado e identificado, además como se comentó se marcó la posición exacta donde debería ir cada componente a la hora del armado incluyendo señales. De manera adicional, a cada componente se le asignó un código para que sea reconocido con facilidad en las programaciones de trabajo.

3.4.2. Trabajo de desarme II

El segundo trabajo de desarme consistió en retirar y dejar identificado cada uno de los componentes correspondientes a:

- Tapa protectora zona de descarga de vapor.
- Flange de descarga de vapor.

3.4.2.1. *Tapa protectora y pilotaje hacia manómetro de la salida de vapor*



Ilustración 25 – Pilotaje manómetro de salida de vapor

Lo primero fue retirar el pilotaje hacia uno de los manómetros a la descarga del vapor, manteniendo el procedimiento de siempre. Una vez ya realizado el proceso de sellado del piping, se procedió a sacar los pernos de la tapa protectora utilizando una llave de punta y corona de 17 [mm]. Ya retirados los pernos y clasificados en una bolsa hermética se realiza el retiro de la tapa en sentido de la descarga del flujo.



Ilustración 26 - Tapa protectora

3.4.2.2. *Flange descarga de vapor*



Ilustración 27 - Flange a la descarga de vapor

Sin duda este fue el trabajo más complicado de realizar, los pernos estaban muy agripados haciendo imposible retirarlos en una primera instancia. Se calentó la zona usando un soplete, se le aplicó líquido DW40, líquido de frenos e incluso se aumentó el largo de la palanca para extraerlos, sin embargo, el principal problema fue la mala calidad de las herramientas con las que se contaban.



Ilustración 28 - Herramientas en mal estado

Se gestionó con el profesor Rafael Mena de nuestra Universidad el contar con herramientas de mejor calidad. Luego de una semana llegaron las herramientas solicitadas, haciendo posible continuar con la labor del desarme de manera exitosa.

Una vez ya dejado descubierto el rodete, la siguiente tarea consistió en analizar de qué manera sería posible retirarlo de la turbina. Para esto se consultó con un experto en la materia, un profesional externo a la universidad. Según lo dicho por el profesional, lo que complicaba el trabajo de desarme era la contratuerca del rodete, no se poseía la herramienta precisa para poder sacarla, además las toberas de la turbina al intentar soltarlas podrían dañar al rodete, por ende, habría que hacerlo de una manera extremadamente rigurosa. La forma de cómo extraer el rodete también había que estudiarla en detalle, es por esta razón que se decidió seguir avanzando en el análisis de otros elementos de la turbina y ver en qué condiciones se encontraban.



Ilustración 29 - Rodete de la turbina expuesto

3.4.2.3. Observaciones y comentarios generales sobre el trabajo de desarme II

En general, los pernos se encontraban muy agripados por lo que cada vez se hizo necesario aplicar calor en la zona además de DW40. Las herramientas con las que se contaban en un comienzo no eran de la mejor calidad, por lo que algunas se destruyeron en el proceso, retrasando los trabajos de desarme.

Se debe hacer una limpieza de los componentes porque están llenos de sarro y otras impurezas, hacer un cambio de todos los sellos y estudiar el torque de cada perno para lo que corresponderá el re armado.

3.4.3. Trabajo de desarme III

El tercer trabajo de desarme consistió en retirar y dejar identificado cada uno de los componentes correspondientes a:

- Caja reductora.
- Tapa trasera del intercambiador de calor.

3.4.3.1. Caja reductora

Utilizando una llave de dado, se soltaron los pernos de la tapa de la caja reductora, una vez retirados y clasificados se procedió a retirar la tapa, dejando al descubierto el juego de engranajes.

El resultado sorprendió por su simpleza, sólo dos ruedas dentadas hacían el proceso de reducción de velocidad. Entre sí, los elementos se encontraban en muy buenas condiciones como se puede observar en la *ilustración 30*, se pueden observar además las mangueras que lubrican los descansos del eje.

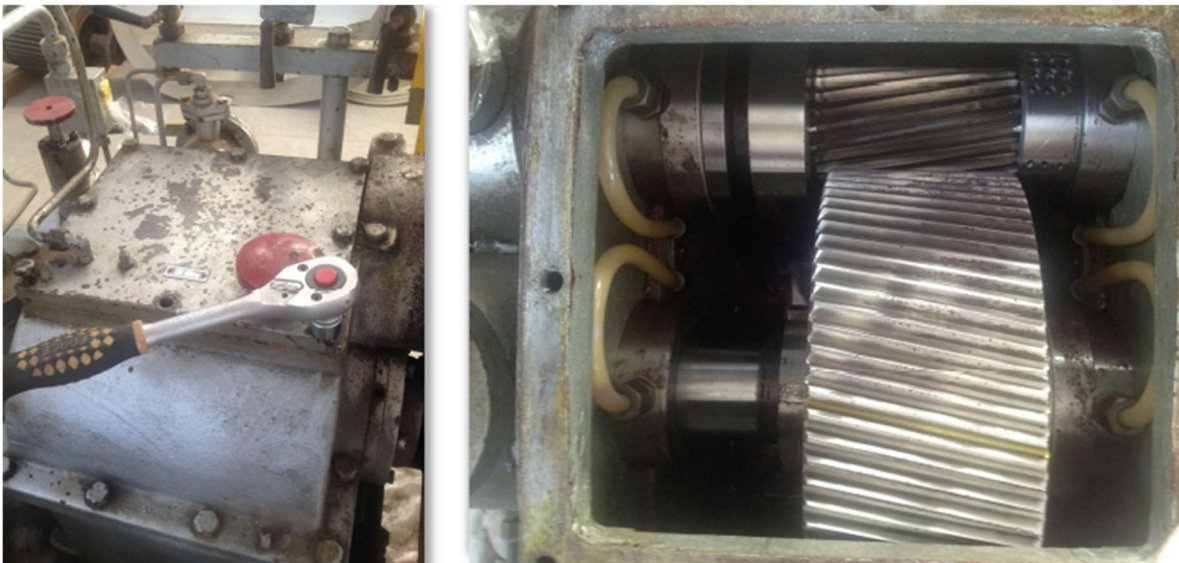


Ilustración 30 - Caja reductora

3.4.3.2. Tapa trasera del intercambiador de calor

Al igual que en la caja reductora, con ayuda de una llave de dado y, una llave de punta y corona se sacaron los pernos de la tapa. Una vez que se retiró la tapa se pudo observar que estaba con suciedad y el sello totalmente desgastado. Se intentó seguir desarmando otros sectores del intercambiador de calor, sin embargo, esto requería el uso de otras herramientas la cuales no se poseían por lo que se tuvo que detener el trabajo.

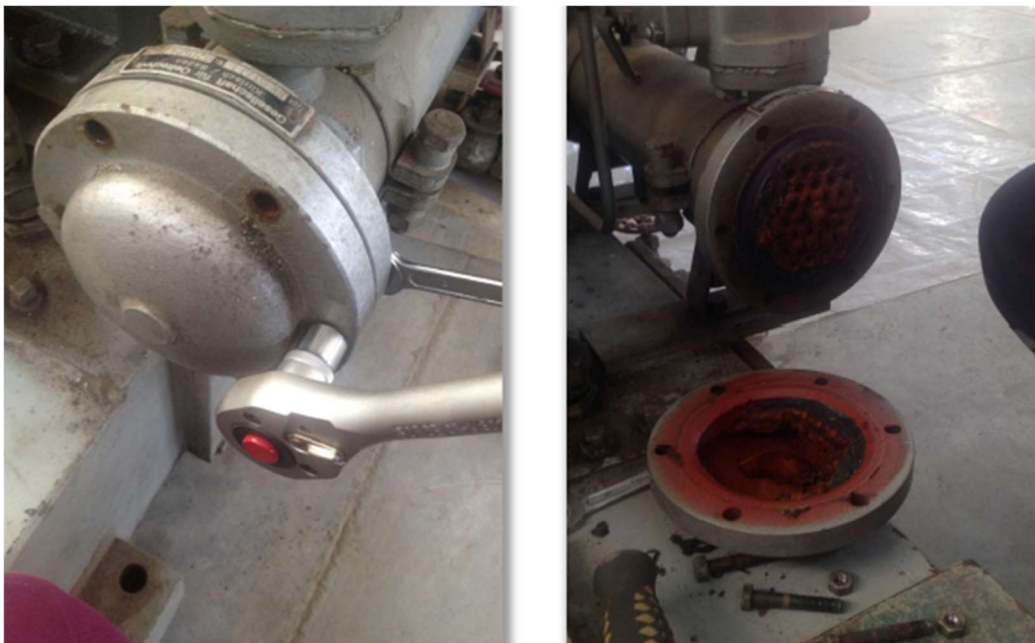


Ilustración 31 - Tapa trasera del intercambiador de calor

3.4.3.3. Observaciones y comentarios generales sobre el trabajo de desarme III

Como se dijo, sorprende la simpleza del mecanismo de la caja reductora. Cabe mencionar que el eje, al igual que el rodete tenían sacados de material, especulo que debe haberse hecho algún tipo de balanceo del rodete.

Además, se notó que anteriormente se había extraído aceite de la caja reductora puesto que había muy poco.

3.5. Posterior al desarme de la turbina (documentación)

Ya finalizado el desarme de la mayor cantidad de elementos posible de la turbina, comenzó un trabajo de recopilación de toda información tanto teórica como práctica, esto con el fin de generar documentos físicos, que permitan a los demás estudiantes y docentes intervenir, en un futuro desarme, a la turbina y así realizar una inspección general de los elementos que la componen.

Los documentos plasman en una o dos páginas de manera clara y sencilla, toda la experiencia que conllevó el desarme de los elementos de la turbina. Se realizó documentos para cada una de las partes de la turbina por separado.

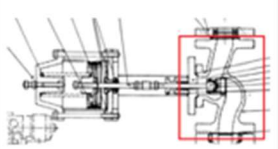
Desarme de Válvula de Parada Rápida	
	
Desarme previo	- Piping de Vapor de ingreso y Válvula de Apertura Manual - Cilindro de Parada Rápida
Herramientas necesarias/sugeridas	- Llave de punta y corona de 24 [mm] y 32 [mm]
Equipos necesarios/sugeridos	- Soplete (sugerido)
Materiales necesarios/sugeridos	- Marcador permanente (sugerido) - Trapos - DW 40 - Masking Tape - Bolsa de plástico
Elementos de seguridad obligatorios	- Gafas de seguridad - Guantes - Zapatos de seguridad - Overol
Procedimiento detallado (paso a paso)	
1) Antes de comenzar a soltar los pernos del <u>flange</u> de la válvula, se debe retirar la tubería de purga conectada a la pieza. Para ello, si se observa <u>agrietamiento</u> en la tuerca se puede aplicar DW 40 y/o calor a la zona mediante un soplete. Para extraer la tuerca se utilizará una llave de punta y corona de 32 [mm]. importante sellar el extremo de la tubería con <u>Masking Tape</u> y/o Bolsa de <u>Plástico</u>.	
	
2) Ya separada la tubería de purga de la válvula se procede a soltar los pernos del <u>flange</u>, para ello se utilizará una llave de punta y corona de 24 [mm].	
 3) Una vez ya extraído los pernos se ubica la válvula en la posición de reposo, para esta etapa no es necesario contar con un equipo adicional en su traslado ya que la pieza en sí no es pesada.	
Observaciones y/o Recomendaciones	
- Mantener el lugar o zona libre de objetos que puedan interferir en el trabajo. - En la práctica quedó demostrado que aparte de calentar la zona de trabajo y, utilizar líquidos anticorrosivos, el brazo mecánico juega un papel fundamental, aumentar el brazo permite extraer de manera más fácil los pernos. - Dejar clasificado todos los elementos para que a la hora de armar, todo sea más fácil y eficiente. - Utilizar marcador para indicar la posición en la que se encontraba el equipo facilita visualmente a reubicar la pieza en su estado original.	
	

Ilustración 32 - Ejemplo de uno de los documentos de desarme

Como se puede observar en la *ilustración 32*, estos documentos de desarme tienen, en parte, la base en las programaciones de trabajo. Sin embargo, el real aporte se lo da la experiencia que se tuvo al trabajar en los procesos de desarme, permitiendo dar un punto de vista más real que teórico.

Todos estos documentos tendrán la misma estructura. Primero, una identificación del elemento que se va a intervenir a través de fotos tanto real como su interpretación en el plano de la turbina. Se especificará si existe o no un desarme previo que necesita ser realizado antes de intervenir al elemento o componente. Se nombrarán todos los equipos, materiales y elementos de seguridad necesarios y/o sugeridos que permitan hacer un trabajo exitoso manteniendo la máxima seguridad posible. Luego se detallará paso a paso, de manera minuciosa, el procedimiento de desarme acompañado de fotografías que ayuden al entendimiento del lector. Finalmente, se realizarán observaciones y recomendaciones basados netamente en la experiencia, para que el desarme del elemento se realice de la manera más eficiente posible (Véase Anexos E).

3.6. Nuevas tecnologías que se podrían aplicar a la turbina de vapor (modernización)

Siendo las turbinas de vapor el tipo de generación de energía más grande en todo el mundo, los diseñadores y operadores de turbinas de vapor se encuentran bajo una tremenda presión para reducir las emisiones que contribuyen al calentamiento global. Esto, combinado con los aumentos en el precio del combustible y la necesidad de suministrar energía asequible, impulsa la continua necesidad por mayor eficiencia

Las soluciones de modernización están definidas por su habilidad de incrementar el rendimiento de generación eléctrica y/o disminución del “heat rate” (consumo específico) utilizando lo último en tecnologías. Estas soluciones están normalmente consideradas para turbinas antiguas, las cuales utilizan tecnologías de hace 30 años o más, sin embargo, recientemente operadores de turbinas de vapor mucho más nuevas, en unidades que han estado en operación tan sólo por 5 años, están indagando sobre opciones que maximicen su rendimiento [6].

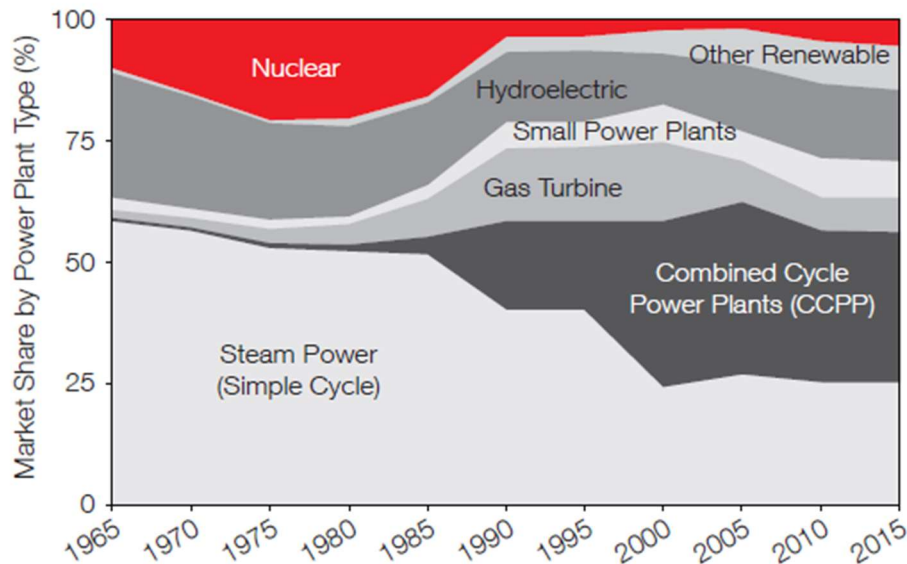


Ilustración 33 - Gráfico de tipo de central eléctrica a través del tiempo

Las centrales a vapor siguen siendo dominante en todo el mundo cuando se consideran todos los tipos de centrales eléctricas que emplean turbinas de vapor, incluyendo centrales térmicas de ciclo combinado, nuclear e incluso algunas fuentes de energía renovables tales como la geotérmica, biomasa y quema de residuos.

Las principales tecnologías de turbinas que están disponibles para las unidades existentes son:

- **Sellado avanzado del eje:** reequipamiento con sellado retráctil, cepillo y abrasible.

- **Reemplazo de álabes:** sustitución de los álabes para las etapas existentes de la turbina por álabes avanzados, tales como los álabes “3DS/3DV”.

3.6.1. Tecnología del sellado avanzado del eje

Las mejoras para el sellado de vapor en el eje pueden implementarse para unidades operativas existentes, así como también a unidades nuevas. Estas tecnologías permiten la operación con holguras de sellos más pequeños e incluyen características que mejoran la confiabilidad en el caso de que el rotor haga contacto con el sello.

Estas tecnologías de sellado son el recubrimiento abrasible, sellado retráctil, sellos de cepillo, los cuales serán descritos a continuación.

3.6.1.1. Sellos con recubrimiento abrasivo

Una forma en que se puede conseguir aumentar la eficiencia es mediante la reducción de las holguras entre los componentes rotatorios (tales como álabes y ejes) y componentes estacionarios a través de la introducción de sellos abrasibles [6].

La industria de la turbina de vapor está en un proceso de adoptar la tecnología de sellado abrasible que durante mucho tiempo se ha utilizado en otras aplicaciones de turbomáquinas, en particular, en el área industrial y aeronáutico a través de las turbinas a gas.

El peso y tamaño de los componentes de la turbina de vapor, particularmente para plantas de gran magnitud, excluye la posibilidad de transportar estos componentes fuera de las instalaciones para su tratamiento. Por otra parte, los tiempos de interrupción extendidos en un overhaul pueden costar millones de dólares por semana en ingresos perdidos. Por lo tanto, la industria necesita servicios que puedan aplicar estas tecnologías de sellado en el lugar de la fabricación o en el montaje final, o in situ durante el overhaul de la turbina.

Aplicando la tecnología de sellado abrasible a turbinas de vapor, resulta en un incremento de la potencia de salida y eficiencia, o una reducción del consumo de combustible. Ambos escenarios resultan en la reducción de emisiones de CO₂, y en el caso de centrales a carbón o petróleo, reducción de las emisiones de SO₂.

Sólo un 0.5% de mejora en la eficiencia de una turbina a vapor equivale a más de 1 millón de dólares por año para una central de 1000[MW]. Dentro de un período típico de overhaul de 5 años, la inversión en sellos abrasibles es recuperada 13 veces. Cuando todas las secciones importantes de la turbina de vapor son equipadas con tecnologías abrasible, se pueden lograr ganancias de eficiencia de hasta 1%.

Además, algunas empresas de servicio han desarrollado habilidades especiales para aplicar los sellos abrasibles a componentes grandes de la turbina de vapor, llegando a 2 metros de diámetro, 4.5 metros de largo y un peso de más de 10 toneladas. Y estos recubrimientos pueden ser aplicados ya sea en su taller de pulverizado, o en el sitio de

montaje final u overhaul de la turbina, para facilitar la logística y reducir el tiempo de interrupción de la turbina.

3.6.1.1.1. Descripción de la solución y validación

3.6.1.1.1.1. Retorno rápido de la inversión

Cuando los recubrimientos abrasibles son utilizados en todas las áreas aplicables de la turbina (produciendo un 0.5 – 1.0% de mejoramiento en la potencia de salida), los costos de su aplicación son muy económicos, incluso para servicios in situ. El tiempo de amortización para las turbinas de vapor de potencias mayores a 250[MW] es sólo una fracción del ciclo del overhaul. Para unidades más grandes con potencias de salida mayor o igual a 1000[MW], la inversión se recupera en una cuestión de semanas.

Cuando este rápido periodo de recuperación de la inversión se combina con el beneficio adicional de la reducción de las emisiones de CO₂, este tipo de tecnología se convierte en una solución muy atractiva. Además, cuando el recubrimiento es aplicado in situ, el tiempo adicional de montaje u overhaul es minimizado, la logística y los riesgos asociados con servicios fuera del lugar son eliminados.

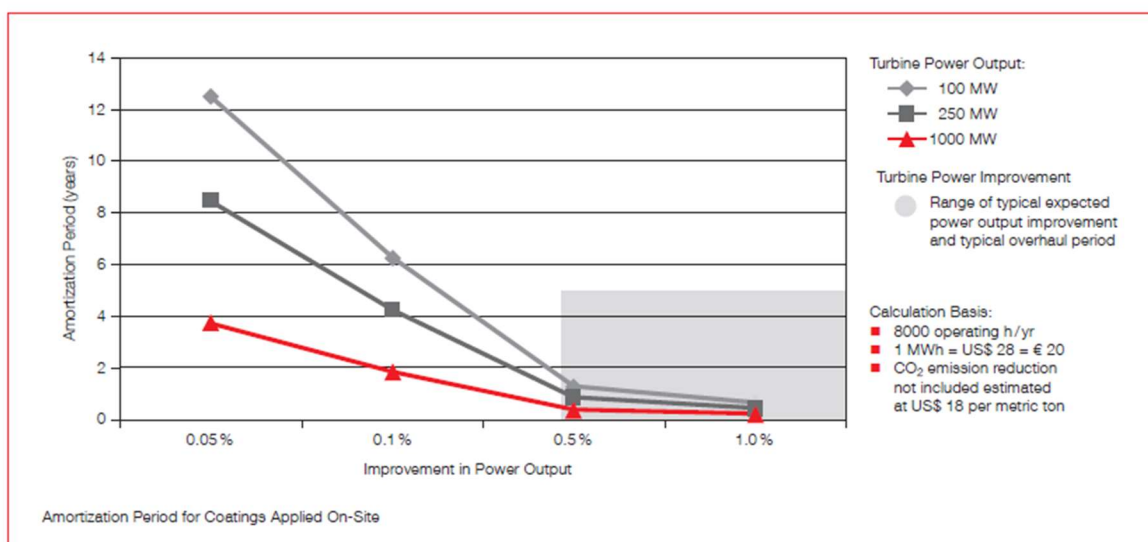


Ilustración 34 - Período de amortización para recubrimientos aplicados in situ

3.6.1.1.1.2. Ejemplo de servicios de recubrimiento abrasible para turbinas de vapor

El siguiente ejemplo muestra datos calculados para recubrimientos in situ en turbinas de vapor de 1000[MW].

	OEM efficiency focus	OEM environmental focus
Issue	Sub-optimal turbine efficiencies	High cost of excessive CO ₂ emissions
Oerlikon Metco Solution	Full steam path sealing	Full steam path sealing
Benefit	Up to 1 % efficiency gain; valued at US\$ 2.2M/yr/unit sold	Approx. 73,600 metric tons/yr/unit CO ₂ emission reduction
Payback Time	0.2 yr	0.35 yr ^a
Financial Return (NPV)	US\$ 7.8M	US\$ 4.7M

^a Cost of CO₂ emission valued at US\$ 18/metric ton
Note: M = 1 million

Tabla 3 - Ejemplo de servicio de recubrimiento abrasible en turbina de vapor

3.6.1.1.3. Aplicaciones de recubrimientos abrasibles para turbinas de vapor

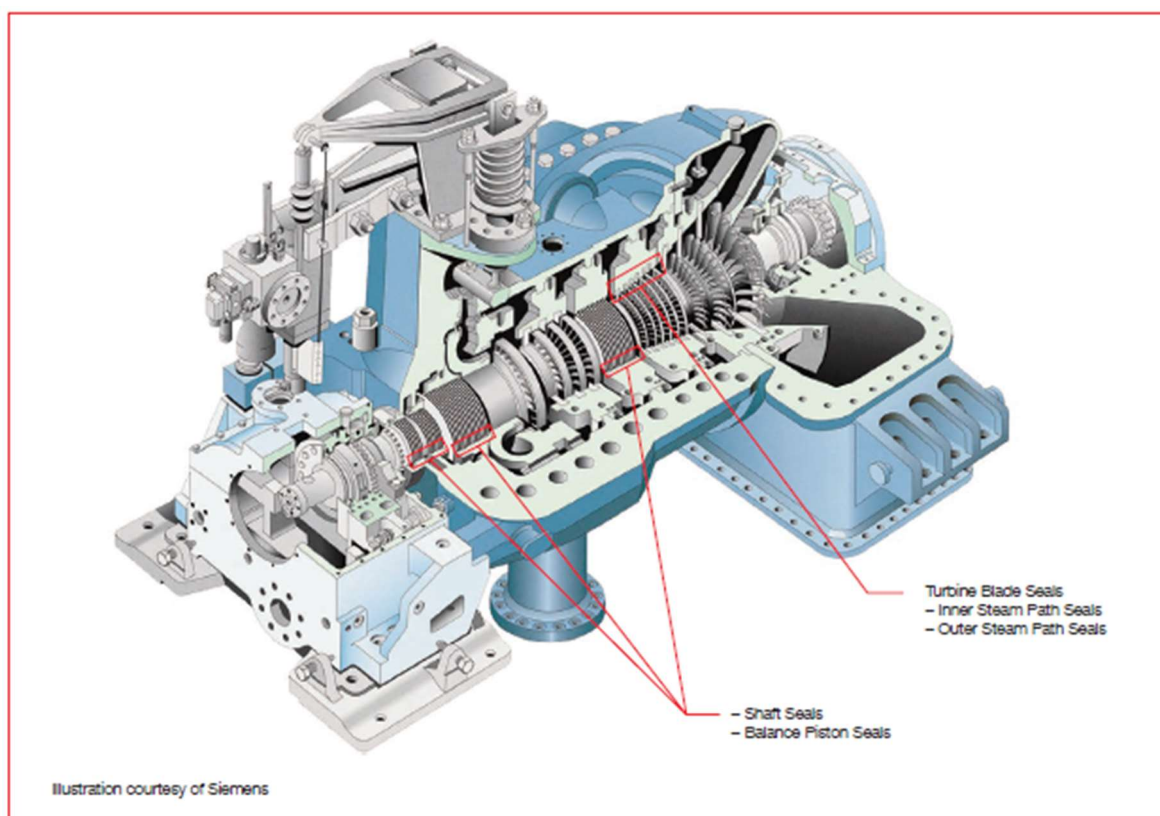


Ilustración 35 - elementos para la aplicación de recubrimiento abrasible

En las turbinas de vapor, los recubrimientos abrasibles deberían ser aplicados en los sellos del eje, en los sellos del pistón de equilibrio y en los sellos sobre los álabes tipo cerrados. La aplicación sobre todas estas áreas asegura una solución completa que maximizaría las ganancias de eficiencia mediante la reducción de los flujos de fuga a través de los laberintos.

3.6.1.1.4. Función de los recubrimientos abrasibles en los sellos de laberintos

El proceso de recubrimiento es muy flexible y puede ser aplicado al estator de un sistema de sello de laberinto de cualquier configuración. El espesor del recubrimiento puede ser adaptado para proporcionar holguras ideales entre las aletas rotativas y el componente estacionario.

Además, unas variedades de opciones de material están disponibles para diferentes aplicaciones de sello que pueden ser rociados consistentemente con propiedades de recubrimiento que minimicen o eliminen el daño del sello de la aleta en el caso de roce.

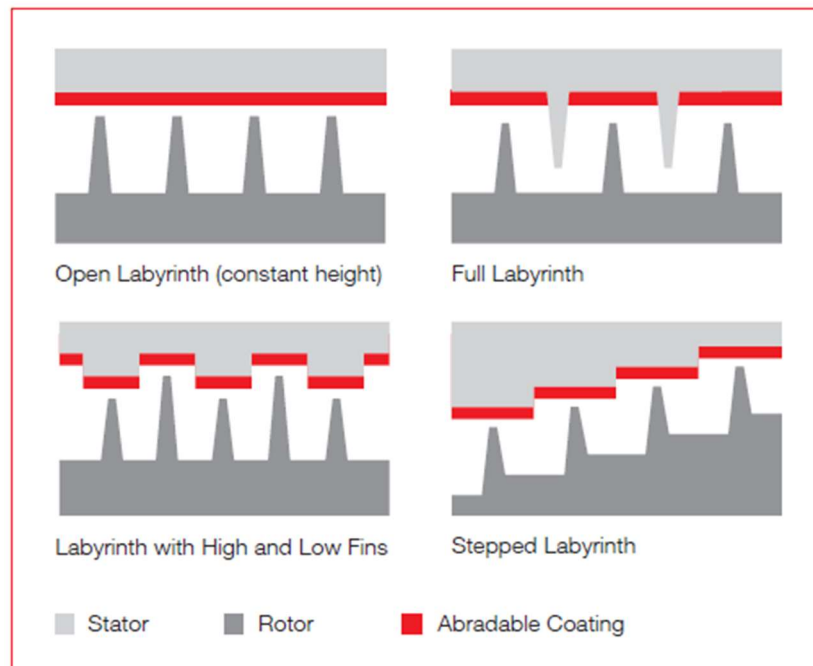


Ilustración 36 - Tipos de sellos de laberintos

3.6.1.1.5. Caso de roce en el sello de laberinto

La abrasividad ideal es esquemáticamente representada debajo para un hipotético sistema de sello de laberinto. Tras el desplazamiento, el rotor puede entrar en contacto con la carcasa y rozar contra ésta.

Sin un recubrimiento abrasible, como se muestra en el caso 1, las aletas del rotor son gastadas y reducidas en longitud, lo que da lugar a un aumento de la holgura δ_1 que es mucho más grande en tamaño que la holgura del diseño inicial δ_0 alrededor de toda la circunferencia.

Esto resulta en el deterioro de la eficiencia del sello de laberinto.

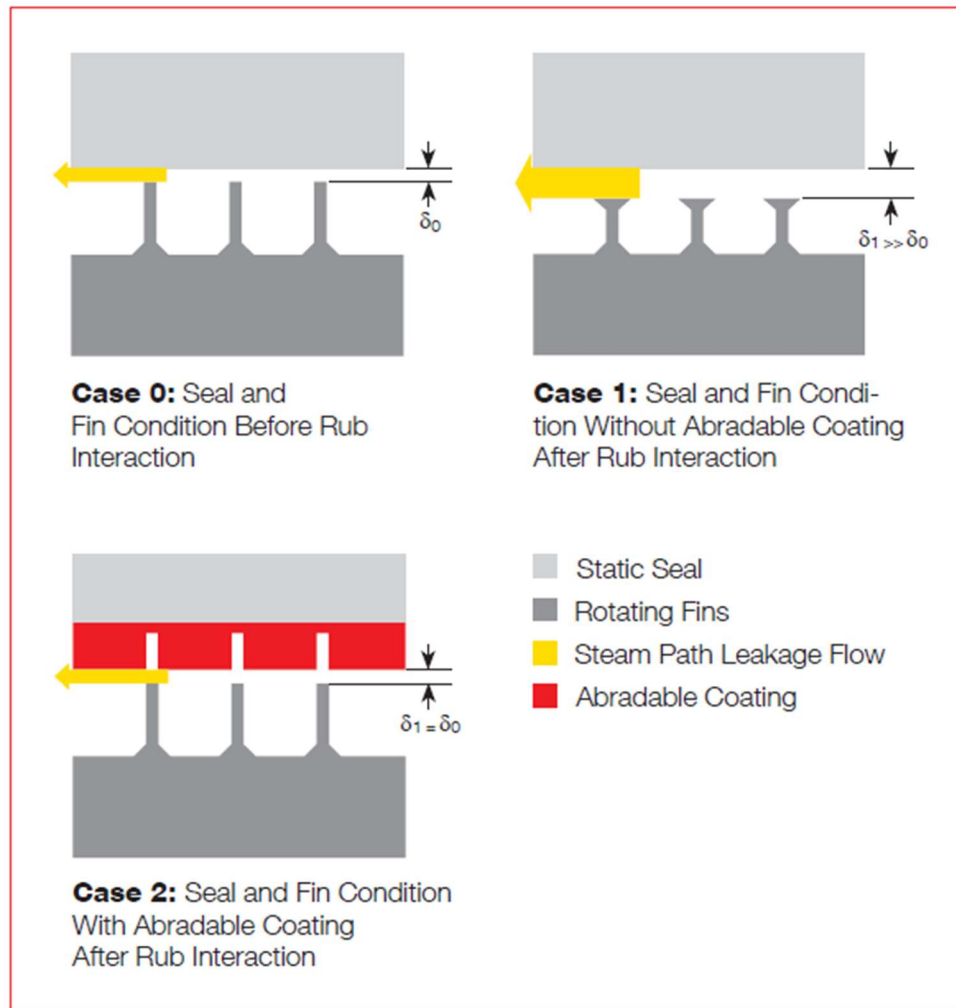


Ilustración 37 - Caso de roce en sello de laberinto

Cuando un recubrimiento abrasible ideal es utilizado, como se muestra en el caso 2, las aletas del rotor pueden cortar limpiamente en el estator sin ninguna reducción del diámetro del rotor o altura de la aleta. Al regresar a la posición inicial, la holgura de diseño δ_0 se mantiene alrededor de la circunferencia.

Ambos casos son escenarios extremos. En la práctica, por lo general se observan formas mixtas con algún sello y/o alguna aleta desgastadas. En general, la aleta se desgasta hasta un 5% de la superposición geométrica total del rotor y del estator, es decir, la profundidad de incursión, es aceptable.

3.6.1.1.1.6. Función del recubrimiento abrasible en los sellos del eje y pistón de equilibrio

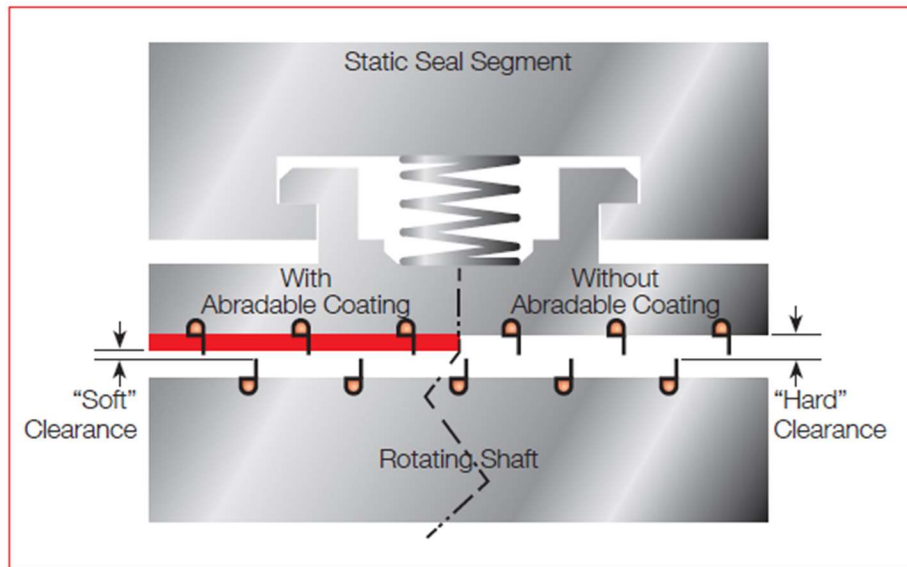
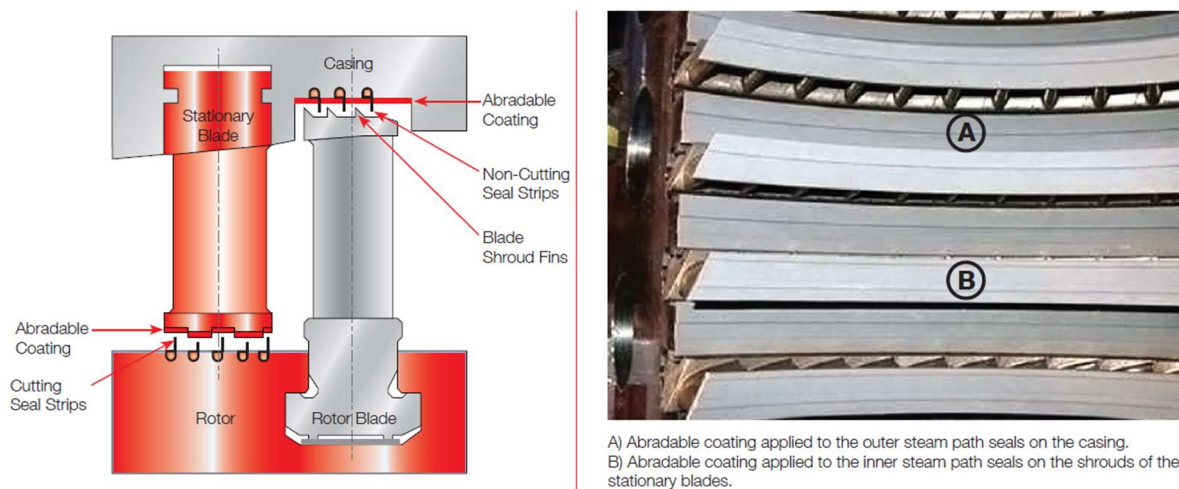


Ilustración 38 - Función del sello abrasible en sellos de eje y pistón de equilibrio

La aplicación de un recubrimiento abrasible a los segmentos de los sellos del eje y pistón de equilibrio reduce la holgura efectiva entre los miembros del sistema de sellado, creando así una "Soft Clearance" (holgura suave). Sin el recubrimiento abrasible, el efecto es un aumento de la holgura entre los componentes.

3.6.1.1.1.7. Función de los sellos abrasibles en rotor tipo cerrado y álabes estacionarios

Los recubrimientos abrasibles son también aplicados en los laberintos que sellan el paso del vapor sobre los alabes tipo cerrados. El revestimiento se aplica tanto a la carcasa de la turbina para proporcionar un sellado de los álabes del rotor y a las puntas cerradas de los álabes estacionarios para proporcionar un sellado contra el rotor.



A) Abradable coating applied to the outer steam path seals on the casing.
B) Abradable coating applied to the inner steam path seals on the shrouds of the stationary blades.

Ilustración 39 - Recubrimiento aplicado en carcasa y en álabes estacionarios

3.6.1.1.1.8. Tecnología de los materiales abrasibles

Los recubrimientos utilizados en las aplicaciones de sellado de las turbinas de vapor son depositados como un sistema de recubrimiento que consiste en una capa de enlace y una capa superior abrasible resistentes a la oxidación. Para que funcione de manera apropiada en un entorno de vapor de alta presión, ambos recubrimientos necesitan resistir la oxidación del vapor por periodos extendidos de tiempo.

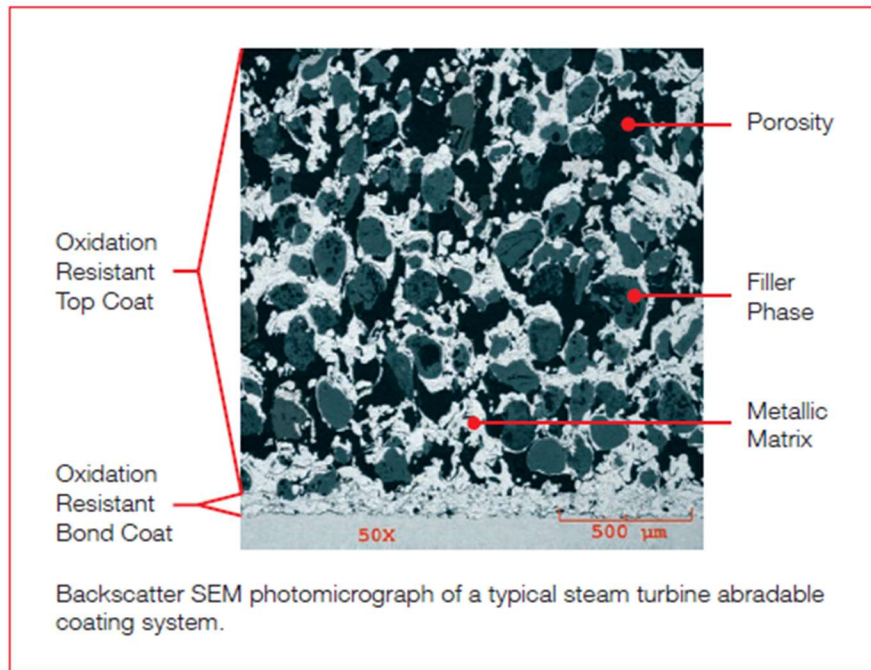


Ilustración 40 - Esquema del recubrimiento abrasible

Se han desarrollado una gran variedad de sistemas de recubrimiento que resisten bien la oxidación de vapor a la vez que mantienen su capacidad de ser cortados por los sellos de bandas y aletas. Las capas superiores y de enlace, así como soluciones de recubrimiento completo, han sido sometidos a extensas pruebas para su utilización en entornos de vapor.

La capa de enlace se elige cuidadosamente para minimizar el desajuste de la expansión térmica entre la capa superior abrasible y el material base al tiempo que mejora la resistencia de la unión del recubrimiento. También actúa como una capa de barrera resistente a la oxidación. Dentro de la capa superior abrasible, la fase de matriz metálica proporciona integridad estructural mientras que la fase de relleno mejora la abrasibilidad. Los niveles de porosidad controlada dentro de la capa superior también sirven para mejorar la abrasibilidad y pueden ser ajustadas por diferencias en la aplicación.

Los sistemas abrasibles están optimizados para adaptarse a una multitud de variables de roce que incluyen la temperatura de operación, la velocidad de rotación, el radio de incursión y el material con el que se rozará en contra el sistema abrasible.

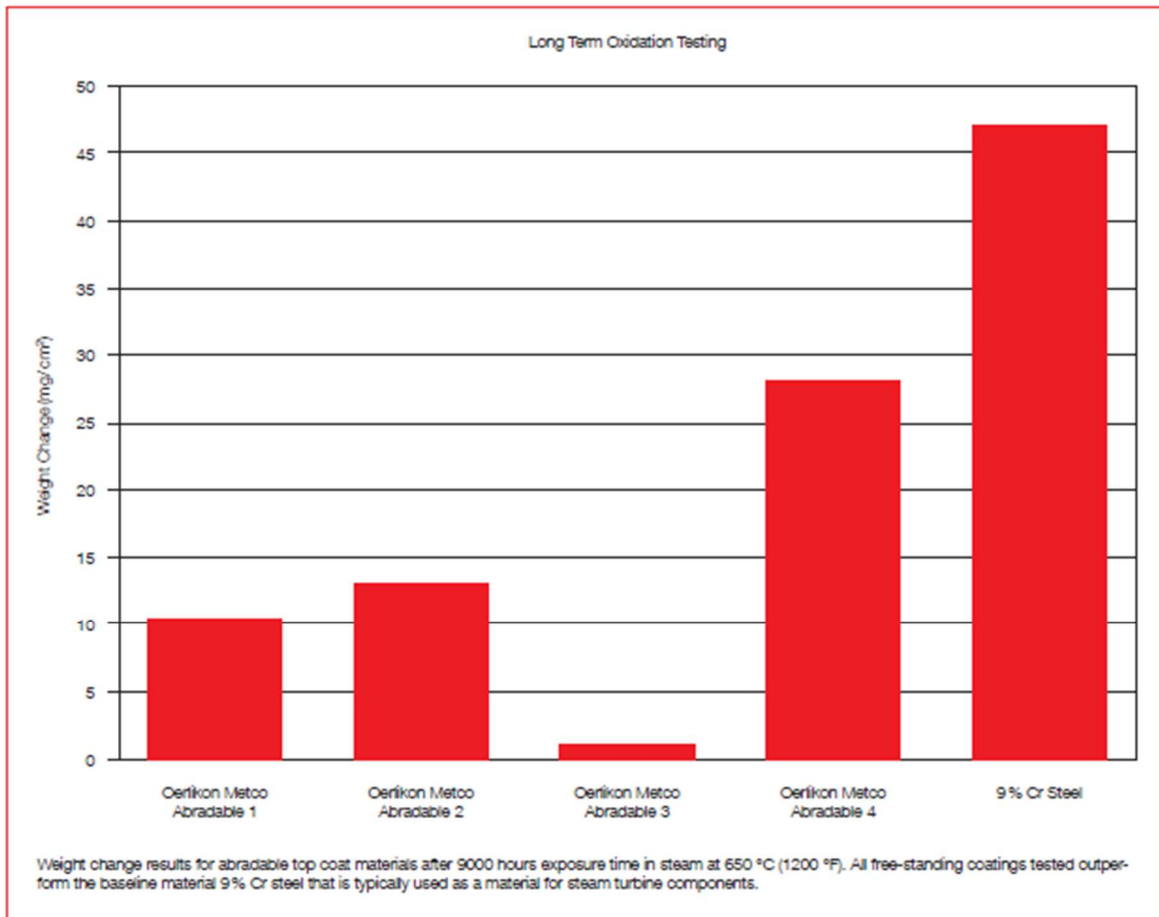


Ilustración 41 - Prueba de oxidación a largo plazo para diferentes materiales

3.6.1.1.1.9. Prueba de rendimiento

La incorporación de los recubrimientos de sellado abrasible en turbinas de vapor requiere un enfoque de diseño apropiado que debe ser apoyado por pruebas de rendimiento que validen el diseño del sello seleccionado. Las pruebas de rendimiento relevantes incluyen la erosión de partículas y las pruebas de abrasibilidad usando líneas de sello, aletas o bordes afilados de diferentes diseños y materiales. Hoy en día se han desarrollado capacidades de pruebas que se aproximan a las condiciones reales de operación para calificar a los sellos abrasibles para aplicaciones específicas.

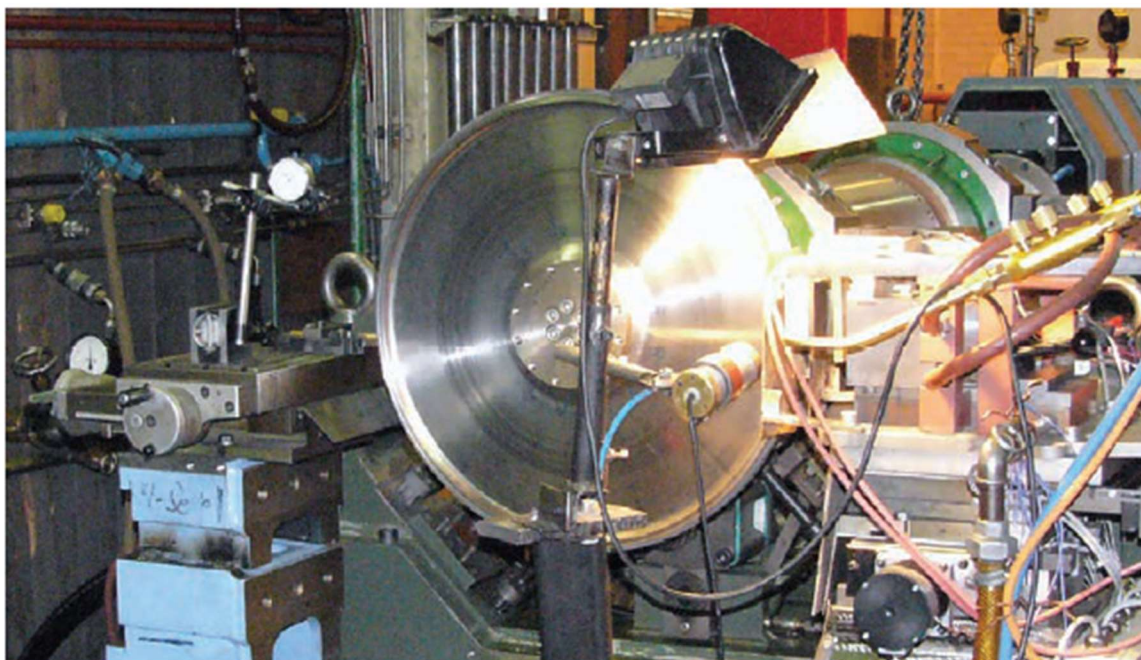


Ilustración 43 - Prueba de abrasibilidad



Ilustración 42 - Ejemplos de resultados post prueba de abrasibilidad

3.6.1.1.1.10. Flexibilidad del servicio de aplicación del recubrimiento abrasible

Algunas empresas ofrecen a sus clientes opciones para la implementación del recubrimiento. Éstas pueden proporcionar los materiales abrasibles, o una solución completa de instalación del recubrimiento que consta de los materiales abrasibles, el estado del arte de los sistemas de spray eficientes diseñados a medida para los componentes que

van a ser rociados, y la transferencia de la tecnología que incluye la formación y el apoyo para que los resultados del proceso sean óptimos y consistentes. Sin embargo, no todos los clientes desean una solución de este tipo. Por eso, las empresas también ofrecen servicios de aplicación del recubrimiento de manera experta a través de su red de centros en todo el mundo que pueden ser proporcionados tanto en el taller o in situ. Estos centros de servicios son bien respetados por su atención al detalle y la calidad de la producción.

3.6.1.1.1.11. Servicios de recubrimiento para componentes de gran tamaño

Para proporcionar un sellado sobre los álabes en un rotor de tipo cerrado, el sistema de recubrimiento abrasible debe ser rociado directamente sobre el diámetro interior de la carcasa. Los módulos de turbina con carcasas grandes y pesadas requieren instalaciones y procedimientos de configuración especiales para la aplicación de las capas de enlace y superior. Actualmente, las empresas de servicio han desarrollado habilidades sofisticadas para proporcionar revestimientos abrasibles en estos componentes de gran tamaño.

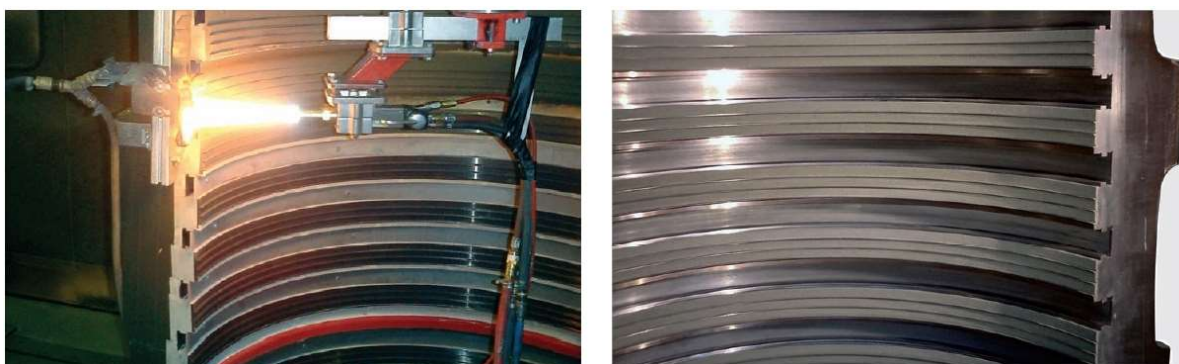


Ilustración 44 - Aplicación de un sistema de recubrimiento abrasible en la mitad superior de la carcasa dividida de una turbina de gran tamaño de alta presión

3.6.1.1.1.12. Aplicaciones de recubrimiento in situ

Para los componentes de la carcasa extremadamente grandes y/o pesados, o cuando se está haciendo una mantención, reparación u overhaul a unidades grandes de turbinas de vapor, el riesgo, el coste y el tiempo para el transporte de estos componentes para el procesamiento en un taller dedicado de recubrimiento puede ser inviable. En estas situaciones, las empresas ofrecen un equipo de operadores e ingenieros cualificados para proporcionar una aplicación in situ de los sistemas de recubrimiento abrasible. Por otra parte, existen empresas altamente experimentadas en la apropiada proyección y planificación de los procesos, además de la coordinación con equipos de mantención en el sitio de la turbina para asegurar un procedimiento in situ de manera eficiente y segura.

Preparación antes de la aplicación in situ.

- Selección de material para el sistema de sellado (Capa de enlace y superior).

- Diseño del sellado y pruebas de rendimiento del diseño seleccionado.
- Demostración de la capacidad de rociado y cualificación del proceso usando el equipo que será utilizado in situ.
- Proveer el plan de trabajo (Manufacturing Process Plan, MPP).
- Proporcionar el plan de calidad.

Aplicación in situ:

- Preparación de la superficie para proporcionar la unión óptima de revestimiento.
- El proceso de rociado de los sistemas de revestimiento abrasible.
- Medición y documentación del espesor del recubrimiento.
- Evaluación de la calidad superficial del revestimiento y su aspecto visual.
- Rociado simultáneo en muestras representativas de los recubrimientos aplicados en las múltiples etapas. Estas muestras serán usadas para la evaluación de laboratorio posteriores según lo acordado en el plan de calidad, tales como:
 - o Macro dureza del recubrimiento.
 - o Estructura del recubrimiento (contenido metálico, porosidad).
 - o Resistencia a la erosión del recubrimiento.
 - o Registro histórico de la calidad de las muestras de control.

Las pruebas adicionales de la calidad del recubrimiento, tales como resistencia a la tracción y/o abrasibilidad de las muestras se pueden realizar si es necesario, dependiendo de la empresa.



Ilustración 45 - Preparación previa a la aplicación del recubrimiento



Ilustración 46 - Rociado del recubrimiento abrasible a turbina de vapor de 900MW

3.6.1.1.1.13. Beneficios del uso del recubrimiento abrasible

Amigable con el medio ambiente

- Reduce significativamente las emisiones de CO₂ de la turbina y, en algunos casos, las emisiones de SO₂.

Efectiva

- Los sistemas de recubrimiento abrasible son tecnologías probadas que reducen efectivamente las holguras, y mantienen la eficiencia entre overhauls, incluso después de eventos de roce.
- Las capas de enlace y superior del sistema de recubrimiento abrasible son resistentes a la oxidación y diseñados para soportar el entorno en las vías de vapor.
- Una gran variedad de materiales combinados con parámetros de recubrimiento flexibles y reproducibles, permiten el diseño de un sistema de revestimiento con abrasibilidad optimizada que cumple con los requisitos operativos específicos.
- El estado del arte de la tecnología de los materiales para el revestimiento se traduce en un desgaste muy mínimo en los sellos durante los eventos de roce y mantiene las holguras de diseño en las vías de vapor.

Eficiente

- Puede aumentar la producción total de energía de la turbina de vapor de 0.5% a 1% cuando se utiliza en todas las áreas aplicables de la turbina.
- Los clientes tienen la opción de comprar el equipo y los materiales para el recubrimiento para aplicar los sistemas abrasibles en el lugar, o contratar los servicios de recubrimiento.

Económico

- Proceso económico con un rápido retorno de la inversión
- El desgaste mínimo del sello puede prolongar la vida útil de los sellos de la turbina.
- Los servicios de recubrimiento in situ reducen los costos, ahorra tiempo y elimina el riesgo asociado con el transporte de componentes grandes y pesados.

3.6.1.2. Empaquetadura retráctil

Dos casos importantes ocurren que causan daño de sellos en las turbinas: la deformación y vibración. Debido a los gradientes térmicos durante el arranque las capas internas de la turbina, los diafragmas, los anillos de los alabes, y las empaquetaduras se deforman y se vuelven excéntricos. Esta deformación implica que los componentes estacionarios de la mitad inferior se muevan para arriba hacia el rotor. Durante la puesta en marcha y parada, el rotor de la turbina es susceptible a la vibración a medida que es llevado a través de sus velocidades críticas. A pesar de que la vibración del último cojinete puede que no sea excesiva, el tramo central más crítico está sujeto a una gran deflexión. Esta vibración, en conjunción con la deformación térmica de los componentes estacionarios, resulta en holguras reducidas, interferencia, y roces en la empaquetadura. La fricción resultante del roce en la empaquetadura causa calentamientos localizados del rotor, lo que crea un arqueado temporal. Debido a que el rotor y partes estacionarias ya están en una condición de interferencia, este arqueamiento del rotor debido al roce exagera la fricción en la empaquetadura [7].

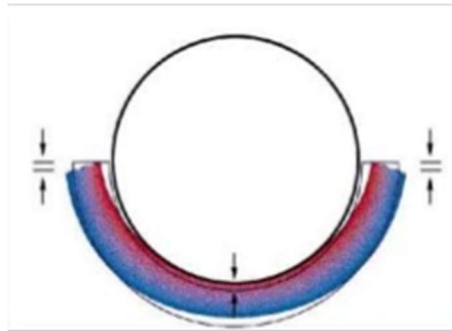


Ilustración 47 - Deformación debido al gradiente térmico

Cuando se produce un roce en la empaquetadura, la empaquetadura convencional (resorte en la parte posterior) puede, en una medida limitada, moverse con el eje. La punta de los alabes rotatorios, los cuales están adjuntos al rotor arqueado, interfieren con los sellos estacionarios, los cuales son rígidos, y, por tanto, pueden recibir un daño importante debido a roces en la empaquetadura. Tan importante como el arqueamiento temporal del rotor inducido por el roce, es el hecho de que la mayoría de los componentes principales estacionarios de la turbina se van deformando permanentemente a medida que envejecen. Esta deformación permanente se agravaba en gran medida por la deformación térmica transitoria relacionada con la puesta en marcha.

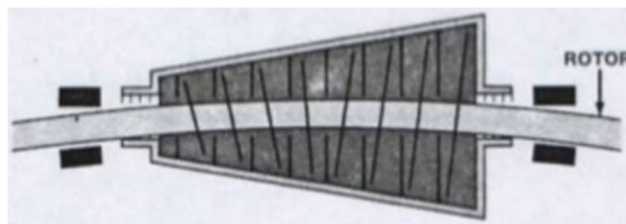


Ilustración 48 - Arqueamiento del rotor (rotor bowing)

3.6.1.2.1. Efectos de la deformación

A medida que las turbinas de vapor envejecen, el efecto de las variaciones térmicas cíclicas se observa frecuentemente como deformación de las piezas internas. Estas variaciones térmicas que causan deformación son más frecuentes durante las condiciones operativas transitorias, tales como la puesta en marcha o parada de la turbina. La deformación resultante o condición de falta de redondez es una de las principales causas de las fugas internas excesivas y una consiguiente pérdida de la eficiencia. Es, por lo tanto, prudente durante una parada medir y registrar diámetros internos importantes con el fin de determinar la cantidad de deformación presente y el efecto que tiene sobre la eficiencia de la turbina. Las medidas de deformación también identifican las desviaciones no documentadas del equipo tanto en el rotor y componentes estacionarios como también cambios de diseño no identificados previamente. Esta investigación también proporciona una oportunidad para actualizar permanentemente el historial de las partes internas de la turbina. Las mediciones registradas en la parada normalmente deben constar de los siguientes elementos:

- Diámetros críticos del rotor.
- Diámetros internos de la carcasa en los sellos.
- Diámetros internos en el diafragma y anillo de álabes.
- Diámetros mínimos en las puntas de los sellos.

3.6.1.2.2. Mejora de los componentes

Durante los últimos años muchos componentes de la turbina de vapor han visto mejoras en sus materiales y diseño. Una de las áreas donde los componentes recientemente mejorados han sido especialmente efectivos es en la empaquetadura del eje y sellos de resorte posterior, un área crítica de las pérdidas por fuga y eficiencia en la turbina de vapor. La empaquetadura retráctil ha demostrado ser extremadamente eficaz en la reducción de roces y fugas en el eje.

La fuga interna en las vías de vapor de la turbina puede considerarse hasta el 70% de las pérdidas que afectan a la eficiencia de la turbina. El desgaste de la empaquetadura del eje es un gran contribuyente a la pérdida de la eficiencia, así como a los problemas de operación. Es normal encontrar que la fuga excesiva causada por el desgaste en la empaquetadura y sellos supere la combinación de todas las pérdidas, sobre todo en las secciones más sensibles de la turbina tales como los sellos del eje entre etapas. Además del impacto directo de las fugas del sello en el rendimiento de la unidad, varias otras áreas de funcionamiento de la turbina se ven afectadas. Algunas de estas áreas son:

- Una indicación falsa de alta eficiencia en la sección de presión intermedia en turbinas de flujos cruzados.
- Disminución de la presión en la carcasa de la primera etapa.
- Cantidad excesiva de flujo en la turbina con la consiguiente degradación del rendimiento de la sección de alta presión.
- Altas temperaturas de extracción.
- Exceso de calor en el condensador.

Los diseñadores de turbinas han intentado reducir las fugas en el eje mediante la instalación de sellos con reducidos coeficientes de flujo que traten de mantener una holgura estrecha entre el eje y los componentes estacionarios de la turbina. Debido a la deformación del componente y a la dinámica del rotor, manteniendo una holgura pequeña sin incurrir en daños a los sellos ha sido un problema constante con la operación de la turbina. Un problema que parecía no tener solución práctica, hasta hace poco tiempo.

Históricamente, los fabricantes de turbinas han diseñado segmentos de empaquetadura con resortes en la parte posterior cuyo propósito era forzar la empaquetadura para aproximarla al rotor hacia una configuración de mínima holgura. Estos resortes permitirían a los segmentos de empaquetadura a ser empujados lejos del eje en el caso de un roce. Este diseño permite que el resorte absorba parte de la energía del roce. Sin embargo, esto no resuelve el problema de rozamiento, sólo se “suaviza el golpe”, por así decirlo. El rozamiento aún da lugar a un calentamiento por fricción y a una curvatura localizada del rotor, la cual agrava el problema de rozamiento, y conduce a más daños en las puntas de los sellos.



Ilustración 49 - Sellos convencionales

Lógicamente, si las holguras en la empaquetadura pudieran abrirse durante los periodos de puesta en marcha y parada (donde se produce la deformación térmica y velocidad crítica del rotor) y luego cerrarse durante la operación normal de carga, podrían evitarse los roces de empaquetaduras más graves. El arqueamiento del rotor producto de la fricción, y los daños a la empaquetadura y extremos de los sellos podrían minimizarse y la fuga reducirse. Muchos problemas del arranque serían eliminados, y se podría mantener una alta eficiencia de la turbina. Este objetivo se ha conseguido mediante el diseño avanzado de empaquetadura retráctil descritas a continuación.

El uso del diseño de empaquetadura retráctil para lograr el objetivo de grandes holguras al arranque y parada con la consiguiente reducción de las holguras a cargas de operación ha minimizado las pérdidas por fugas en los extremos de los sellos y empaquetadura encontradas en la mayoría de las turbinas en operación. Además, mediante la eliminación del arqueamiento del rotor producto del roce, los tiempos de arranque también han sido reducidos. La empaquetadura retráctil ha sido instalada en muchas unidades industriales. Las pruebas de rendimiento en línea, así como la inspección de las unidades operativas han demostrado el éxito del diseño.

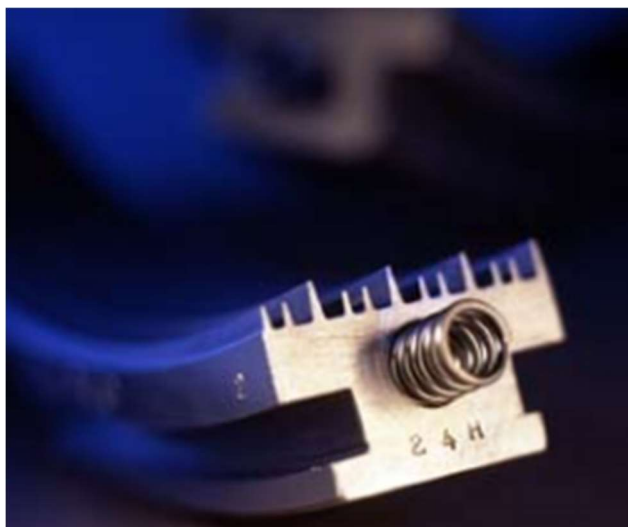


Ilustración 50 - Parte de una empaquetadura retráctil de sello helicoidal

La empaquetadura avanzada funciona de una manera contraria a la empaquetadura convencional, en la empaquetadura convencional el resorte fuerza a la empaquetadura hacia el eje de la turbina, y a medida que la carga de la turbina aumenta, la presión del vapor se suma a la fuerza del resorte en la parte posterior de la empaquetadura. En la empaquetadura retráctil, los resortes fuerzan a la empaquetadura fuera del eje, y a medida que la carga de la turbina aumenta, la presión del vapor en la parte posterior de la empaquetadura supera las fuerzas del resorte a una carga predeterminada, lo que resulta en pequeñas holguras operativas.

El concepto básico que se utiliza en la empaquetadura mejorada es que la presión en la parte posterior del anillo es mayor que la presión en el lado dentado del anillo. Este diferencial de presión aumenta con la estrangulación del flujo y se puede utilizar para superar las fuerzas del resorte y fricción que actúan sobre los segmentos individuales de la empaquetadura. Gracias a la ingeniería adecuada de los resortes helicoidales entre los segmentos de la empaquetadura, las fuerzas de presión que actúan sobre la empaquetadura se pueden utilizar para que ésta se mueva desde una holgura grande a una holgura pequeña, en una condición de flujo predeterminada que es conocida por estar más allá de la condición donde el roce significativo es probable que ocurra. Debido a este control sobre las características del roce, la empaquetadura puede ser típicamente instalada con menos holguras que el diseño original. Con la reducción inicial de holguras entre la empaquetadura y el eje, la turbina puede lograr una mayor eficiencia, y con la

disminución de los daños causados por los roces de empaquetadura, esta eficiencia puede ser mantenida durante todo el ciclo operativo de la unidad.

No es necesario ninguna modificación en la turbina para instalar la empaquetadura mejorada en turbinas de alta presión y presión intermedia. Esto permite la instalación de la empaquetadura mejorada para ser tratada como una sustitución de una pieza estándar en lugar de una modificación. El diseño estándar de los segmentos de la empaquetadura de la turbina se muestra en la ilustración 51, empaquetadura convencional con los resortes insertados. En la empaquetadura retráctil, el cambio de diseño más importante es eliminar los resortes que fuerzan al anillo de la empaquetadura hacia el eje e instalar resortes helicoidales que fuerzan a los anillos de la empaquetadura fuera del eje, ilustración 52, empaquetadura retráctil. La geometría de los resortes, las constantes, y las profundidades del agujero son determinadas en base a las presiones operativas de la unidad esperados en cada lugar específico. La empaquetadura revisada es un reemplazo directo de la

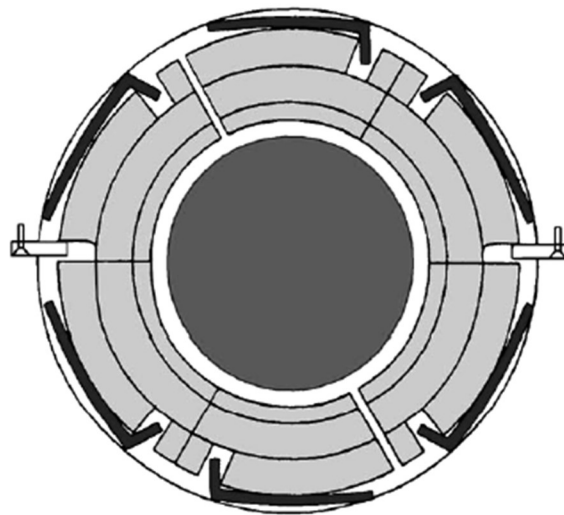


Ilustración 51 - Empaquetadura de resorte convencional

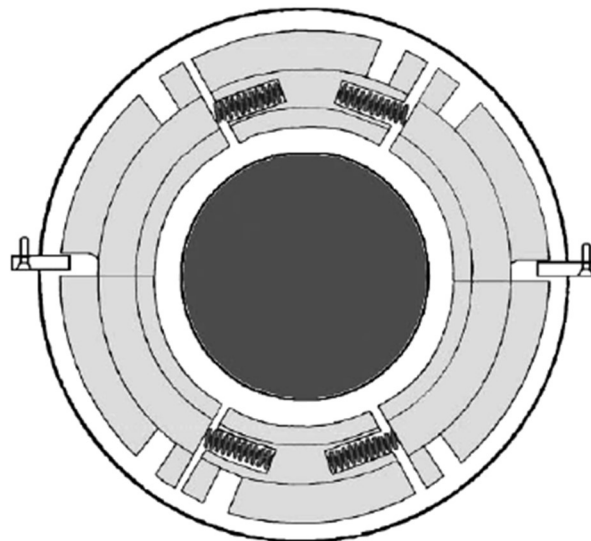


Ilustración 52 - Empaquetadura retráctil de resortes helicoidales

empaquetadura estándar, ya que los cambios de diseño son realizados sólo para la empaquetadura.

3.6.1.2.3. Factores de rendimiento

Una variedad de beneficios medibles y no medibles resultan al mejorar la empaquetadura. Estos incluyen los siguientes:

- Reducción de la vibración al arranque, y arranques más rápidos.
- Disminución de fugas en la empaquetadura del eje.
- Disminución de fuga en las puntas de los álabes.
- Reducción de la presión de la carcasa en la primera etapa, y consiguiente aumento efectivo de la eficiencia en la etapa de control.
- Reducción del exceso de la cantidad de flujo en la turbina.
- Significativamente mayor vida útil de la empaquetadura.
- Significativamente mayor vida útil en los extremos de los sellos.
- Reducción de emisiones de la caldera.
- Reducción de los costos de manejo de combustible.
- Reducción de los costos de manejo de residuos.
- Reducción de la incertidumbre en la eficiencia deducida en la sección de baja presión.

La disminución de fugas en la empaquetadura del eje ahora posible gracias a las holguras más pequeñas y la disminución de la posibilidad de daños relacionados con la deformación crearán una mejora directa en la eficiencia sobre la sección de la turbina.

La disminución de la fuga en el extremo será el resultado de la desaparición del arqueamiento del rotor (normalmente causado por el roce en la empaquetadura) que resultan en extremos de sellos dañados. De estos ahorros indirectos se puede esperar que superen incluso los beneficios directos de las holguras mejoradas en la empaquetadura del diafragma.

Es común encontrar la presión de carcasa de la primera etapa sea menor que la del diseño en 5-10%. Esto tiene el efecto de tomar la energía de las etapas posteriores de alta presión relativamente eficientes y poner más energía en la primera etapa (la etapa menos eficiente). La energía agregada disminuye la eficiencia ya baja de la primera etapa incluso más. Esta nueva empaquetadura puede mejorar la presión de la carcasa de la primera etapa, acercándola a los valores de diseño.

Las fugas excesivas tienen un efecto secundario de aumentar la cantidad de flujo en la turbina. Si bien esto puede tener algunos beneficios secundarios, también provoca efectos negativos de eficiencia en todo el rango de carga requiriendo un aumento de estrangulación de las válvulas de control en cargas normales. Esto hace que la eficiencia sea significativamente más pobre. Hay que tener en cuenta si se necesita un exceso de cantidad de flujo, éste todavía puede estar disponible a través del aumento de la presión inicial, un 5% sobre la presión que es comúnmente aceptable en la mayoría de las turbinas.

Los resultados informados de mejorar a empaquetadura retráctil varían y se ven afectados por una serie de condiciones importantes. Estos incluyen, pero no están limitados a los siguientes elementos:

- Alineación de las partes internas de la turbina.
- Reparación del espesor, áreas, acabados y contornos del borde de las particiones del diafragma.
- Deformación de los componentes estacionarios.
- Ubicación y calidad de la instrumentación.
- Condiciones de los álabes y vías de vapor.
- Interpretación de los resultados.
- El grado en que la empaquetadura de la turbina se ha friccionado antes de la instalación de la empaquetadura retráctil.

Se reconoce que otras mejoras en las vías de vapor para corregir las pérdidas asociadas con la erosión, daños mecánicos, y depósitos contribuyen a aumentar la eficiencia. Sin embargo, en general, la mejora típica desde la utilización de la empaquetadura avanzada sola ha sido entre 1-2% en el “heat rate” y entre 2-3% en kW de salida.

3.6.1.3. Sello de cepillo retráctil

Si bien la empaquetadura retráctil es una tecnología exitosa por sí sola, también tiene algunas limitaciones. El producto está diseñado para proporcionar protección al roce en la empaquetadura durante la puesta en marcha, en el que es muy exitoso. Las fuerzas que actúan para cerrar los anillos de la empaquetadura están también en efecto cuando la máquina está a plena carga. A plena carga, esa fuerza neta actúa para empujar el anillo hacia el rotor puede ser superior a varios miles de libras para un anillo, prácticamente haciendo al anillo inmóvil. Cualquier contacto con el rotor en condiciones de plena carga resultará en graves daños a los dientes del sello. Además, el efecto de desequilibrio de masa residual todavía creará algún desplazamiento en un componente del rotor cuando se opera con carga. Y mientras la holgura de la empaquetadura puede ser reducida por debajo

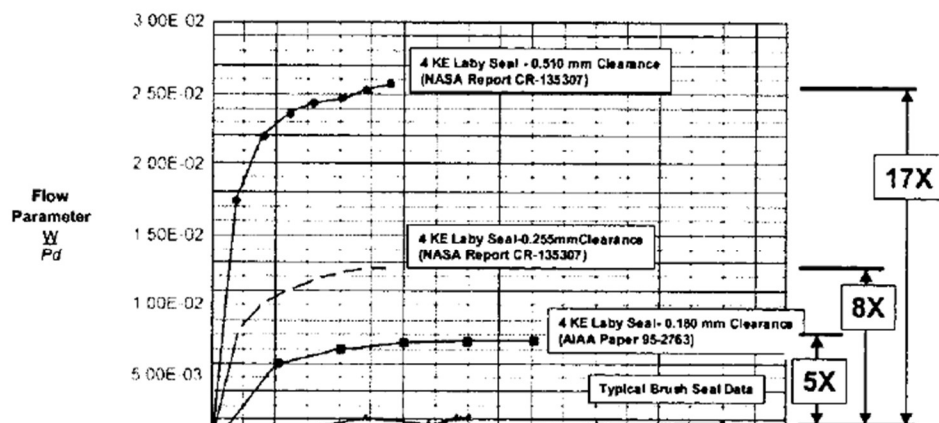


Ilustración 53 - Los sellos de cepillo son capaces de reducir drásticamente las fugas en comparación a los sellos de laberinto de borde afilado convencionales

de la del diseño original, en algunos casos, las tolerancias de alineación y niveles de vibración suponen una limitación práctica en la reducción de la holgura [8].

Los sellos de cepillo de etapa simple han sido utilizados con éxito como sellos de gas alternativos por un montón de años en los motores de aviones y pueden ofrecer tanto como una reducción de 17 veces en la fuga del flujo en comparación con un sello de borde afilado de 4 dientes de 0.51[mm] de holgura mostrado en la ilustración 53. La utilización de esta tecnología en turbinas terrestres mediante la combinación de los sellos de laberintos de borde afilado convencionales con los sellos de cepillos ofrece muchas ventajas importantes, mientras se mantiene los sellos de laberinto como un respaldo. Estas ventajas incluyen:

- Mejora en el control de fugas a través de la preservación de holguras muy pequeñas en comparación a los sellos de laberinto de borde afilado.
- Mejora en las características operativas de la turbina y confiabilidad debido al cumplimiento del sello de cepillo.
- Mejora el rendimiento sostenido, como resultado de la extensión de la vida útil del sello.

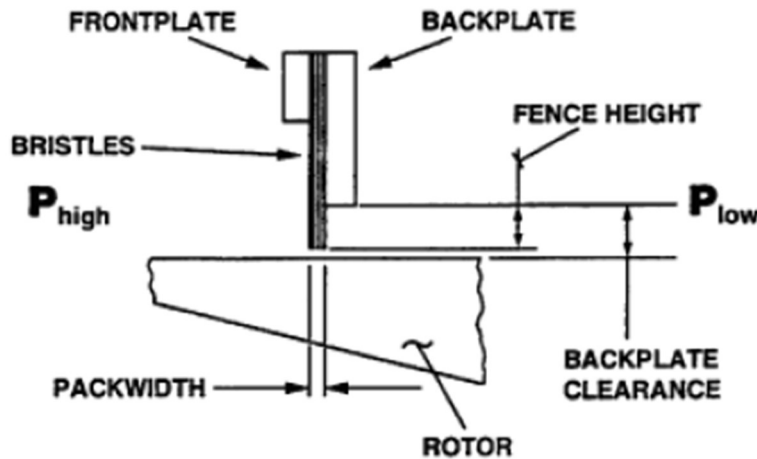


Ilustración 54 - Sección a través de sello de cepillo típico

Una sección transversal de un típico sello de cepillo con la nomenclatura correspondiente se muestra en la ilustración 54. Como se puede ver en la vista lateral de la ilustración 55, las cerdas están inclinadas en un ángulo, a lo largo de la circunferencia del sello, en la dirección de la rotación del eje. Esto permite que el paquete de cepillo se mueva radialmente para mantenerse ajustado transitoriamente en el rotor, y se conoce como cumplimiento. La combinación del diámetro del alambre y el material proporcionan un balance óptimo entre resistencia al desgaste, flexibilidad para el cumplimiento, y control de fugas.

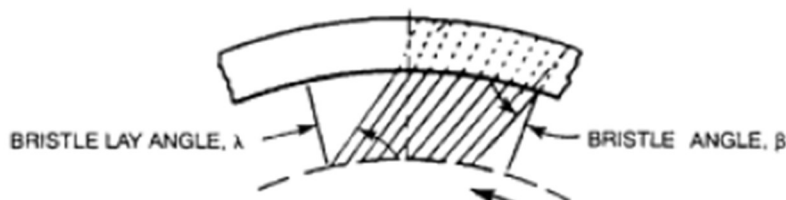


Ilustración 55 - Vista lateral del sello de cepillo

La placa frontal y placa trasera se fabrican típicamente de acero inoxidable de las series 300 a 400. La placa posterior proporciona soporte para el paquete de cerdas en la dirección axial. Y la placa frontal se utiliza para controlar la rigidez radial del sello en relación con el ángulo de inclinación de la cerda. La holgura de la placa posterior es la distancia radial entre el diámetro interior de la placa trasera y el rotor. Esta holgura se elige para evitar el contacto de la placa trasera con el rotor durante las operaciones transitorias. La altura de vaya es la distancia radial entre el diámetro interior de la placa trasera y el conjunto de cerdas. La altura de vaya se elige para minimizar la fuga del flujo. Y prevenir que la cerda se derribe debido a un alto diferencial de presión a través del sello. Si la altura de la vaya fuera demasiado grande, entonces un diferencial de alta presión a través del sello podría causar que las cerdas se derriben hacia abajo, y pondría en peligro el control de fugas.

Cabe señalar que, si un sello se utiliza fuera de su diferencial de presión de diseño, no debe fallar. El fenómeno de derribo simplemente da lugar a una reducción temporal en la efectividad de sellado. La integridad del sellado completo será re-establecido una vez que el diferencial de presión se reduzca por debajo del límite de diseño. En el caso de diferenciales de baja presión, no se necesita una altura de la vaya pequeña para el control de fugas, y por lo tanto una mayor altura puede ser utilizada para mantener la placa más lejos del rotor.

Como se muestra previamente por datos de rendimiento publicados anteriormente (ilustración 53), los sellos de cepillo proporcionan una reducción significativa en el flujo en relación a los sellos de laberinto de borde afilado convencionales. Además de los datos de rendimiento disponibles, el fabricante lleva a cabo sus propias pruebas como parte del proceso de validación del diseño. Una parte de los resultados se muestran en la ilustración 56; que muestra una comparación grafica del control de fugas entre un sello de cepillo típico y un sello de laberinto de 7 bordes afilados (knife-edge, KE).

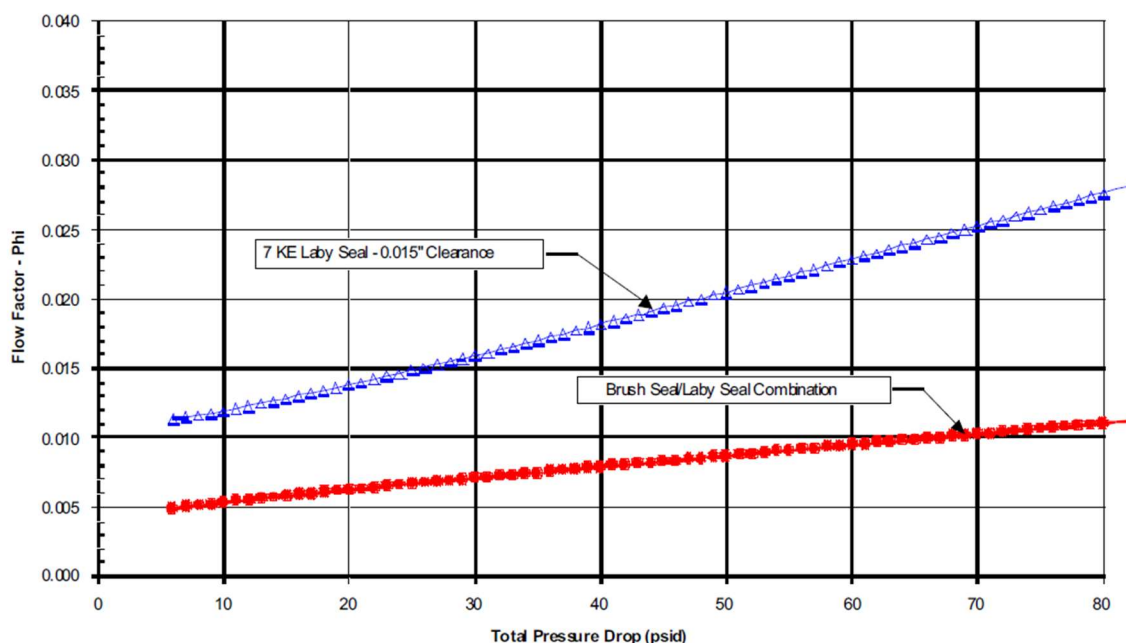


Ilustración 56 - Comparación de flujo a 0.015 pulgadas de holgura entre un sello laberinto de 7 bordes afilados y una combinación de sello cepillo - sello laberinto

El factor de flujo (Phi) en la ilustración 56 es directamente proporcional a la fuga de flujo y se define por la ecuación (1):

$$(1) \quad \Phi = \frac{[m \cdot (T_{avg})^{\frac{1}{2}}]}{P_u \cdot D_i}$$

Donde:

m = Tasa de fuga del flujo de aire, [lbm/s]

T_{avg} = Temperatura promedio del aire ascendente, [°F]

P_u = Presión del aire ascendente, [psia]

D_i = Diámetro externo del sello del rotor, [pulg]

Como puede verse en la ilustración 56, la combinación de sello de cepillo - sello laberinto ofrece una reducción de 60% en fugas sobre el convencional sello de laberinto de borde afilado.

3.6.1.3.1. Consideraciones en la aplicación de los sellos de cepillo

La tecnología de sellado avanzado para turbinas de vapor de accionamiento mecánico debe tener en cuenta las consideraciones de diseño de manera que las características de operación de la turbina no se vean afectados de manera adversa. El objetivo del diseñador es hacer uso de estas tecnologías para mejorar el rendimiento de la turbina sin comprometer la confiabilidad de la unidad y las características de operación. Como se mencionó anteriormente, uno de los principales atributos del sello de cepillo es su cumplimiento, que permite que se mueva radialmente para acomodarse transitoriamente en el rotor. Su capacidad para mantener una reducción de fugas significativa es una función de su resistencia al desgaste durante el funcionamiento transitorio. La magnitud y la tasa de desgaste de las cerdas están influenciadas por un número de factores incluyendo, pero no limitados a, el acabado superficial del rotor, la velocidad superficial, la magnitud de la interferencia radial, y la longitud del tiempo de funcionamiento con interferencia. La resistencia al desgaste del sello de cepillo es determinada por dos características de diseño importantes:

- Selección del alambre de las cerdas y,
- Rigidez de las cerdas.

Estos criterios se evalúan y se eligen con el fin de obtener un equilibrio favorable entre la eficacia del sellado y la resistencia al desgaste. La rigidez del sello debe ser elegido de tal manera que se mantenga la reducción de las fugas al mismo tiempo que se optimiza la vida útil del componente.

La ilustración 57 muestra la relación entre el desgaste y el tiempo del sello de cepillo como una función de la rigidez del sello. En el gráfico, A es el valor más bajo de rigidez y D es el más alto. En términos generales, el desgaste de las cerdas aumenta con la rigidez del sello.

Las pruebas del fabricante han demostrado los efectos de la ejecución de los sellos de cepillo con diversos grados de interferencia y rigidez como una función del tiempo. Para un típico diseño de sello de cepillo, un desplazamiento radial del eje radial de 0,010 pulgadas para un tiempo de funcionamiento continuo de 60 minutos dio como resultado sólo 2 a 3 milésimas de desgaste en las cerdas. El número y la gravedad de los ciclos radiales transitorios del rotor, junto con las condiciones operativas, determinan la esperanza de vida de un diseño de cepillo particular.

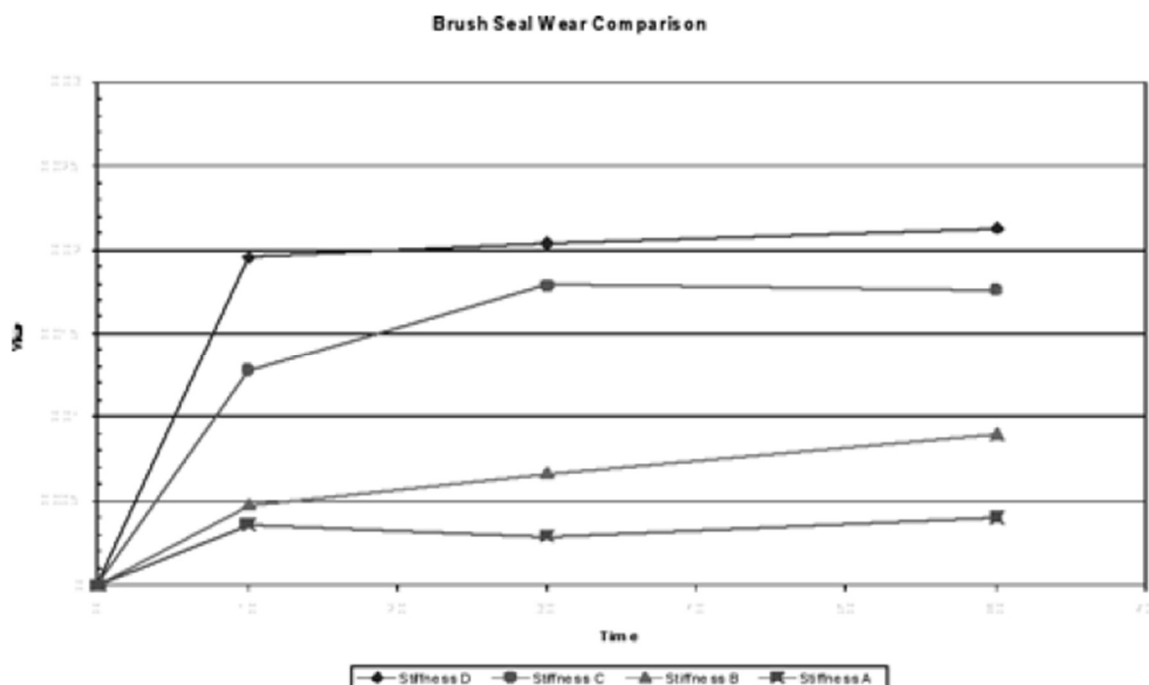


Ilustración 57 - Desgaste del sello de cepillo para diferentes valores de rigidez

La geometría de la sección transversal del sello de cepillo también debe estar diseñada para adaptarse a las existentes geometrías de los sellos de laberinto y eje de la turbina, como se muestra en la ilustración 58. En el caso de los dientes de los laberintos de tipo

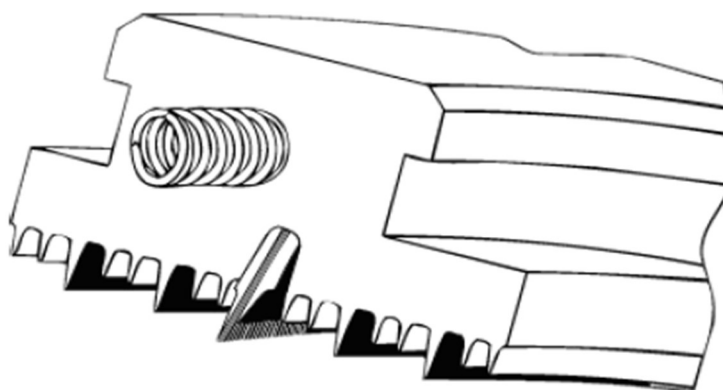


Ilustración 58 - Geometría de un sello de cepillo retráctil

escalonados con los correspondientes surcos en el eje, las consideraciones axiales de la holgura deben ser tomadas en cuenta cuando se aplican la tecnología de los sellos de cepillo.

La utilización de sellos de cepillo retráctiles, donde un sello de cepillo es utilizado en conjunto con empaquetadura retráctil, reduce el desgaste innecesario en la brocha evitando el contacto o interferencia con el eje durante el arranque de la turbina. Esto es especialmente importante con respecto a la dinámica del rotor. El hecho de que un sello de cepillo es diseñado para funcionar a cero holguras con respecto al rotor debe tenerse en cuenta en el proceso de diseño. El desgaste en el sello de cepillo durante el funcionamiento transitorio del arranque debe evitarse a fin de mantener el control de fugas óptimo y un mejor rendimiento en la turbina.

La aplicación de los sellos en los extremos de los álabes o en los anillos para evitar fugas en el eje (spill strips) también requieren ciertas consideraciones de diseño. La geometría del diseño del sello en los extremos debe ser capaz de encajar en los componentes existentes de la turbina con modificaciones mínimas. Holguras axiales y radiales deben ser consideradas cuidadosamente de modo que el roce en los extremos no incurra debido a los efectos de la dinámica del rotor o la expansión (debida a la diferencia térmica) entre los componentes fijos y rotatorios. Dado que el sello en los extremos está instalado en una holgura radial fija con respecto al rotor, el material debe ser seleccionado para que sea tolerante en caso de roce.

Por último, consideraciones de diseño termodinámicas incluyen diferencial de presión máximo y temperatura de operación. Ambos juegan un papel en el diseño de estas tecnologías de sellado avanzadas y deben tenerse en cuenta en el proceso de diseño para que el rendimiento y confiabilidad sea optimizados.

3.6.2. Reemplazo de álabes

El diseño de los álabes de la turbina tiene una influencia importante en la calidad de la energía transferida. En los primeros años, sólo era posible utilizar álabes cilíndricos de perfil uniforme. Las mejoras en el diseño fueron hechas a estos álabes cilíndricos una vez tras



Ilustración 59 - Álabes cilíndricos

otra. El aumento de la comprensión de los procesos de la turbina y la mejora de la maquinaria de fabricación hicieron posibles mejoras en la eficiencia [9].

Hoy en día, poderosas computadoras hacen posible el resolver el sistema de ecuaciones diferencias en más detalle, algunas usando 80 parámetros libres limitados por aproximadamente por 300 restricciones tales como las características del material, así como requerimientos de diseño, fabricación y montaje. Tales métodos proporcionan una mejor comprensión de la forma ideal de un álabe.

Sobre la base de esta nueva tecnología se ha vuelto factible desarrollar formas de álabes optimizados en tres dimensiones, en la cual el perfil, la torsión y pendiente cambian sobre toda la longitud del álabe.

Este enfoque permite una mejor adaptación de la compleja distribución del flujo radial y a las condiciones de vapor específicas entre álabes fijos y móviles, y ayuda a reducir las pérdidas secundarias en la base y punta de los álabes. El producto resultante ha sido denominado álabes 3DS.

Quedaba aún más potencial de mejora en términos de la adaptación de la geometría del álabe al flujo específico y condiciones de vapor en las diversas etapas de la turbina. La distribución de la caída de presión por etapa sobre los álabes fijos y móviles era más o menos uniforme.

Ahora, Siemens es el primer fabricante de álabes en tener éxito en la adaptación de la forma del álabe para cada etapa por separado. Llamados álabes 3DV, estos diseños eliminan la clásica distinción entre turbinas de impulso (con reacción aproximadamente 0%) y de reacción (que tienen una reacción de 50%).

La ilustración 60, muestra los nuevos álabes rotatorios con formas tridimensionales (3DS y 3DV) en comparación con los álabes cilíndricos.

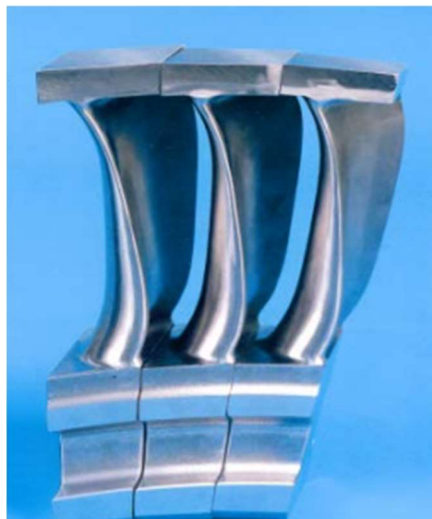


Ilustración 60 - Álabes 3DS/3DV

En comparación con los álabes cilíndricos, estas optimizaciones individuales a lo largo de las longitudes de todos los álabes de la turbina y a través de las diferentes etapas dan como resultado una ganancia de 2 a 3 % en la eficiencia en cada sección de la turbina y hasta 1% en el total de la unidad [10].

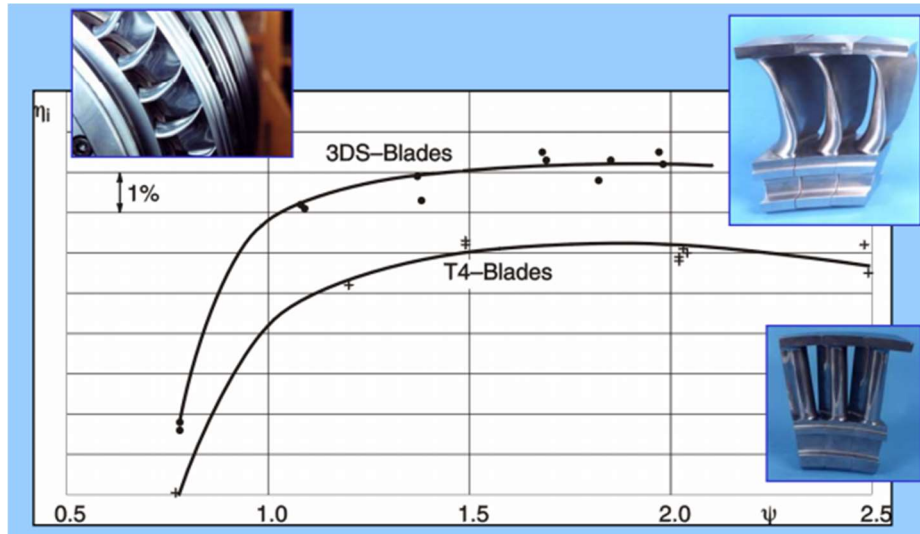


Ilustración 61 - Gráfico comparativo entre la eficiencia de los álabes 3DS y álabes de tipo cilíndrico

En la planta de fabricación de Siemens, una computarización mejorada no sólo facilita la visualización precisa del análisis de la forma y resistencia, sino también la transferencia directa de la forma del álabes hacia una completa celda de fabricación automática. Esto se traduce en tasas de fallas menores en los álabes, mayor calidad y menor costo. Los métodos aplicados hacen posible la simulación bastante exacta de los límites y los flujos

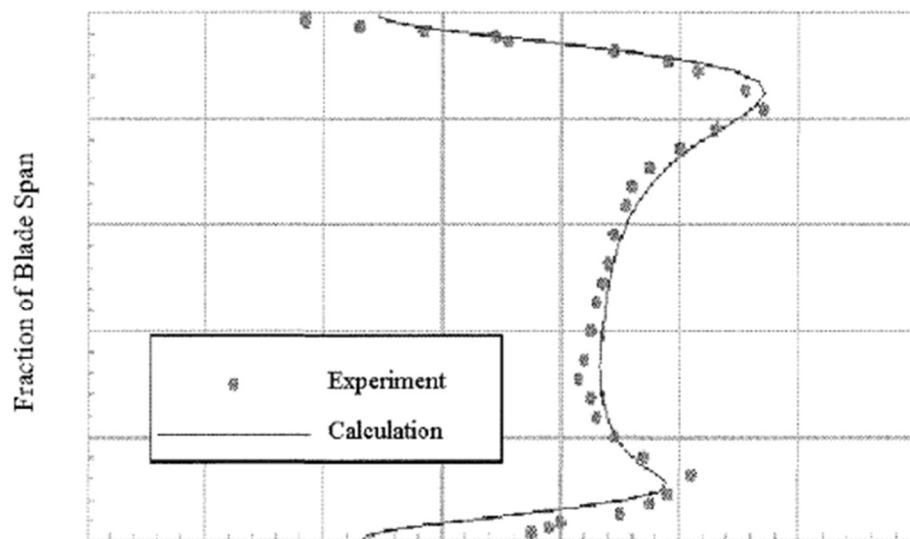


Ilustración 62 - Ángulos de flujo calculados y medidos

secundarios en áreas críticas. Los resultados analíticos se han confirmado por numerosas mediciones experimentales realizadas en túneles de viento y turbinas de prueba.

La buena concordancia de los ángulos de flujo medidos y calculados para los álabes de reacción variable 3DV se muestran en la ilustración 62.

Los álabes 3DV tienen una forma tal que la energía termodinámica del vapor se convierte de manera óptima en energía mecánica rotatoria en el eje, con pérdidas secundarias reducidas. Estos álabes mejoran significativamente la eficiencia de la turbina de vapor [11].

4. CONCLUSIONES

Con respecto al desarme de la turbina de vapor Nadrowski, si bien en un comienzo se quería hacer un desarme completo de la turbina para tener una inspección general de los elementos, esto no se logró realizar en ese momento, ya que se necesitaron equipos y herramientas especiales las cuales no se contaban en la Universidad, más importante aún se requería de un personal profesional capacitado, esto para lograr un trabajo riguroso, eficiente, sin daños en los elementos del equipo.

Sin embargo, gracias a los trabajos previos del desarme como lo fueron el estudio de los planos, las características técnicas de la turbina, que sirvieron como un acercamiento y familiarización al equipo, además de las creaciones de las programaciones de trabajo, que avalaban que el trabajo se realizaría minuciosamente, se logró desarmar componentes importantes de la turbina y revelar el estado preliminar de estos. Hubo elementos como el mecanismo de reductor de velocidad el cual se encontraba en muy buenas condiciones a simple vista, sin embargo, es notoria la corrosión e incrustaciones en los elementos esenciales como rotor, válvulas y carcasa que forman parte de las vías de vapor.

Debe de quedar de enseñanza las malas prácticas que se realizaron en el equipo al dejarlo tanto tiempo en desuso, para no cometerlas a futuro. Se debió seguir un protocolo de preservación para el equipo. Por ejemplo, la empresa General Electric creó un documento que describe de manera muy específica el protocolo para conservar este tipo de equipos. Este documento habla de cómo se debe realizar la limpieza correspondiente al equipo, que tipos de tipo de solventes y detergentes se deben utilizar. Explica cómo proteger los hilos exteriores y agujeros ya sean ciegos o pasantes. Nos explica cómo debe ser el diseño del envoltorio o embalaje, nos habla del uso de desecantes e indicadores de humedad, entre muchas otras cosas. Es evidente que pasaron por alto todo esto en la turbina de vapor Nadrowski.

La documentación del desarme se realizó de manera exitosa, estos archivos que describen los procesos de desarme vistos desde la experiencia personal, pueden ser utilizados en el caso de alguna intervención futura en el equipo.

Yendo a otro punto, vale mencionar que las pérdidas en una turbina el 30% se debe al envejecimiento natural de las vías de vapor y el 70% se debe a las fugas en el eje, punta de los álabes, juntas y tuberías internas. Es por esta razón, la importancia de la implementación de tecnologías que reduzcan las holguras entre sellos. Ahora bien, en el caso particular de la turbina de vapor Nadrowski se debe evaluar esta mejora. Según lo descrito anteriormente, la aplicación del recubrimiento abrasible es para los sellos de las puntas de los álabes que son tipo cerrados en sus extremos y para el sellado en el eje. En el caso de la turbina de vapor Nadrowski, el sellado en el eje es a través de una prensaestopa con anillos de carbono y los álabes no son cerrados en sus extremos y no poseen sellado en las puntas. Esto significa que si no se hace un cambio en estos elementos su aplicabilidad será mínima. Tener aplicabilidad mínima en el gráfico de retorno de la inversión versus mejora en el rendimiento significa que nuestra turbina recuperará su inversión entre 25 a 30 años lo que no resulta muy atractivo.

En relación a los sellos retráctil y sellos de cepillo, se debe analizar en profundidad la estructura interna de la turbina, para así determinar con mayor exactitud la aplicabilidad de estos tipos de sellos, la estructura interna de la turbina puede haber variado del plano original. Será necesario evaluar propuestas de diseño e instalación por parte de fabricantes en el ámbito de estas tecnologías.

Lo mismo ocurre con el re-diseño de los álabes, los diseños de la empresa Siemens son personalizados para los equipos. Es importante mencionar que en la turbina de vapor Nadrowski, el equipo está diseñado con grandes holguras entre rotor y la carcasa para así evitar el roce en caso de vibraciones, esto provoca que parte del flujo de vapor pase por las holguras y no produzca trabajo útil en el rotor. Los álabes 3D son del tipo cerrado que reduciría este problema de fugas mencionado anteriormente.

Finalmente, si se logra implementar el sellado retráctil y los álabes 3D a la turbina de vapor Nadrowski, significaría que habría más áreas de aplicación para el recubrimiento abrasible por lo que habría que estimar nuevamente su factibilidad en el equipo debido a la disminución de su amortización.

5. REFERENCIAS

- [1] MAVAINSA, turbina de vapor [PDF],
<http://www.mavainsa.com/documentos/8_turbinas_de_vapor.pdf>
- [2] Juan López del Ángel, Carlos Francisco Ruiz Reyes. Inspección de integridad para turbinas de vapor en centrales termoeléctricas. Tesis (Ingeniero mecánico electricista). Poza Rica, Veracruz, México. Universidad Veracruzana, 2002.
- [3] ENERGIZA, especial de turbinas de vapor [PDF],
< <http://www.energiza.org/antiores/energizadiciembre2011.pdf>>
- [4] Raúl Rodríguez Casero. Instalación para el aprovechamiento energético de los gases de escape de once motores de biogás. Tesis (Ingeniero técnico industrial). Madrid, España. Universidad Carlos III, 2012.
- [5] Jorge González Delfín, Turbinas [Doc] Antofagasta, Chile.
<<http://www.profesaulosuna.com/data/files/MECANICA/ELECTROMECHANICA/TURBINAS/TURBINAS.doc>>
- [6] OERLIKON METCO, Solutions Flash: Improve efficiency and reduce emissions with abrasible coating for steam turbine [PDF], <https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon_SF-0016.1_Steam_Turbine_Abradables_EN.pdf&download=1>
- [7] K. Scott Trunkett, Steam turbine efficiency enhancement solutions for utility powerplant applications [PDF] Chicopee, Massachusetts.
- [8] Nathan T. Little, Erik M. Sulda, Terry N. Terezakis, Efficiency improvements on large mechanical drive steam turbines [PDF] Chicopee, Massachusetts.
- [9] A. Krenayr, K. Wagner, U. Schuberth, Economical opportunities on advanced conventional island design for the European pressurized water reactor (EPR) based on Konvoi design [PDF], Germany.
- [10] Michael W. Smiarowski, Rainer Leo, Christof Scholten, Steam turbine modernization solution provide a wide spectrum of options to improve performance [PDF], Siemens Power Generation, Germany.
- [11] SIEMENS, High performance blading for steam turbines [PDF] Germany.

6. Anexos

A. "TECHNICAL DATA" DE LA TURBINA DE VAPOR NADROWSKI.

TURBINENFABRIK J. NADROWSKI GMBH 40 Bielefeld - Postfach 6104 - Telefon (0521) 7-44-01 - Telex 932 440 100091...53			
Technical Data for Steam Turbine No. 6742 / 74			
Year of Construction 1974 / 75		Live steam temperature	
Date of starting C 375 S-G II		normal 270 °C	
Type		maximal 280 °C	
Construction		Initial steam	
☐ direct driven		nominal width 50 mm	
☒ installed gear		nominal pressure 25 kp/cm ² g	
☐ separate gear		☒ steam strainer for initial steam	
☒ horizontal		Exhaust steam pressure	
☐ vertical		normal 0,5 kp/cm ² abs	
Outline drawing No. 6030 - 3		maximal — kp/cm ² abs	
Sectional drawing No. 5390 - 50		Exhaust steam temperature	
Regulating Scheme No. 5580 - 160		normal 128 °C	
Gesamtschaltplan Nr. 0440 - 1 - total diagram of connections		maximal — °C	
Circuit Scheme No. —		Exhaust steam	
Machine to be driven Generator		nominal width 200 mm	
Output		nominal pressure 10 kp/cm ² g	
normal 54 KW 87 HP		Specific steam consumption	
maximal 73,5 KW 100 HP		at normal speed and output 12 kg/HP h	
Speed of blade wheel		at max. speed and output 11,5 kg/HP h	
normal 6375 min ⁻¹		☐ nozzle valve	
maximal 7331 min ⁻¹		Blade wheel	
Coupling speed 1500 min ⁻¹		☐ single rim	
Gear ratio, i = 4,25		☒ Curtis wheel	
Range of speed regulation		Speed graduations 2	
+ 5 %		Lubrication	
- 10 %		☐ grease lubrication	
Quick action stop speed 1725 min ⁻¹		☐ oil dipping	
Critical speed		☒ forced feed	
of wheel shaft 8500 min ⁻¹		Main oil pump	
Direction of rotation seen from turbine onto driven machine: Rechts		conveying capacity 65 Litres/min	
Live steam pressure		power required 1,3 kW/HP	
normal 14 kp/cm ² g		Lubricating oil DIN DVM 3653—363	
maximal 16 kp/cm ² g		resp. MIL—L—17331 E (Shipco)	

Oil cooling

- ☐ cooling oil
☒ oil cooler
☒ oil filter, can be switched off
☒ oil filter fine-meshed 40 micron

Water connections

nominal width 20 mm
 nominal pressure 16 $\text{kp/cm}^2 \text{ g}$

Oil cooler for

- ☒ fresh water
☐ sea water
☐ sewage water

Cooling water pressure max. 6 $\text{kp/cm}^2 \text{ g}$

Quantity of cooling water min. 1 m^3/h

Temperature control for cooling water max. 25 $^{\circ}\text{C}$

Cooling water chamber GG 20

Oil pressure

normal 2...5 $\text{kp/cm}^2 \text{ g}$

minimal 1 $\text{kp/cm}^2 \text{ g}$

Oil temperature

minimal 45 $^{\circ}\text{C}$

maximal 75 $^{\circ}\text{C}$

Oil filling: 30 litres

- ☒ in base plate
☐ in gear box
☐ in separate oil container

Oil heating in the oil container

- ☐ steam
☐ electric

Shaft sealing / Blade wheel case

- ☒ carbon
☐ labyrinth
☒ leaking steam suction connection pipe R 1/2 "
☒ conveyance of sealing steam only for exhaust
 steam pressure under 14 lb./sq. in. abs.

Governor valve sealing

- ☒ labyrinth resp. gland
 bzw. Spaltdichtung
☐ stuffing box

Speed governor, Type G 6

- ☐ mechanical
☒ hydraulic

Governor action

~~by~~ P

Speed regulation

- ☒ by hand
☐ pneumatic

Control air pressure $\text{kp/cm}^2 \text{ g}$

- ☒ electric

Voltage 220 Volt 50 Hz

Amperage 0,08

Governor lubrication

- ☒ together with the turbine
☐ separately

Additional governor =

Quick action stop valve

- ☐ mechanical
☒ hydraulic

Piston diameter 100/130/160/200 mm

Quick action stop release at

- ☒ overspeed
☐ rising backpressure
☐ rising oil temperature
☐ rising temperature in the bearing
☒ loss of oil
☐ axial displacement of blade wheel

Limit switch of quick action stop valve

- ☐ with
☒ without

Starting device

- ☒ hand oil pump Gr. 1
☐ auxiliary turbo oil pump
☐ auxiliary electric oil pump

Type

Execution

Switching points $\text{kp/cm}^2 \text{ g}$

Pre-heating when starting

Quick action start in less than 30 sec.

Lubricating time when switching off

Remote control

- ☐ mechanical
☐ electric
☐ hydraulic
☐ pneumatic

Shaft bearing

- ☒ plain bearing 4 radial 2 axial
☐ ball bearing radial axial

measurements of journal for coupling

 $\varnothing$ 50 mm kg/mm² L= 110 mm

Fitting key according to DIN 6885 Bl. 1

Tachometer

- ☒ local
☒ remote tachometer
☐ contact tachometer
☐ pneumatic indication
☐ hydraulic indication

Draining valve / steam trap on

- ☐ Quick action stop valve / initial steam channel
☒ exhaust steam chamber

Device for rotation of blade wheel

- ☐ by hand
☐ electric
☐ hydraulic

Warning safety valve

- ☒ with
☐ without

Release pressure 2,5 kg/cm²g

Inspecting Society

Total weight of the turbine kg

Space required

Modulation of base plate

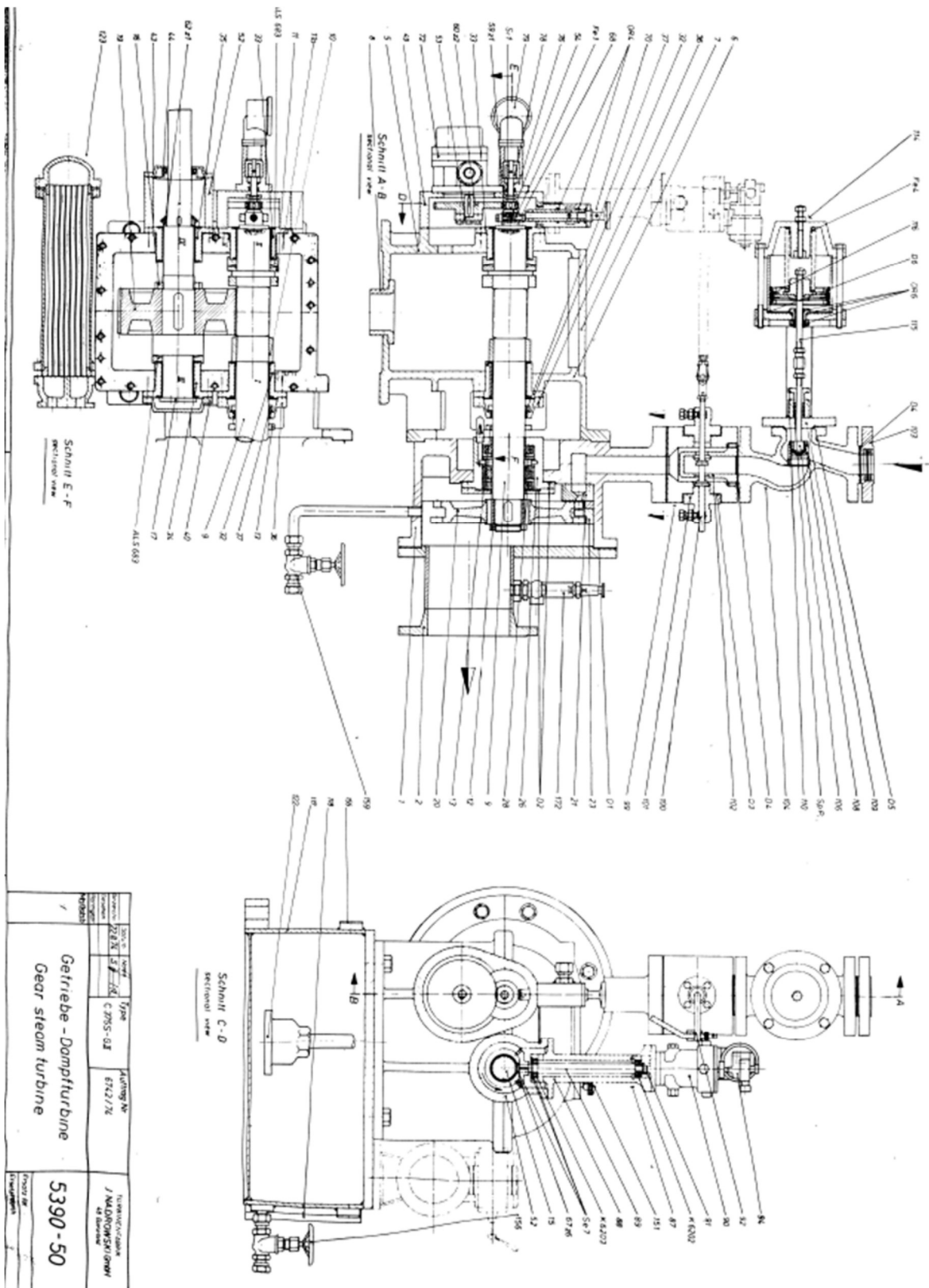
Consumption of energy for the auxiliary drive

..... KW

- ☒ Casing with heat insulation

Remarks:

B. PLANOS DE LA TURBINA DE VAPOR NADROWSKI.





TURBINENFABRIK J. NADROWSKI GMBH

48 BIELEFELD

Postfach 6104 - Telefon ~~54444~~ Telex 932 440
100051...93

Ersatzteil-Liste

zur Dampfturbine Typ C 375 S-G II Nr. 6742 / 74

nach beiliegender Schnittzeichnung Nr. 5350 - 50

Position	Gegenstand
1	1 Turbinengehäuse
2	1 Turbinengehäusedeckel
0 1	1 Dichtung für Turbinengehäuseteile
5	1 Getriebe-Lagerbock
6	1 Getriebe-Lagerbockdeckel
7	1 Deckelplatte zu Pos. 6
8	1 Ölebleufrohr in Lagerbock
9	1 Turbinenwelle mit Ritzel, komplett
10	1 Schulterring zur Turbinenwelle, gehäusesseitig
11	1 Schulterring zur Turbinenwelle, tachometersseitig
11 a	1 Auswuchtring zur Turbinenwelle
12	1 Nutmutter zur Turbinenwelle
13	1 Spritzring auf der Turbinenwelle
15	1 Radwelle, komplett
16	1 Nutmutter zur Radwelle
17	1 Schulterdeckel zur Radwelle
19	1 Getrieberad mit Schrägverzahnung
20	1 Turbinenrad mit Beschaufelung
21	1 Düsensegment mit 6 Düsen für Dampfeintritt
23	1 Leitschaufelsegment mit Beschaufelung
26	1 Stopfbüchskappe mit Deckel
28	1 Satz Stopfbüchsteile best. aus: 3 Kohleringen mit Fadern, 3 Kammerringen und 1 Dampfring

- 2 -

Bei Ersatzbestellung bitte Positions-Nr. lt. obiger Auf. teilung sowie Fabrik-Nr. und Typ der Turbine angeben

Position	Gegenstand
D 2	2 Dichtungen zur Stopfbüchenskappe
32	1 Gleitlager Nr. I zur Turbinenwelle
33	1 Gleitlager Nr. II z. Turbinenwelle
ALS 683	1 Axialgleitlager z. Turbinenwelle
34	1 Gleitlager Nr. III zur Radwelle
ALS 683	1 Axialgleitlager zur Radwelle
35	1 Gleitlager Nr. IV zur Radwelle
36	1 Lagerdeckel Nr. I, komplett
37	1 Schلودerring im Lagerdeckel Nr. I
40	1 Lagerdeckel Nr. III
43	1 Deckel zum Kegelradgehäuse an Lager Nr. IV komplett
44	1 Schلودerring im Deckel Nr. IV
49	1 Stirnradgehäuse
52	1 Kegelradgehäuse
53	1 Haltescheibe zum Hauptölpumpenzapfen
54	1 Ölpumpen-Antriebszapfen
58	1 Stirnräderpaar, komplett für Drehzahlgeber- und Ölpumpenantrieb, bestehend aus:
59 z 1	1 Ritzel für Drehzahlgeberantrieb
60 z 2	1 Stirnrad zum Ölpumpen-Antrieb
62	1 Kegelröderpaar, komplett, für Regler- antrieb, bestehend aus:
62 z 1	1 Kegelrad auf der Radwelle Pos. 15
67 z 6	1 Kegelrad auf der Reglerantriebswelle Pos. 69
68	1 Schnellschlußscheibe, komplett
Fa 1	1 Druckfeder zu Pos. 68
70	1 Ölschaltventil, komplett
O R 4	2 O-Ringe zu Pos. 70
72	1 Hauptölpumpe, komplett
76	1 Halter für Drehzahlgeberantrieb
81 1	1 Wellendichtring zum Drehzahlgeberantrieb
73	1 Kupplung für Drehzahlgeb.-Antrieb
79	1 Drehzahlgeber mit Direktanzeiger
80	1 Formanzeiger zu Pos. 79

Tag 4.11.1975 Blatt 3

Typ: C 375 S-6 II

Zeichn. Nr.: 6742 / 74

Sectional drawing No.:
Schnitzzeichnung, Nr. 6390 - 50

Position Gegenstand

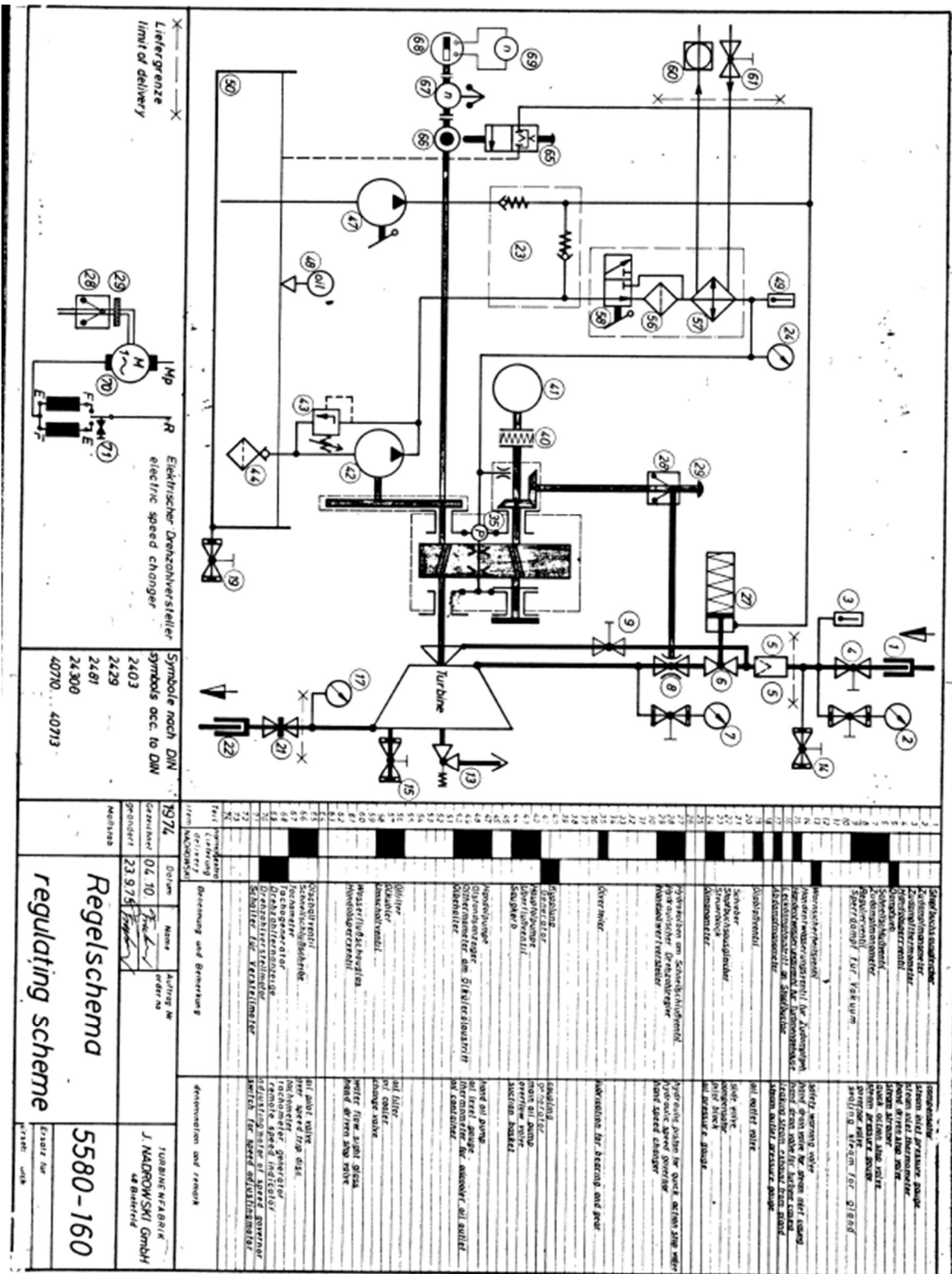
07	1 Reglerantrieb, komplett
08	1 Halter für Reglerantrieb
89	1 Reglerantriebswelle
K 6202	1 Kugellager zu Pos. 87, oben
K 6203	1 Kugellager zu Pos. 87, unten
S c 7	1 Satz Sicherungsringe zu Pos. 87
90	1 hydraulischer Drehzahlregler
91	1 Kupplung zu Pos. 90
92	1 Satz Reglergestängeteile, komplett
94	1 elektrischer Drehzahlversteller mit Handversteller zu Pos. 90
99	1 Regulierventil, komplett
100	1 Spindel mit Kegel zu Pos. 99
101	2 Buchsen mit Spaltdichtungen zu Pos. 99
D 3	2 Dichtungen zu Pos. 101
102	1 Einsatz zu Pos. 99
103	1 Dampfsieb für Dampfeintritt
104	1 Dampfeinlaß- und Schnellschlußventil, komplett
D 4	3 Dichtungen zu Pos. 103, 104 + 99
106	1 Spindel zu Pos. 104
108	1 Kegel zu Pos. 106
109	1 Zwischenflansch zu Pos. 104 + 114
D 5	1 Dichtung zu Pos. 104 + 109
Sp.P.	1 Rolle Spezial-Spindelpackung zu Pos. 109
110	1 Stopfbüchsebrille zu Pos. 109
114	1 Kolbenantrieb, komplett, am Schnellschlußventil
115	1 Spindel zum Kolbenantrieb
O R 6	3 O-Ringe zu Pos. 114
116	1 Doppel-Topfmanchette zu Pos. 114
F c 4	1 Schrauben-Druckfeder zu Pos. 114
D 6	1 Dichtung zu Pos. 114
117	1 Grundplatte mit Ölbehälter
118	2 Reinigungsdeckel am Ölbehälter
122	1 Saugkorb im Ölbehälter

Position Gegenstand

123	1 Ölkühler mit Filter, komplett
124	1 Filtereinsatz zu Pos. 123
125	1 Satz Ölkühlerrohre zu Pos. 123
126	2 Rohrplatten zu Pos. 123
127	2 Wasserkammern = Deckel zu Pos. 123
128	1 Ölkühlergehäuse
129	1 Satz Dichtungen zu Pos. 123
136	1 Handölpumpe zum Anfahren
137	3 Manometer für Zudampfdruck Abdampfdruck und Öldruck mit Nühren
143	1 Thermometer an Ölkühler-Ölaustritt
151	1 Ölbelüftungs- und Einfüllschraube
153	1 Ölverteiler für Ölleitungen
154	1 Steuerblock mit 2 Rückschlagventilen
155	1 Satz Ölaugegläser an Ölbehälter
156	1 Ölabschneidventil an Ölbehälter
158	1 Entwässerungsventil für Abdampf
172	1 Sicherheitsventil für Abdampf
188	1 Kupplung N-Eupex A 200
188 a	1 Kupplungsschutz zu Pos. 188
195	1 Ringspannlement zur Kupplung Pos. 188
196	1 Satz Schrauben und Mutter zur Turbine
197	1 Satz Ernato-Verschraubungen z. Turbine
198	1 Satz Schneidringe zu Ernato-Verschraubgn.
199	1 Satz Ernato-Rohr zur Turbine
3	1 Verkleidungsring, Zudampfseite
4	1 Verkleidungsring, Abdampfseite

Bei Ersatzteilbestellung bitte Positions-Nr. lt. obiger Aufstellung sowie Fabrik-Nr. und Typ der Turbine angeben.

C. ESQUEMA OLEOHIDRÁULICO DE LA TURBINA DE VAPOR NADROWSKI.



D. PROGRAMACIONES DE TRABAJO PARA EL DESARME DE LA TURBINA DE VAPOR NADROWSKI.



Programación de Trabajo Nº	001
-----------------------------------	------------



Fecha:

1.- Descripción de Faena

Mantenimiento mayor turbina J. Nadrowsky GMBH

1.1.- Equipos a intervenir

Pilotaje de vapor de ingreso

Válvula de parada rápida (6 P.O. / 104 P.D.)

Válvula de regulación (8 P.O. / 99 P.D.)

Elemento accionador válvula de regulación (100 P.D.)

Válvula apertura manual

1.2.- Precauciones con equipos o componentes:

Pilotaje de manómetro instrumentación de vapor ingreso.

1.3.- Trabajo por realizar:

Retirar y dejar identificado cada uno de los componentes que intervienen en el acceso de vapor, que sería piping y válvulas de acceso y reguladoras.

2.- Personal

	Nombre	HH	Firma
Responsable académico:			
Asistente académico:			
Alumno responsable:			
Personal de apoyo:			
1			
2			
3			

4			
5			
6			

3.- Periodo de intervención

	Hora	Día	Mes
Desde			
Hasta			

4.- Herramientas, materiales y equipos

4.1.- Herramientas

Llaves punta corona medidas métricas: 14, 15, 17, 19, 24, 28, 32 y 36 [mm].
Llave francesa 12"

4.2.- Materiales

Paños de limpieza
Bolsas plásticas
Brocha 1,5"
Masking Tape
Marcador permanente
Anticorrosivo WD 40, líquido de freno.

4.3.- Equipos

Soplete de gas licuado.

5.- Riesgos asociados y elementos de seguridad

5.1.- Riesgos asociados

Caídas en baja altura de elementos pesados.
Daño en manos por manipulación de piezas metálicas con incrustaciones.

5.2.- Elementos de seguridad

Lentes de seguridad
Guantes
Buzo protector
Zapatos de seguridad



Programación de Trabajo Nº	002
-----------------------------------	------------



Fecha:

1.- Descripción de Faena

Mantenimiento mayor turbina J. Nadrowsky GMBH

1.1.- Equipos a intervenir

Tapa protectora zona de descarga vapor

Flange de descarga de vapor

1.2.- Precauciones con equipos o componentes:

Rodete de la turbina, piping manómetro de vapor descarga.

1.3.- Trabajo por realizar:

Remover: Tapa protectora y flange de descarga de vapor.

2.- Personal

	Nombre	HH	Firma
Responsable académico:			
Asistente académico:			
Alumno responsable:			
Personal de apoyo:			
1			
2			
3			
4			
5			
6			

3.- Periodo de intervención

	Hora	Día	Mes
Desde			
Hasta			

4.- Herramientas, materiales y equipos

4.1.- Herramientas

Llaves punta y corona medidas: 14, 17 y 24 [mm]
Destornillador de paleta
Llave francesa 12"
Llave de torque

4.2.- Materiales

Paños de limpieza
Bolsas plásticas
Masking tape
Marcador permanente
Anticorrosivo WD 40, líquido de freno.
3 platinas de 3 [mm] de espesor
Brocha 1,5"

4.3.- Equipos

Brazo Hidráulico
2 Eslingas planas

5.- Riesgos asociados y elementos de seguridad

5.1.- Riesgos asociados

Caida en baja altura de objetos pesados.
Daño en manos por manipulación de piezas metálicas con incrustaciones.

5.2.- Elementos de seguridad

1 par de guantes
Lentes de seguridad
Buzo protector
Zapatos de seguridad



Programación de Trabajo Nº

003



Fecha:

1.- Descripción de Faena

Mantenimiento mayor turbina J. Nadrowsky GMBH

1.1.- Equipos a intervenir

Juego de toberas 1 (21 P.D.)

Juego de toberas 2 (23 P.D.)

Rotor de turbina 20 (P.D.)

1.2.- Precauciones con equipos o componentes:

Rotor de turbina, Juegos de toberas.

1.3.- Trabajo por realizar:

Se retirará los juegos de toberas 1 y 2 (21 y 23 P.D. respectivamente) y se retirará el rotor de la turbina (20 P.D.) para poder realizar una limpieza de los componentes retirados.

2.- Personal

	Nombre	HH	Firma
Responsable académico:			
Asistente académico:			
Alumno responsable:			
Personal:			
1			
2			
3			
4			
5			
6			

3.- Periodo de intervención

	Hora	Día	Mes
Desde			
Hasta			

4.- Herramientas, materiales y equipos

4.1.- Herramientas

Llaves punta y corona medidas: 17, 24, 26, 32 [mm]
Destornillador de paleta
Destornillador de cruz
Llave extractora tipo castillo de 6 muelas.
5 pernos de extracción de rodete.

4.2.- Materiales

Paños de limpieza
Bolsas plásticas
Masking tape
Marcador permanente
Trapos

4.3.- Equipos

Brazo hidráulico
Eslinga
Levanta cargas
Esmeril angular

5.- Riesgos asociados y elementos de seguridad

5.1.- Riesgos asociados

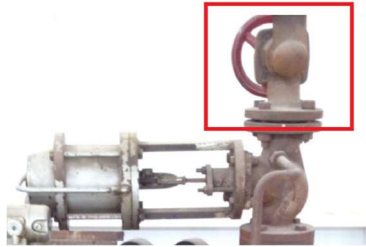
Caída a baja altura de componentes pesado
Daño en manos por manipulación de piezas metálicas con incrustaciones.
Manejo de esmeril angular

5.2.- Elementos de seguridad

1 par de guantes
Lentes de seguridad
Buzo protector
Zapatos de seguridad

Nota: si bien la programación de trabajo fue realizada y revisada, no se pudo desarrollar debido a un inconveniente con la contratuerca del rotor (no se poseía la herramienta adecuada para soltar este elemento).

E. DOCUMENTACIÓN DEL DESARME DE LA TURBINA DE VAPOR NADROWSKI.

Desarme de válvula de apertura manual	
No se muestra en el plano	
Desarme previo necesario	Ninguno
Herramientas necesarias y/o sugeridos	Llave de punta y corona de 24 [mm] y 28 [mm]
Equipos necesarios y/o sugeridos	Brazo hidráulico Eslingas Soplete
Materiales necesarios y/o sugeridos	Líquido anticorrosivo
Elementos de seguridad obligatorios	Gafas de seguridad Guantes Zapatos de seguridad Overol
Procedimiento detallado (step by step)	
1) Utilizar líquido anticorrosivo en todos los pernos del flange de la pieza. 	

- 2) Usando un soplete, calentar la zona de trabajo, esto ayudará a disminuir el agripamiento de los pernos en el flange.



- 3) Una vez disminuido el agripamiento en los pernos se procede a extraerlos. Para ello, debemos notar que el flange está compuesto por pernos con tuercas, por ende se recomienda utilizar las llaves de punta y corona de 24[mm] y 28[mm] mientras que a la vez se sujeta la tuerca con otra llave del mismo diámetro, esto evitará que el perno y la tuerca giren en conjunto, así se podrán separar de manera efectiva.



- 4) Ya retirados los pernos del flange, comienza el retiro de la válvula de la turbina (en caso de haber calentado la zona, esperar a que se enfríe). Para esta etapa es recomendable utilizar un brazo hidráulico que mediante eslingas ayuden a mover a la pieza a su posición de reposo de manera segura.

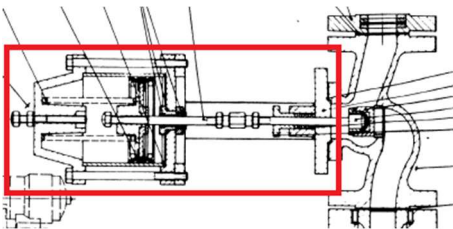
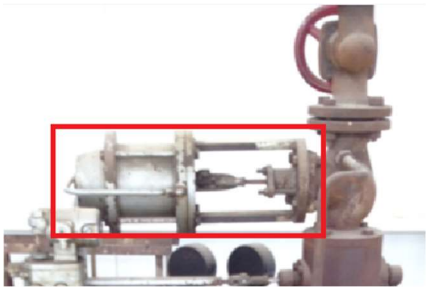
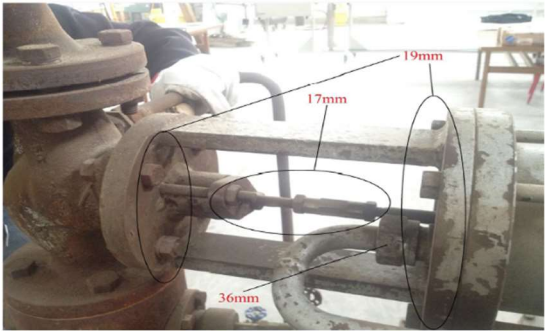
Observaciones y/o recomendaciones

Mantener el lugar o zona libre de objetos que puedan interferir en el trabajo de desarme.

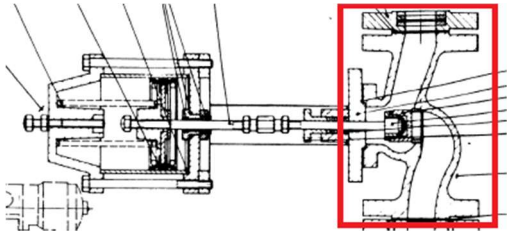
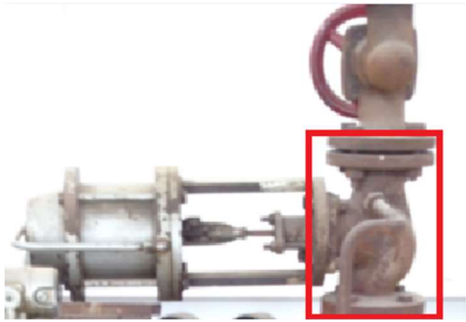
En la práctica quedó demostrado que calentar la zona de trabajo, el utilizar líquidos anticorrosivos, y aumentar la distancia del brazo con la que se ejerce el torque en los pernos permite extraerlos de manera más fácil.

Dejar clasificado todos los elementos para que a la hora de armar, todo sea más organizado.

Si bien el brazo hidráulico es un elemento que permite mover de manera segura la pieza a la posición de reposo, también se puede realizar esta etapa utilizando las manos, la pieza en sí no es pesada, por ende manteniendo el debido cuidado se puede realizar el traslado sin necesidad de un equipo extra.

Desarme de cilindro de parada rápida	
	
Desarme previo necesario	Ninguno
Herramientas necesarias y/o sugeridas	Llave de punta y corona de 19[mm] y 36 [mm]
Equipos necesarios y/o sugeridos	Brazo hidráulico Eslingas Soplete
Materiales necesarios y/o sugeridos	Marcador permanente Trapos Líquido anticorrosivo Bolsa hermética de plástico Masking tape
Elementos de seguridad obligatorios	Gafas de seguridad Guantes Zapatos de seguridad Overol
Procedimiento detallado (step by step)	
1) Antes de proceder a sacar los pernos del flange unido a la válvula de parada rápida, se debe soltar la tuerca de 36[mm] de la tubería unida al sistema de lubricación. Se debe tener especial cuidado en sellar el extremo de la tubería para evitar contaminación por residuos, esto se puede realizar usando paños y masking tape.	
	
2) Una vez que se pueda retirar la tubería del sistema de lubricación, se debe comenzar a extraer los pernos unidos al flange de la válvula de cierre rápido, aplicar líquido anticorrosivo en los pernos facilita su extracción. En caso de que estén muy agripados se debe aplicar calor en la zona con el uso de un soplete,	

de no ser así, se debe usar una llave de punta y corona de 19[mm] para sacar los pernos.
3) Ya aflojado el flange, ayudándose de un brazo hidráulico se mueve la pieza a su posición de reposo. 
Observaciones y/o recomendaciones
Mantener el lugar o zona libre de objetos que puedan intererir en el trabajo de desarme.
En la práctica quedó demostrado que calentar la zona de trabajo, el utilizar líquidos anticorrosivos, y aumentar la distancia del brazo con la que se ejerce el torque en los pernos permite extraerlos de manera más fácil.
Dejar clasificado todos los elementos para que a la hora de armar, todo sea más organizado.
Muy importante el uso del brazo hidráulico, esta pieza es algo difícil de separar de la válvula de cierre rápido, por ende el mantenerla firme facilita el moverla a su posición de reposo, además mantiene la seguridad para el trabajador.

Desarme de válvula de parada rápida	
	
Desarme previo necesario	Válvula de apertura manual Cilindro de parada rápida
Herramientas necesarias y/o sugeridas	Llave de punta y corona de 24[mm] y 32[mm].
Equipos necesarios y/o sugeridos	Soplete
Materiales necesarios y/o sugeridos	Marcador permanente Trapos Líquido anticorrosivo Masking tape Bolsa hermética de plástico
Elementos de seguridad obligatorios	Gafas de seguridad Guantes Zapatos de seguridad Overol
Procedimiento detallado (step by step)	
1) Antes de comenzar a soltar los pernos del flange de la válvula, se debe retirar la tubería de purga conectada a la pieza. Para ello, si se observa agripamiento en la tuerca se puede aplicar líquido anticorrosivo y/o calor a la zona con el uso de un soplete. Para extraer la tuerca se utilizará una llave de punta y corona de 32[mm]. Importante sellar el extremo de la tubería con masking tape y/o bolsa de plástico.	
	

- 2) Ya separada la tubería de purga de la válvula se procede a soltar los pernos del flange, para ello se utilizará una llave de punta y corona de 24[mm].



- 3) Una vez ya extraído los pernos se ubica la válvula en la posición de reposo, para etapa no es necesario contar con un equipo adicional en su traslado ya que la pieza en sí no es pesada.

Observaciones y/o recomendaciones

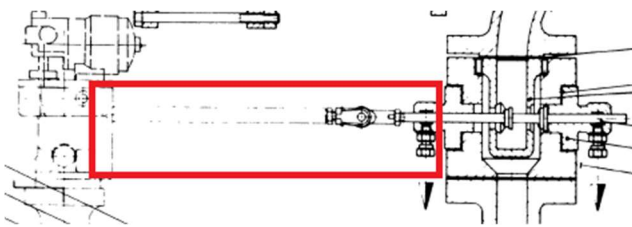
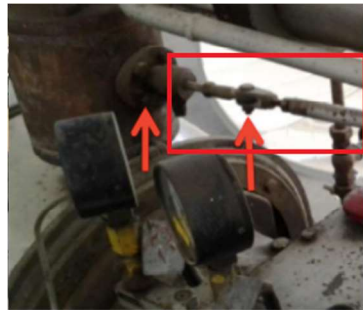
Mantener el lugar o zona libre de objetos que puedan interferir en el trabajo de desarme.

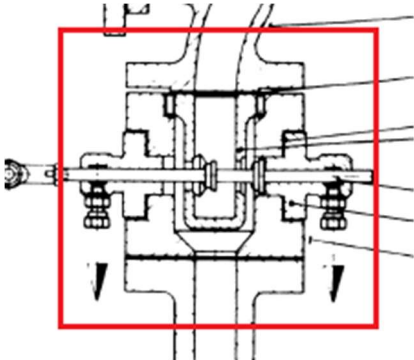
En la práctica quedó demostrado que calentar la zona de trabajo, el utilizar líquidos anticorrosivos, y aumentar la distancia del brazo con la que se ejerce el torque en los pernos permite extraerlos de manera más fácil.

Dejar clasificado todos los elementos, para que a la hora de armar todo sea más organizado.

Utilizar marcador para indicar la posición en la que se encontraba el equipo facilita visualmente a reubicar la pieza en su estado original.



Desarme de accionador entre gobernador de velocidad y válvula de regulación	
	
Desarme previo necesario	Ninguno
Herramientas necesarias y/o sugeridas	Llave de punta y corona de 13[mm], 14[mm] y 17[mm]
Equipos necesarios y/o sugeridos	Ninguno
Materiales necesarios y/o sugeridos	Líquido anticorrosivo Bolsa hermética de plástico
Elementos de seguridad obligatorios	Gafas de seguridad Guantes Zapatos de seguridad Overol
Procedimiento detallado (step by step)	
1) El procedimiento para el desarme del accionador es bastante sencillo, utilizando las herramientas nombradas se sueltan los pernos de la pieza. Una vez hecho se etiqueta y sella en una bolsa hermética.	
	
Comentarios y/o recomendaciones	
Mantener el lugar o zona libre de objetos que puedan interferir en el trabajo de desarme.	
Dejar clasificado todos los elementos, para que a la hora de armar todo sea más organizado.	
Esta pieza es bastante sencilla en su desarme, no debería existir inconvenientes.	

Válvula reguladora de velocidad	
	 Piping manómetro a la entrada
Desarme previo necesario	Accionador de la válvula reguladora
Herramientas necesarias y/o sugeridas	Llave de punta y corona de 24[mm] y 12[mm]
Equipos necesarios y/o sugeridos	Soplete
Materiales necesarios y/o sugeridos	Marcador permanente Trapos Líquido anticorrosivo Masking tape Bolsa hermética de plástico
Elementos de seguridad obligatorios	Gafas de seguridad Guantes Zapatos de seguridad Overol
Procedimiento detallado (step by step)	
1) Primero se debe retirar el pilotaje que conecta al manómetro a la entrada del flujo en el rodete, para esto se deben soltar las respectivas tuercas utilizando la llave de punta y corona de 12[mm]. Al igual que los demás pipings se procede a sellar los extremos con trapos y masking tape inmediatamente una vez retirados.	
2) Se debe marcar la válvula con plumón para saber su posición exacta en la turbina.	
	

- 3) Se suelta los pernos, que están por debajo de la válvula, utilizando una llave de punta y corona de 24[mm]. Luego se retira la válvula para dejarla en la posición de reposo en la mesa de trabajo.



Comentarios y/o recomendaciones

Mantener el lugar o zona libre de objetos que puedan interferir en el trabajo de desarme.

Si el agripamiento de los pernos es grande, utilizar un soplete para calentar la zona de trabajo.

Dejar clasificado todos los elementos para que a la hora de armar todo sea más organizado.

Tapa protectora a la salida de vapor	
No se muestra en el plano	
Desarme previo	Ninguno
Herramientas necesarias y/o sugeridas	Llave de punta y corona de 14 y 17 [mm] Destornillador de paleta
Equipo necesarios y/o sugeridos	Ninguno
Materiales necesarios y/o sugeridos	Paños de limpieza Bolsas herméticas plásticas Masking tape Líquido anticorrosivo
Elementos de seguridad obligatorios	Gafas de seguridad Guantes Zapatos de seguridad Overol
Procedimiento detallado (step by step)	
1) Remover de formam manual la lata protectora que recubre la tapa de la carcasa de la turbina. 	
2) Se debe remover el pilotaje que va hacia el manómetro de la descarga. Para ello se deben soltar las tuercas utilizando la llave de punta y corona de 14 [mm]. Luego de ser removido el piping, se debe sellar sus extremos con paños y cinta, y debe quedar marcada a qué corresponde, finalmente sus tuercas deben ser guardadas en bolsas herméticas de plástico y rotuladas.	



- 3) Remover la tapa protectora del flange de descarga de vapor, para ello se utilizará una llave de punta y corona de 17 [mm] y un destornillador de paleta para soltar las tuercas y tornillos. Luego se levanta cuidadosamente sin pasar a dañar la válvula de seguridad en la zona de descarga. Los tornillos deben ser guardados en bolsas plásticas indicando a qué corresponden.

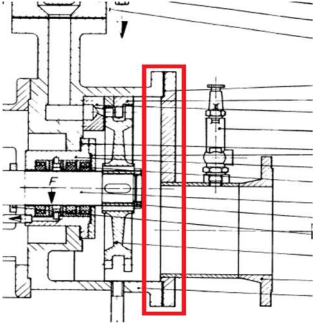


Observaciones y/o recomendaciones

Mantener el lugar o zona libre de objetos que puedan interferir en el trabajo de desarme.

En el caso particular del piping del manómetro, se debe señalar con un plumón la dirección correcta en que debe ser ubicado en la turbina a la hora del armado.

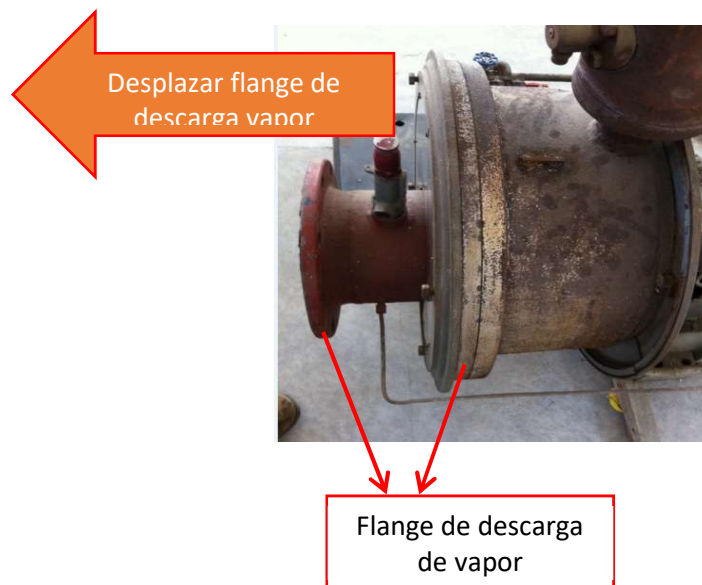
Dejar clasificado todos los elementos para que a la hora de armar todo sea más organizado.

Flange de descarga de vapor	
	
Desarme previo	Tapa protectora y pilotaje de la descarga del vapor
Herramientas necesarias y/o sugeridas	Llave de punta y corona de 24 [mm] Llave de torque
Equipos necesarios y/o sugeridos	Soplete Brazo hidráulico 2 eslingas planas
Materiales necesarios y/o sugeridos	Paños de limpieza Líquido anticorrosivo Brocha de 1.5 [pulg] Bolsas plásticas
Elementos de seguridad obligatorios	Gafas de seguridad Guantes Zapatos de seguridad Overol
Procedimiento detallado (step by step)	
1) Sacar la tapa del flange de descarga de vapor y carcasa de turbina, para esto se deben soltar los pernos y tuercas de sujeción de la tapa. Utilice un soplete en caso de agripamiento en las tuercas y pernos. Una vez sacado los elementos de sujeción, guardarlos en una bolsa plástica hermética y clasificarlos.	
 Pernos de sujeción Tapa de flange de descarga y carcasa de turbina	

- 2) Remover el flange de descarga de vapor. Para esto se debe asegurar mediante el brazo hidráulico el flange, sujetándolo mediante una eslinga plana. Una vez asegurado el flange de descarga de vapor a la eslinga, se procede a soltar las tuercas de sujeción del flange, realizándolo de manera cruzada. Para soltar los pernos de apriete se debe realizar un calentamiento por 2 minutos de los pernos, rociar líquido anticorrosivo, y mediante el uso de la llave de punta y corona de 24 [mm] con un brazo aproximado de 1 [m], aplicar fuerza para soltar los pernos. Una vez sacada las tuercas de sujeción se deben guardar en una bolsa plástica hermética y clasificarlas.



- 3) Mediante las platinas se van introduciendo entre el flange de descarga y la carcasa de la turbina y con golpes secos se van separando. Se procede a ir retirando de manera cuidadosa el flange de descarga de vapor, desplazándolo hacia afuera con cuidado

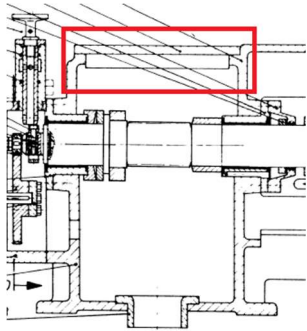


Observaciones y/o recomendaciones

Mantener el lugar o zona libre de objetos que puedan interferir en el trabajo de desarme.

En la práctica quedó demostrado que calentar la zona de trabajo, el utilizar líquidos anticorrosivos, y aumentar la distancia del brazo con la que se ejerce el torque en los pernos permite extraerlos de manera más fácil.

Dejar clasificado todos los elementos para que a la hora de armar todo sea más organizado.

Caja reductora	
	
Desarme previo	Ninguno
Herramientas necesarias y/o sugeridas	Llave de dado
Equipos necesarios y/o sugeridos	Ninguno
Materiales necesarios y/o sugeridos	Líquido anticorrosivo
Elementos de seguridad obligatorios	Gafas de seguridad Guantes Zapatos de seguridad Overol
Procedimiento detallado (step by step)	
1) Utilizando la llave de dado, se deben soltar los pernos de la tapa de la caja reductora, una vez retirados se procedió a sacar la tapa, dejando al descubierto el juego de engranajes.	
	
Observaciones y/o recomendaciones	
Mantener el lugar o zona libre de objetos que puedan interferir en el trabajo de desarme. El trabajo es bastante sencillo, y se realiza para inspeccionar de manera general el estado de los engranajes en la caja reductora.	

Tapa trasera del intercambiador de calor	
	
Desarme previo	Ninguno
Herramientas necesarias y/o sugeridas	Llave de dado Llave de punta y corona de 12 [mm]
Equipos necesarios y/o sugeridos	Ninguno
Materiales necesarios y/o sugeridos	Anticorrosivo DW 40
Elementos de seguridad obligatorios	Gafas de seguridad Guantes Zapatos de seguridad Overol
Procedimiento detallado	
1) Con ayuda de una llave de dado y, una llave de punta y corona se sacan los pernos de la tapa trasera del intercambiador de calor. Luego retirar la tapa y verificar el estado de esta. 	
Observaciones y/o sugerencias	
Mantener el lugar o zona libre de objetos que puedan interferir en el trabajo de desarme.	
El trabajo es muy sencillo y sirve para verificar el estado del sello del intercambiador.	