

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA**



ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

ESTUDIO ESPECIAL DE GRADUACIÓN

**ESTUDIO DE MEJORA DE LA CONDICIÓN DE
OPERACIÓN EN UNA TURBINA DE VAPOR ELLIOTT
MODELO DYP**

POR

**INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL
LUIS ALBERTO VELÁSQUEZ AGUILAR**

**AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRO EN ARTES EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO**

Guatemala, mayo de 2007

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA**



NOMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO:	Ing.	Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I:	Inga.	Glenda Patricia García Soria
VOCAL II:	Inga.	Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III:	Ing.	Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV:	Br.	Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V:	Br.	Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA:	Inga.	Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO:	Ing.	Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR:	Ing.	Carlos Humberto Pérez Rodríguez
EXAMINADOR:	Ing.	José Arturo Estrada Martínez
EXAMINADOR:	Ing.	Otto Fernando Andrino González
SECRETARIA:	Inga.	Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ESTUDIO DE MEJORA DE LA CONDICIÓN DE OPERACIÓN EN
UNA TURBINA DE VAPOR ELLIOTT MODELO DYR**

tema que me fuera asignado por el Tribunal Examinador de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, con fecha de 23 de marzo de 2007.

Ingeniero Luis Alberto Velásquez Aguilar


Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios
de Postgrado

Como Revisor de la Maestría en Ingeniería de Mantenimiento del Trabajo de Graduación titulado la **ESTUDIO DE MEJORA DE LA CONDICIÓN DE OPERACIÓN EN UNA TURBINA DE VAPOR ELLIOTT MODELO DYR**, presentado por el **Ingeniero Mecánico Industrial Luis Alberto Velásquez Aguilar**, apruebo el presente trabajo y recomiendo la autorización del mismo.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Msc. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Director
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, abril de 2007.

/ap.


Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios
de Postgrado

El Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y el Visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística del Trabajo de Graduación titulado **ESTUDIO DE MEJORA DE LA CONDICIÓN DE OPERACIÓN EN UNA TURBINA DE VAPOR ELLIOTT MODELO DYP**, presentado por el **Ingeniero Mecánico Industrial Luis Alberto Velásquez Aguilar** apruebo el presente trabajo y recomiendo la autorización del mismo.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Msc. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Director
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, mayo de 2007.

/ap.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al trabajo de graduación de la Maestría en Ingeniería de Mantenimiento titulado: **ESTUDIO DE MEJORA DE LA CONDICIÓN DE OPERACIÓN EN UNA TURBINA DE VAPOR ELLIOT MODELO DZR**, presentado por el Ingeniero Mecánico Industrial **Luis Alberto Velásquez Aguilar**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, mayo de 2007



ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	- 1 -
I. ASPECTOS GENERALES	- 3 -
1.1 Generalidades	- 3 -
1.2 Planteamiento del problema	- 4 -
1.3 Objetivos del trabajo	- 6 -
1.4 Justificación del trabajo	- 7 -
1.5 Alcance del trabajo	- 8 -
II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	- 11 -
2.1 Recuperación de potencia en turbinas de vapor	- 11 -
2.2 Balance energético de vapor en un ingenio	- 14 -
2.2.1 Requerimientos de vapor	- 16 -
2.2.2 Balance energético de vapor. Desarrollo	- 18 -
2.2.3 Importancia de una buena condición de operación en el balance energético	- 20 -
III. MARCO TEÓRICO	- 23 -
3.1 Turbinas de vapor	- 23 -
3.1.1 Clasificación	- 24 -
3.1.2 Turbina de acción	- 26 -
3.1.3 Perdidas de energía	- 33 -
3.1.4 Empuje axial	- 35 -
3.2 Descripción de la turbina Elliott modelo DYR	- 35 -
3.2.1 Componentes principales	- 36 -
3.2.2 Holguras y ajustes	- 43 -
3.2.3 Instrucciones generales	- 51 -
3.2.4 Indicaciones generales sobre operación y mantenimiento	- 64 -
3.3 Análisis de vibraciones. Introducción	- 68 -
3.3.1 Generalidades	- 69 -
3.3.2 Tipos de vibraciones	- 71 -
3.3.3 Unidades para medición de nivel de vibración	- 72 -

3.3.4 Ubicación de puntos para medición	- 74 -
3.3.5 Evaluación del estado de la máquina	- 75 -
IV. INVESTIGACIÓN PROPUESTA	.- 77 -
4.1 Caracterización del sitio	- 77 -
4.2 Información disponible	- 80 -
4.2.1 Disminución de potencia	- 80 -
4.2.2 Aumento del consumo de vapor	- 81 -
4.2.3 Vibración excesiva	- 83 -
4.2.4 Inspección realizada en la turbina de vapor	- 83 -
4.2.5 Análisis de la información	- 84 -
4.3 Metodología	- 87 -
4.4 Resultados	- 91 -
4.5 Discusión de resultados	- 93 -
V. CONCLUSIONES	- 99 -
VI. RECOMENDACIONES	.- 101 -
VII. BIBLIOGRAFIA	.- 103 -
VIII. ANEXOS	

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Proceso de producción energético en un ingenio azucarero	14
2	Turbina Elliott instalada en el molino de un ingenio azucarero	16
3	Esquema de una central eléctrica con turbina de vapor	24
4	Tipos de etapas en turbinas de vapor	26
5	Esquema típico de una tobera	27
6	Esquema del principio de operación en una turbina Elliott	29
7	Esquema del aumento de altura de los álabes en una turbina	30
8	Tipos de perfiles de álabes	31
9	Esquema típico de una tobera	32
10	Diagrama de la eficiencia de una tobera	33
11	Diagrama de operación económica de una turbina	35
12	Esquema de una turbina Elliott DYR	36
13	Carcasas	37
14	Sellos de vapor	37
15	Anillo de toberas	38
16	Chumaceras y pedestales	39
17	Mecanismo de sobrevelocidad	40
18	Ubicación del sistema de gobernación y sobrevelocidad	41
19	Esquema y fotografía de un rotor de turbina	42
20	Esquema de la caja de admisión de vapor	43
21	Diagrama de holguras en frío para turbinas Elliott modelo YR	44
22	Disposición de los tubos de vapor y escape que se recomienda	55
23	Caracterización de la onda de vibración	71
24	Gráficas de velocidad y aceleración de la vibración	73
25	Ubicación de los puntos para medición de vibración	74
26	Fotografía y esquema de los molinos de caña en un ingenio azucarero	77

27	Aspecto de la turbina al llegar al taller	78
28	Vista parcial de las instalaciones del taller Elliott en Guatemala	79
29	Turbina Elliott antes y después del mantenimiento	93

ÍNDICE DE TABLAS

I	Propiedades de lubricante para turbinas de vapor	57
II	Ordenamiento de la información	89

GLOSARIO

- **Álabe:** elemento con superficie aerodinámica cuya función es imprimir o recibir energía de un fluido, o simplemente cambiar la dirección del mismo.
- **Babit:** aleación de metales suaves que ayuda a minimizar la fricción.
- **Bagazo:** Material sólido y fibroso subproducto de la molienda de la caña de azúcar; se utiliza como combustible para generar energía.
- **Caldera:** Equipo cuya función principal es calentar agua o cuando supera la temperatura de ebullición, genera vapor, a partir de la absorción de calor producido por la combustión de un combustible.
- **Chumacera:** forma técnica de denominar a los cojinetes antifricción o cojinetes de deslizamiento.
- **Diafragma:** Sección de álabes estacionarios utilizados en turbinas con escalonamientos de presión o Rateau.
- **Entalpía:** energía interna contenida en el vapor.
- **Etapá:** es la pareja conformada por un conjunto de toberas o álabes fijos y un conjunto de álabes móviles; en ella existe una caída de presión.
- **Estator:** está conformado por un conjunto de álabes o toberas que están estáticas en el sistema y generalmente están unidas o fijadas al cuerpo o carcasa de la máquina,
- **Rotor:** es el conjunto de álabes móviles que forman parte de una turbina o de un compresor axial o radial y que giran apoyados en un eje.
- **Tobera:** ducto con área de sección transversal uniformemente variable en el cual se acelera un flujo de vapor o gas, transformando su energía potencial manifestada en alta temperatura y presión en energía cinética.

- **Turbina de vapor:** Máquina que transforma la energía contenida en un flujo de vapor de agua en energía mecánica.
- **Vapor:** Fase gaseosa del agua.
- **Vapor de escape:** Vapor que fue utilizado por una turbina y que ya no cuenta con la presión original, por haber cedido parte de su energía.
- **Vapor directo:** Vapor que sale de la caldera y que circula con una alta presión.

INTRODUCCIÓN

La tendencia actual de las compañías, independiente del sector productivo o de servicios en el que se encuentre, gira en torno a cómo alcanzar el siguiente nivel de productividad, ahorrando costos, mejorando eficiencias y calidad, y todo esto como respuesta al desarrollo de una economía globalizada y de los tratados de libre comercio actuales.

En muchas empresas se consume gran cantidad de recursos, especialmente económicos, en la reparación de máquinas. Uno de los campos en el cual existe oportunidad para disminuir costos, ayudar a mejorar la eficiencia y la calidad, es el área de mantenimiento. Esto implica la búsqueda de alternativas y/o nuevas técnicas que ofrece la tecnología moderna, para mejorar la eficiencia, durabilidad y confiabilidad de las máquinas.

El enfoque actual del mantenimiento en las empresas debería ser la maximización del tiempo entre reparaciones y minimización o eliminación de las reparaciones no programadas, y con ello, minimizar el inventario de repuestos. Sin embargo se mantiene la idea de reparar un equipo cada vez que falle, sin proyectarse más allá y analizar porque falló dicha máquina.

Un adecuado proceso de inspección acompañado de mantenimiento integral permitirá analizar los desperfectos y encontrar una solución para que no se vuelva a repetir la falla, y para ello es indispensable corregir aspectos que a simple vista no se pueden observar o detectar.

Posteriormente, un adecuado monitoreo de las condiciones de operación permitirá ir evaluando cuando dicha máquina necesitará un nuevo mantenimiento. Cabe mencionar que dicho monitoreo puede ser llevado a cabo con diversos métodos, uno de ellos puede ser una inspección rutinaria que implique observar, escuchar, sentir e inclusive oler, cuando una máquina se encuentra operando y

mediante un adecuado registro de las condiciones detectadas, poder descubrir variantes que nos indiquen que algo está empezando a deteriorarse. Por otro lado encontramos métodos mucho más elaborados como la termografía, los análisis de aceites, el análisis de vibraciones mecánicas, ultrasonidos, etc. Estos métodos pueden servir como un complemento a la inspección rutinaria antes mencionada y de esa manera llevar un mejor control de las máquinas.

En este trabajo, se propuso evaluar la condición de operación de una turbina de vapor, como paso inicial del mantenimiento integral, y luego realizar una inspección y trabajos adecuados para tener como resultado una máquina que asemeje las condiciones de una máquina recién fabricada.

Posteriormente, se efectuaría una segunda evaluación de la condición de operación y determinar que cambios se pueden percibir, y para la turbina de vapor en estudio se propuso analizar cambios en los niveles de vibración mecánica, desarrollo de potencia y consumo de vapor. Como podrá observarse en el contenido del presente trabajo, encontramos cambios bastante positivos por lo que al final se recomienda que este proceso de mantenimiento debe ser realizado en todo el conjunto de turbinas para mejorar la condición de operación en general de la planta y ayudar a disminuir los costos operativos que ayudarán a alcanzar mejores niveles de productividad y eficacia.

I. ASPECTOS GENERALES

1.1 Generalidades

El propósito de este documento, es mostrar que las condiciones de operación de una máquina, se pueden mejorar con la aplicación de un mantenimiento integral, sobre todo porque muchas veces al realizar mantenimiento a las máquinas, solo se busca solucionar la o las dificultades o inconvenientes del momento, y se ignora por completo otras evidencias de futuros problemas o fallas en progreso, y más adelante vuelven a ocurrir problemas que bien pudieron evitarse si en la intervención o mantenimiento anterior, se hubiera inspeccionado, analizado y corregido esos inconvenientes que se evidenciaban en la máquina.

Esta situación se nos hace muy familiar en nuestro medio y ello trae como consecuencia las intervenciones de emergencia por parte de los departamentos de mantenimiento, donde nuevamente solo se busca solucionar el inconveniente del momento, esperando que la máquina no vuelva a producir problemas futuros, pero lo cierto es que en el momento menos esperado, la máquina vuelve a fallar.

Se tiene la creencia, en la mayor parte de la industria guatemalteca, que es preferible no invertir en mantenimientos caros, porque resulta más económico arreglar el problema actual o conforme se vayan presentando.

Sin embargo, esta situación que no resulta del todo falsa puesto que en algunos casos si podría aplicar, resulta ser mucho más cara que realizar un mantenimiento integral, porque además de un consumo mayor de repuestos (debido a los constantes problemas) y horas extras del personal de mantenimiento, se ocultan costos que no necesariamente están ligados al mantenimiento, tales como producción no generada, inventario de repuestos más grande (dinero pasivo) y horas hombre de las áreas de producción pagadas pero

no trabajadas, todo eso sin olvidarnos, que consecutivas fallas en una máquina que no son corregidas desde la raíz, pueden conducirnos a una falla catastrófica que resultará costosa, porque puede ser que se requieran repuestos caros o hasta el reemplazo de la máquina misma.

Por lo tanto, en este trabajo se busca demostrar que la realización de un mantenimiento integral, basado en la correcta inspección y el conocimiento de la operación de la máquina, aseguran una mejora en la condición de operación y se verá reflejado principalmente al mejorar la eficiencia y evitar paros no programados.

Este concepto es el que se aplicó en una turbina de vapor marca Elliott modelo DYR, que sirve como marco de aplicación en este trabajo, y donde se busca demostrar las ventajas que se produjeron.

1.2 Planteamiento del problema

La actividad central del presente estudio, se enfoca en la realización del mantenimiento a una turbina de vapor marca Elliott, modelo DYR, con el propósito de mejorar las condiciones de operación con que trabajaba dicha turbina y analizar su impacto en los costos de operación. Esta turbina de vapor se encuentra instalada en un ingenio azucarero de la costa sur, y opera como máquina motriz de un molino de caña.

La época de producción o zafra en un ingenio, es una época que se ve limitada a unos meses por año (aproximadamente 5 a 6 meses), por ello la exigencia de que los equipos y máquinas necesarias para la producción se encuentren con disponibilidad máxima y eficiencia aceptable durante ese periodo, para poder lograr las metas de producción definidas antes de cada zafra, dicho en otras palabras, los paros en producción son inadmisibles y una vez finalizado el periodo de producción, se entra al periodo de reparación durante el cual se

aprovecha a realizar mantenimiento general a la maquinaria y donde esta debe quedar en la mejores condiciones para la siguiente época productiva.

En el caso de la turbina de vapor que será objeto de análisis, se tiene referencia que durante la zafra previa al mantenimiento realizado, dicha turbina presentaba problemas en operación que continuamente obligaba a salir de operación la turbina, lo que ocasionaba acumulación de producto en el molino y ocasionalmente, tenían que salir de operación algunos otros molinos, los cuales se encuentran en línea con el molino en mención, provocando retrasos en la producción y gastos relacionados con la misma. Los problemas principales que se evidenciaban en la turbina de vapor era la disminución de potencia, aumento del consumo de vapor y vibración excesiva.

La pérdida de potencia se reconoce en función del historial de operación del molino, puesto que en años anteriores dicho molino con la misma turbina de vapor como máquina motriz y las mismas condiciones de vapor, registra una capacidad de molienda mayor.

El aumento del consumo de vapor se refleja en las fugas de vapor existente, y luego de la inspección realizada a la turbina desarmada, se determinó que el estado de algunos componentes, tales como álabes de la turbina y anillo de toberas principalmente, incidían en un mayor consumo de vapor.

Respecto de la vibración excesiva, el análisis de vibraciones efectuado indicaba la presencia de desbalance, ligero desalineamiento con el reductor y holgura mecánica, probablemente producida por desgaste en los cojinetes de deslizamiento. El inconveniente con la vibración radica en que contribuye al desgaste mismo de los cojinetes de deslizamientos, fatiga elementos de la turbina y además provocaba que se activara el mecanismo de disparo de la turbina, el cual debe activarse únicamente por sobrevelocidad.

El mantenimiento de esta turbina en años anteriores, era llevado a cabo por personal del mismo ingenio, y aunque existe una innegable voluntad por realizar el mantenimiento por parte del personal del ingenio, factores como desconocimiento de los correctos procesos de trabajo, principios de operación y funcionamiento de las turbinas de vapor, así como la ausencia de manuales del fabricante, hacían que el mantenimiento no fuera del todo adecuado e iban en detrimento de la eficiencia con que operaba la turbina y deteriorando su estado.

El buen resultado del mantenimiento efectuado, produjo que durante años siguientes, fueran enviadas otras turbinas de vapor, para realizar el mismo proceso de mantenimiento.

1.3 Objetivos del trabajo

➤ General

Mejorar la condición de operación y analizar el impacto que pueda tener en los costos de operación, de una turbina de vapor Elliott modelo DYR, mediante un adecuado mantenimiento integral que involucra correcta inspección y procedimientos de trabajo, y posterior monitoreo de condición de operación.

➤ Específicos

1. Analizar las condiciones existentes, cuya influencia en la operación de la turbina hacen que su condición de operación no sea la adecuada.
2. Inspeccionar partes para determinar niveles de desgaste o daño para elaborar reportes de trabajo a realizar.
3. Definir que cambios o reparaciones se deben realizar en la turbina para mejorar su condición de operación.

4. Comparar las condiciones de operación antes y después de mantenimiento para determinar si las diferencias son positivas.
5. Investigar cuales son los costos de operación y que disminución puede obtenerse al mejorar la condición de operación.

1.4 Justificación del trabajo

En la competitividad de una compañía, normalmente juegan un papel importante, la calidad del producto, nivel de productividad y estructura de costos.

Hoy en día, mantener una ventaja competitiva implica exigencias crecientes en las técnicas productivas y organizativas. Por un lado los volúmenes de producción deben ser incrementados, exigiendo una alta disponibilidad de los equipos de producción, pero al mismo tiempo minimizar los costos operativos y deberán cumplirse obligaciones crecientes respecto a la seguridad operativa.

En el caso de los ingenios azucareros, es vital para ellos operar sin paros no programados, esto puede conseguirse de 3 formas:

- a) reemplazar los equipos ineficientes
- b) incrementar la cantidad de equipos críticos (redundancia)
- c) mejorar la capacidad de los equipos actuales

Reemplazar o incrementar la cantidad de equipos, significa una inversión elevada, además del costo del equipo y las modificaciones necesarias en planta, mientras que mejorar la capacidad de los equipos actuales, parece ser la opción más viable, aunque previo debe existir un análisis económico que respalde ésta opción y que se pueda contar con los elementos necesarios (repuestos).

Para el caso en específico de la turbina de vapor, reemplazar esta máquina significa invertir alrededor de 4 a 5 veces o hasta más del costo de reparación, es una de las razones por las cuales se decidió realizar el reacondicionamiento. Los objetivos del mantenimiento integral a esta turbina, son principalmente:

- incrementar la eficiencia,
- minimizar o evitar los fallos repentinos,
- extender la vida útil de la maquinaria y sus accesorios.

Al conseguir estos objetivos, indicará que la máquina se encuentra en óptimas condiciones para trabajar, resaltando el hecho de poder reducir tareas de mantenimiento de emergencia, tiempos muertos por paros imprevistos en producción, inventarios de repuestos, compras de repuestos de emergencia, traduciéndose esto en un ahorro de costos e incrementando la eficiencia de producción e indirectamente, maximizando la seguridad en las operaciones.

1.5 Alcance del trabajo

El alcance o delimitación del presente trabajo, será el proceso completo del mejoramiento de la condición de operación de la turbina de vapor Elliott modelo DYR, que es una turbina de acción de una etapa con 2 escalonamientos de velocidad (curtis).

Este proceso de mejora inicia cuando se realizó un análisis de las condiciones actuales de la turbina, siendo la fuente de información principal el análisis de vibraciones e información proporcionada por el área de operaciones del ingenio relacionada con la pérdida de potencia e incremento en consumo de vapor.

Las etapas siguientes, datan el trabajo de inspección realizado en la turbina cuando ya estaba en el taller de Elliott Guatemala, los resultados de la inspección y el reporte del trabajo a realizar en la turbina.

Luego se brinda información relacionada con la condición de operación y las variables involucradas en el análisis inicial que reportaban la pérdida de potencia, consumo de vapor y nivel de vibraciones mecánicas, para evaluar si existe mejora en la condición de operación de la turbina de vapor.

Por último, se discute sobre los costos involucrados en la operación de la turbina, cuyo propósito es evaluar si existen variantes entre las condiciones previas y posteriores al trabajo de mantenimiento, y por supuesto, verificar si estos cambios se deben a la nueva condición de operación y determinar si son positivos para la empresa.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Recuperación de potencia en turbinas de vapor

En los siguientes párrafos, se transcribe parte de los resultados de un estudio elaborado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE por sus siglas), para la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E. por sus siglas) en los años 1,995 y 1,996 relacionado con la importancia en la recuperación de potencia en turbinas de vapor.

El IIE fue creado por decreto presidencial del gobierno mexicano en diciembre de 1,975 y sus actividades consisten, principalmente, en llevar a cabo proyectos de investigación aplicada y desarrollo tecnológico para el sector eléctrico. El IIE también brinda servicios técnicos especializados y colabora con instituciones y empresas eléctricas de otros países.

La C.F.E. es la empresa mexicana que en general, transmite, distribuye y comercializa energía eléctrica, y que actualmente sirve aproximadamente un 80% del mercado mexicano (doméstico, comercial, industrial, agrícola, varios).

El estudio en mención indica que actualmente, los países demandan una óptima utilización de todos sus recursos y esto incluye también a las turbinas de vapor. El deterioro lento pero permanente de la trayectoria del flujo de vapor en una turbina causa cambios en la geometría original del sistema de álabes y en consecuencia disminuye la eficiencia y capacidad de transformación de potencia o generación, en las turbinas.

El estudio incluye un análisis para cuantificar las pérdidas de potencia de las turbinas de vapor, ocasionados por problemas muy variados tales como: depósitos, corrosión, erosión por partículas sólidas o húmedas, rugosidad, daños mecánicos, etc.

¿Cómo se realizó el estudio? Para llevar a cabo estos cálculos fue necesaria la obtención de un diseño térmico de las unidades, balances térmicos y pruebas de operación de las unidades, así como las mediciones en sitio de la geometría actual de la turbina.

Posteriormente, los datos se alimentaron a un sistema de cómputo con el objetivo de cuantificar las diferencias entre la eficiencia y potencia actual con respecto a la de diseño, seguido de un análisis para determinar la o las causas de la disminución de potencia para luego realizar una etapa de mantenimiento que incluye reparación y/o reemplazo de partes.

Finalmente, se realizaron pruebas en operación a las turbinas de vapor, después del mantenimiento.

Los resultados de este estudio (IIE, 1996) indican que las principales causas del derrateo o disminución de potencia en una turbina de vapor son:

- desgaste de las toberas del anillo de toberas, debido a erosión por partículas sólidas
- desgaste en diafragmas o segmentos de álabes estacionarios reversibles
- desgaste y/o deterioro marcado en todo el sistema de sellos
- depósitos en los álabes estacionarios
- erosión en los álabes móviles
- holguras excesivas en chumaceras

El desgaste en las toberas, hace que se modifique la sección transversal, con lo cual la distribución de presiones y velocidades es diferente a la de diseño. Esto ocasiona una disminución en la capacidad de transformación de potencia.

Los desgastes en los álabes estacionarios y móviles, producen similar efecto que en las toberas, pero principalmente en la capacidad de aprovechamiento de la energía del vapor por parte de los álabes móviles.

En los álabes estacionarios pero principalmente en los álabes móviles, la erosión, sobre todo en la parte de la entrada del flujo de vapor, provoca un incremento excesivo en la rugosidad, ocasionando pérdidas debido al aumento de la capa límite y aumento de la velocidad. La erosión produce además, pérdida de material que se traduce en desbalance del rotor.

Los depósitos en los álabes estacionarios, aumenta la rugosidad creando turbulencias, disminuye el área del canal que existe entre álabes, cambia las dimensiones, provoca corrosión y disminuye el flujo de vapor y con consiguiente, la potencia de la turbina.

El desgaste en los sellos provocará un incremento en la fuga de vapor, y probablemente vapor que no realizó ningún trabajo, llegando a producir pérdida de potencia de hasta un 5% de la potencia total, con sus consecuencias económicas.

Estas condiciones son las que imperan en la mayoría de turbinas de vapor en los ingenios azucareros, lo que se traduce en pérdida de potencia y eficiencia, y ello ocasionado por diversos factores que entran en juego tanto en el mantenimiento de la turbina de vapor como en las condiciones bajo las que se produce o genera el vapor en las calderas tales como la calidad del agua de alimentación, eficiencia de la combustión y de la transferencia de calor, estado de los tubos de las calderas, etc.

Finalmente, según el IIE (1996), cuantificando la potencia recuperada se manifiesta que el costo de mantenimiento (reparación y/o cambio de componentes) es inferior al costo de combustibles adicionales que antes se necesitaba para generar más vapor y que la turbina pudiera desarrollar la potencia

mínima requerida. Por otro lado, ahora con una cantidad inferior de vapor consumido se desarrolla la misma potencia o una potencia mayor en la turbina de vapor.

2.2 Balance energético de vapor en un ingenio

Uno de los aspectos importantes para el funcionamiento de una industria, es la energía necesaria para su operación. Específicamente en la industria del azúcar, se necesitan grandes cantidades de energía mecánica, eléctrica y calorífica, para poder realizar de manera económica y eficiente la elaboración del azúcar.

La industria azucarera cuenta con la ventaja de que la producción de energía calorífica, se realiza mediante la combustión de bagazo, que es un subproducto de la molienda de la caña y que no tiene utilidad luego del proceso de molienda. Este bagazo se quema en calderas para generar vapor de agua, que posteriormente es utilizado como fluido de trabajo para el accionamiento de turbinas de vapor y para el proceso de fabricación del ingenio.

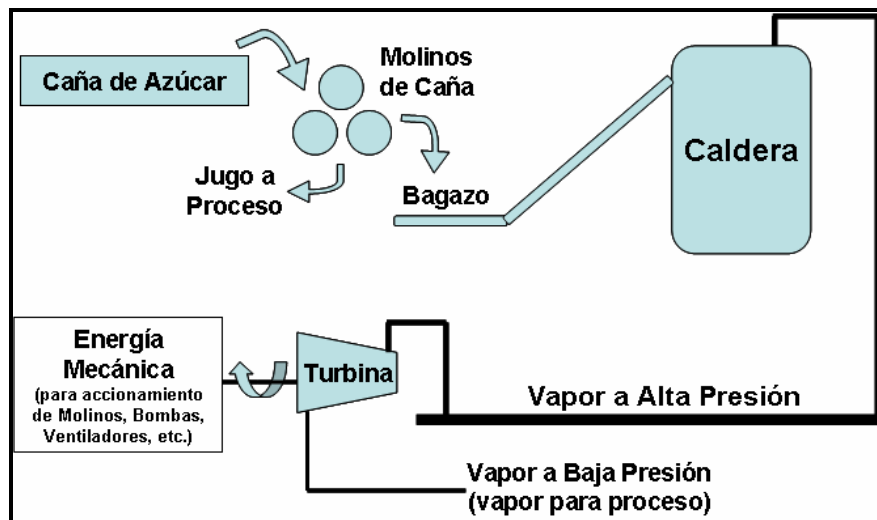


Figura 1. Proceso de producción energético en un ingenio azucarero.

En otras palabras, la energía calorífica producida por la combustión del bagazo, es transportada por el vapor de agua, el cual a su llegada a las turbinas es transformada en energía mecánica, la que posteriormente es utilizada para accionar otras máquinas del mismo ingenio como bombas de agua, molinos, ventiladores de calderas, etc., o para el accionamiento de generadores eléctricos donde la energía mecánica es transformada en energía eléctrica.

Para analizar la situación del consumo de vapor, es importante la realización de un análisis del balance energético. De acuerdo con Landaverry (1,996), para el balance energético básicamente se debe considerar la cantidad de vapor producido por el generador de vapor o caldera, y la cantidad de vapor que utilizarán los equipos consumidores.

Entre los equipos que componen el conjunto de consumidores, se realiza una segunda clasificación con base a los consumidores de alta presión y consumidores de baja presión.

En los consumidores de vapor de alta presión encontramos principalmente a las turbinas de vapor para accionamiento mecánico y turbinas de vapor para generación eléctrica, secadoras de azúcar y condensadores-eyectores de vapor, mientras que entre los consumidores de vapor de baja presión se encuentra: deareador o desgasificador, calentadores de jugo, evaporadores y tachos.

Las turbinas de vapor, son máquinas que utilizan el vapor para la realización de un trabajo útil, siendo este trabajo o energía mecánica aprovechada para el accionamiento de algún equipo como los molinos, bombas, ventiladores, girador eléctrico, etc. La forma en que se produce o se genera el trabajo en una turbina de vapor, se describe en el capítulo siguiente de este informe. La fotografía siguiente, muestra una turbina elliott utilizada como máquina motriz en un molino de un ingenio azucarero.

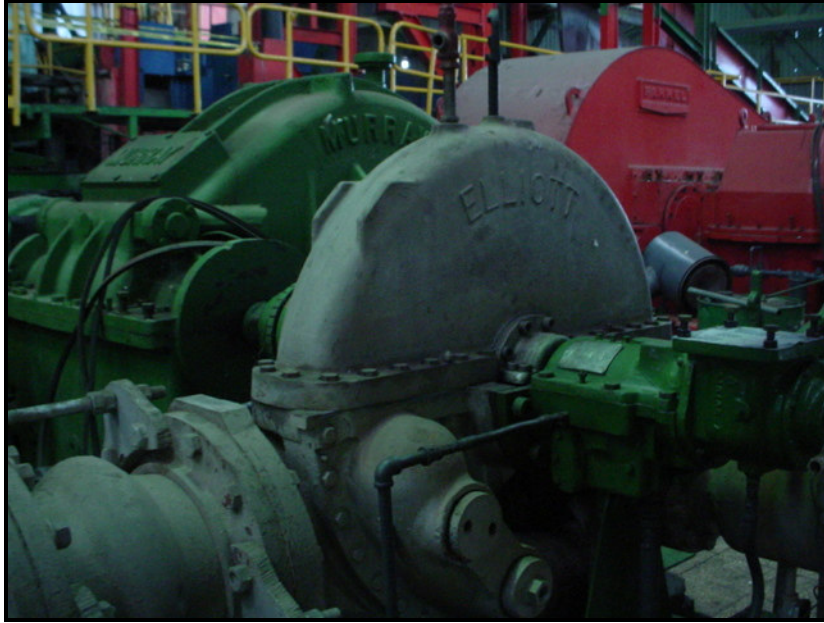


Figura 2. Turbina Elliott instalada en el molino de un ingenio azucarero.

En relación a los equipos consumidores de vapor, tales como secadoras de azúcar, evaporadoras, desgasificador, etc., no se da mayor descripción de ellos, ya que no es el objetivo de este trabajo, sin embargo pueden consultarse en libros de texto, manuales o informes de ejercicio profesional supervisado (EPS), como por ejemplo, el informe de EPS del Ing. César Adalberto Landaverry Villeda.

Lo que si se incluye, son los requerimientos de vapor que necesitan cada uno de estos equipos, los cuales han sido extraídos del trabajo de análisis del balance energético del Ingenio Los Tarros, del Ing. Landaverry (1996).

2.2.1 Requerimientos de vapor

El vapor es el medio más económico y eficiente para transferir calor a las unidades consumidoras, debido a que no es más que agua en estado gaseoso, lo que lo hace fácilmente transportable y de contener una gran capacidad calorífica. Debido a las ventajas antes descritas, el vapor no ha sido desplazado y sigue siendo uno de los medios más utilizados para la generación de energía en la industria en general.

La cantidad de vapor requerida para la operación de un ingenio azucarero, es la consumida por los diferentes equipos que participan en el proceso de fabricación de azúcar. Se divide al vapor requerido en 3 clases:

- a) Vapor directo o de alta presión: es el vapor generado por una caldera a una presión aproximada de 240 PSIA y una temperatura de 500 °F. Un aspecto muy importante, el cual hay que considerar, es la pérdida o caída de presión del vapor en las tuberías que conducen el vapor desde las calderas hasta los equipos consumidores de alta presión, los cuales como recordaremos son: las turbinas de vapor, secadora de azúcar y eyectores para producción de vacío.
- b) Vapor de escape: se denomina vapor de escape, al vapor que sale de las turbinas y en el que se ha producido un proceso de expansión. Este vapor de escape, circula a una presión que oscila entre los 20 a 30 PSIA. Entre los equipos que utilizan vapor de escape para su operación encontramos: calentadores de jugo, rectificadores, evaporadores y dereadores o desgasificadores entre otros.

Lo ideal en un ingenio, sería que se cumpliera la siguiente ecuación: cantidad de vapor de escape requerido para el proceso de producción de azúcar, es igual a la cantidad de vapor de escape o baja presión que sale de las turbinas.

Entonces, si existe una alta demanda de vapor de escape y no es suficiente el suministrado por el conjunto de turbinas, se realiza una inyección de vapor directo a escape por medio de una válvula. Por el contrario, si la demanda de vapor de escape es inferior a la que sale de las turbinas, el vapor de escape excedente es liberado a la atmósfera, lo que constituye una pérdida de energía.

- c) Vapor vegetal: es llamado así porque es un vapor que resulta de la evaporación del agua que se encuentra diluida en el jugo de caña de azúcar. Este proceso se genera en el proceso de evaporación en el múltiple efecto, principalmente en la primera etapa, y circula en presiones entre los 17 y 21 PSIA.

Entre los equipos que utilizan este vapor tenemos: calentador primario, evaporadores a partir de la segunda etapa hasta la quinta etapa (que componen el múltiple efecto en su totalidad) y en los tachos para proceso de cocción.

El vapor de escape generado, luego de haber sido utilizado en los diversos procesos de fábrica, tiende a la condensación ya que en muchos de los procesos involucra intercambiadores de calor, y luego es conducido a los depósitos de agua de reserva donde nuevamente es enviado a la caldera por medio de bombas.

2.2.2 Balance energético de vapor. Desarrollo

Con base a la información de Landaverry (1,996), se tienen los siguientes cálculos:

- **Vapor directo o de alta presión**

a) conjunto de turbinas (al 90% de carga):	44,003.55 kilogramos / hora
b) secadora de azúcar (operando al 90%):	1,083.17 kilogramos / hora
c) conjunto de Jet de vacío y accesorios varios operando al 50% (torres de azufre, soplado de polvillo:	2,546.56 kilogramos / hora
d) lavado de equipos y pérdidas (50%):	4,413.45 kilogramos / hora
Total de vapor directo consumido:	52,046.72 kilogramos / hora

- **Vapor de escape**

a) calentador secundario o rectificador:	1,503.86 kilogramos / hora
b) primer efecto en evaporación:	38,279.74 kilogramos / hora
c) deareador (75% de operación):	2,087.50 kilogramos / hora
Total de vapor de escape consumido:	41,871.11 kilogramos / hora

Los anteriores cálculos nos indican que para el funcionamiento del ingenio, se necesitan 41,871 kilogramos por hora de vapor de escape, y tenemos que las turbinas consumen 44,003 kilogramos por hora de vapor de alta presión, el cual luego es enviado como vapor de escape a fábrica para el proceso de producción, tenemos por lo tanto, en condiciones ideales un excedente de 2,131 kilogramos por hora de vapor de escape, el cual sin duda alguna es enviado a la atmósfera.

Siempre de acuerdo con Landaverry (1,996), existe un 5% de pérdida de vapor de escape en las turbinas (fugas en sellos y otros) y un 3% de pérdida de vapor de escape en tuberías que conducen el vapor de las turbinas al área de producción de fábrica, es decir un total de 8% de pérdidas, lo que significa que de los 44,003 kilogramos por hora de vapor de escape producido en las turbinas, un 92% es conducido al proceso de producción, lo que equivale a 40,482 kilogramos por hora.

En este punto observamos que existe un déficit aproximado de 1,390 kilogramos por hora de vapor, lo que tiene que compensarse con inyección de vapor directo a las tuberías de vapor de escape necesario para el proceso de producción de azúcar. En conclusión, el ingenio tiene un consumo total de vapor de 53,434.56 kilogramos por hora de vapor.

Según la información de fábrica de la caldera de vapor (Landaverry, 1996), la caldera de éste ingenio tiene una capacidad de producción de vapor de

54,431.08 kilogramos por hora de vapor, lo cual indicaría que tiene la capacidad necesaria para satisfacer las necesidades de vapor para el ingenio.

Otro punto importante radica en que un ingenio azucarero puede producir la energía calorífica para transformar agua en vapor, utilizando como combustible el bagazo de la caña. Ahora bien, la producción de vapor en el ingenio al que se hace referencia en el trabajo de Landaverry (1996), indica que en promedio la caldera de vapor genera 48,868.93 kilogramos por hora, debido a factores tales como el porcentaje de humedad y porcentaje fibra, que deben estar entre 48 a 50% y 12 a 13%, respectivamente, por lo que el ingenio se verá en la necesidad de complementar la generación de vapor con el apoyo de otro combustible, por lo general un combustible derivado del petróleo.

2.2.3 Importancia de una buena condición de operación en el balance energético

El bagazo de la caña, que es un subproducto del paso de la caña por los molinos, puede ser considerado como un desperdicio, sin embargo tiene una gran utilidad para el proceso debido a su utilización como combustible en las calderas para la generación de vapor. Esto significa que el costo de producción de vapor utilizando bagazo en las calderas, es prácticamente cero.

Por esa razón, cuando es insuficiente la producción de vapor con bagazo, y se ve la necesidad de emplear un combustible derivado del petróleo (bunker por lo general), el costo de producción del vapor se encarece.

Lo anterior significa que si se mantiene el consumo de vapor en el régimen ideal en todos los procesos (generación de potencia y fabricación), existirá un adecuado balance que hará que no se utilice otro combustible aparte del bagazo. Sin embargo este equilibrio está lejos de alcanzarse, debido en parte a la edad de los equipos con se cuenta en los ingenios azucareros que propicia una

disminución en la eficiencia, y que a pesar del mantenimiento del que son objeto cada año, no se logra mejorar del todo la condición de operación, lo que se traduce en un aumento del consumo del vapor. Esto aplica en especial a las turbinas de vapor.

Entonces, la combinación de factores como los porcentajes de fibra y humedad en el bagazo, más la disminución de eficiencia de los equipos en general, obligan a la utilización de bunker, lo que encarece el costo de producción de vapor y en general el costo de producción del azúcar.

Los argumentos planteados anteriormente, dan apertura a la premisa de que un adecuado mantenimiento que mejora la condición de operación y con ello la mejora de la eficiencia de las máquinas, ayudará a disminuir el consumo de vapor, evitando la utilización de bunker y disminución del costo operativo.

Por lo tanto, una turbina de vapor con condición de operación adecuada en comparación con una turbina con condición de operación no adecuada, consumirá una cantidad inferior de vapor, operará de una manera más eficiente y generará la potencia requerida. Esto representará una continuidad en operación, evitar paros no programados, y contribuirá a la no utilización de bunker en la generación de vapor.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 Turbinas de vapor

Una **turbina de vapor** es una turbomáquina que transforma la energía de un flujo de vapor de agua en energía mecánica.

Este vapor se genera en una caldera, de la que sale en unas condiciones de elevada temperatura y presión. En la turbina se transforma la energía interna del vapor en energía mecánica que típicamente es aprovechada por un generador para producir electricidad, o para mover máquinas diversas tales como molinos, bombas, ventiladores, compresores, etc.

Las turbinas son máquinas de flujo permanente, en las cuales el vapor entra por las toberas y se expansiona hasta una presión más pequeña, de modo que el chorro de vapor adquiere una gran velocidad. Este vapor a alta velocidad es el que hace que los álabes móviles de la turbina giren alrededor de su eje al incidir sobre los mismos, ya que parte de la energía cinética de este chorro es cedida a los álabes de la turbina. Por lo general una turbina de vapor posee más de un conjunto tobera-álabe (o etapa), para aumentar la velocidad del vapor de manera gradual. Esto se hace ya que por lo general el vapor de alta presión y temperatura posee demasiada energía térmica y, si ésta se convierte en energía cinética en un número muy reducido de etapas, la velocidad periférica o tangencial de los discos puede llegar a producir fuerzas centrífugas muy grandes causando fallas en la unidad.

En una turbina se pueden distinguir dos partes, el rotor y el estator. El rotor está formado por ruedas de álabes unidas al eje y que constituyen la parte móvil de la turbina. El estator también está formado por álabes, no unidos al eje sino a la carcasa de la turbina.

Las turbinas de vapor se emplean principalmente en las centrales eléctricas de generación de energía eléctrica, cuyos componentes principales son:

- Caldera: su función es la de generar el vapor necesario para el funcionamiento de la turbina.
- Turbina: es la encargada de utilizar la energía del vapor de la caldera y transformarla en trabajo útil para mover un generador eléctrico u otra máquina.
- Condensador: se emplea para condensar el vapor que sale de la turbina.
- Bomba: usada para alimentar la caldera con el agua que proviene del condensador.

Figura 3. Esquema de una central eléctrica con turbina de vapor.

3.1.1 Clasificación

Las turbinas de vapor son turbomáquinas en las que sólo se efectúa el proceso de expansión. Si bien existen turbinas a vapor del tipo radial, la inmensa mayoría son del tipo axial.

El fluido de trabajo es comúnmente el vapor de agua, por razones económicas y técnicas. En comparación con otras máquinas (alternativas a vapor, de combustión interna) ofrecen una mayor relación potencia/tamaño.

Se les puede clasificar según el salto térmico y según el principio operativo. Según el salto térmico se clasifican en:

- Turbinas de condensación: son las de mayor tamaño, utilizadas en centrales térmicas. La presión de descarga puede ser inferior a la atmosférica debido a la condensación del vapor de salida.
- Turbinas de descarga atmosférica: son generalmente de baja potencia, antieconómicas si utilizan agua tratada. No utilizan condensador de salida.
- Turbinas de contrapresión: se utilizan como expansoras para reducir la presión del vapor generando al mismo tiempo energía mecánica y luego descargan el vapor a una presión aún elevada, para ser utilizado en procesos industriales.

Según el principio operativo o atendiendo a donde se realiza la expansión del vapor, se distinguen dos tipos de turbinas: de acción o de reacción.

- En las **turbinas de acción** la expansión del vapor se realiza en el estator (comúnmente en las toberas) perdiendo presión y aumentando su velocidad hasta pasar al rotor donde la presión se mantendrá constante y se reducirá su velocidad al incidir sobre los álabes.
- Por el contrario, en las **turbinas de reacción** el vapor se expande en el rotor, manteniéndose la presión y velocidad constantes al pasar por el estator, que en este caso sólo sirve para dirigir y orientar el flujo de vapor.

Las turbinas de acción y de reacción, pueden encontrarse tanto de una como de varias etapas y la diferencia fundamental es que en las turbinas de acción no hay cambio de presión en la rueda móvil, obteniéndose el intercambio de energía por el cambio de velocidad absoluta del fluido. La siguiente gráfica ilustra las diferencias entre las etapas de acción y reacción:

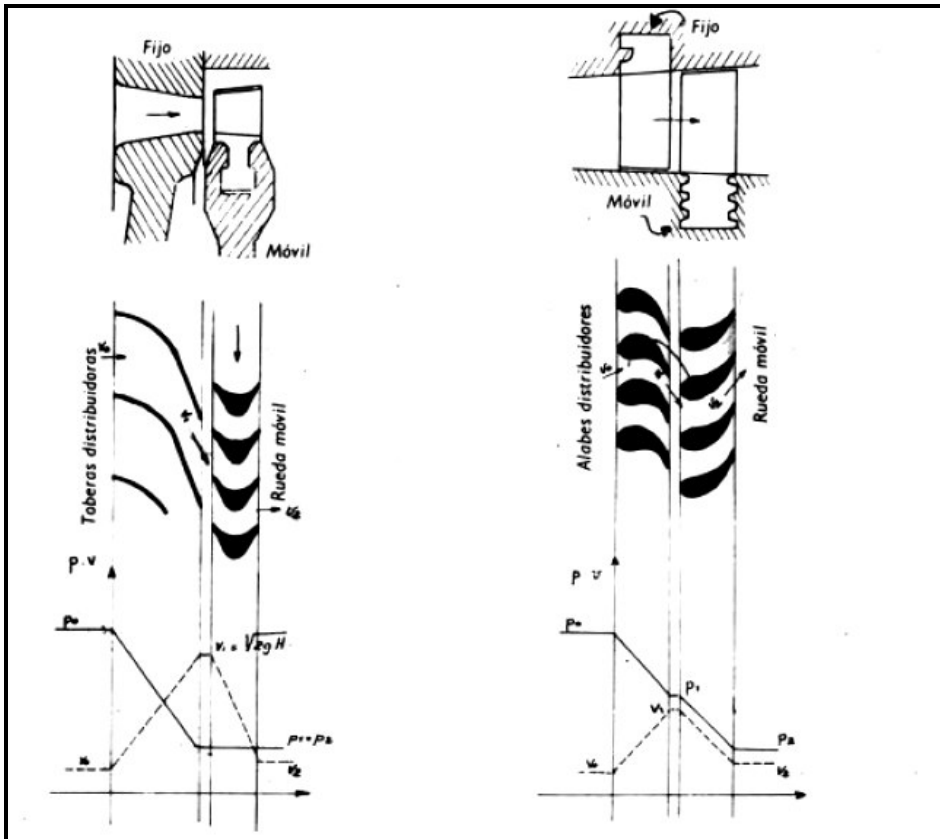


Figura 4. Tipos de etapas en turbinas de vapor.

En la gráfica anterior, a la izquierda podemos observar el funcionamiento del álabe de acción y a la derecha el del álabe de reacción. En ambas gráficas, p y v son la presión y la velocidad del vapor en los distintos puntos del álabe.

El texto anterior, nos permite definir a la turbina Elliott modelo DYR como una turbina de acción, una etapa con 2 escalonamientos de velocidad, por lo tanto, este marco teórico continuará orientado hacia este tipo de diseño de turbina.

3.1.2 Turbina de acción

Las turbinas de vapor de acción, también conocidas como de impulso, aprovechan la energía cinética del fluido (en este caso vapor), para producir energía mecánica o trabajo. Dependiendo de su diseño, las turbinas de acción

constan de una o varias etapas y cada etapa esta constituida por un estator y un rotor.

- **Principio de funcionamiento**

El flujo a través de los álabes de la etapa de acción se produce de tal forma que su presión es prácticamente la misma a la entrada y a la salida de los álabes. Sin embargo, se produce un cambio en la dirección del flujo que es aprovechado para hacer girar el rotor.

La primera etapa de las turbinas de acción consta de un estator conformado por un conjunto de toberas o un anillo de toberas, en las cuales la alta presión y baja velocidad del vapor a la entrada se transforma en baja presión y alta velocidad a la salida. Las toberas están dispuestas de tal forma que entregan el vapor a los álabes móviles con un ángulo definido.

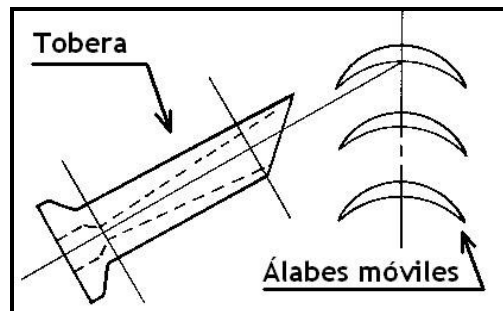


Figura 5. Esquema típico de una tobera.

Dependiendo del diseño, el estator de las etapas sucesivas puede estar constituido por álabes fijos que cambian la dirección del flujo para entregarlo con el ángulo adecuado al siguiente grupo de álabes móviles o por álabes fijos que actúan como toberas, que además de cambiar dirección al vapor, aumentan su velocidad y disminuyen la presión.

Los escalonamientos de las turbinas tienen por objeto disminuir la velocidad del rotor conservando una velocidad de los álabes próxima al valor óptimo con relación a la velocidad del chorro de vapor que sale de la tobera. La velocidad de un chorro de vapor puede ser muy elevada, dependiendo de la presión y 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 rpm.

Para elevadas velocidades de operación, se exigiría un reductor mecánico de dimensiones desproporcionadas, lo que haría poco rentable el uso, además del elevado costo que implicaría su construcción. Los dos tipos de escalonamientos utilizados corrientemente son: escalonamiento de presión y escalonamiento de velocidad.

En el escalonamiento de presión, 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 del rotor. 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 de resultante del vapor en tantos grupos de álabes como sean necesarios. Este método de escalonamiento se conoce como principio de Curtis. La capacidad de transformación de energía del escalonamiento Curtis es más grande que la del escalonamiento Rateau con menos escalonamientos y con construcción más económica, sin embargo el principio Rateau es más eficiente.

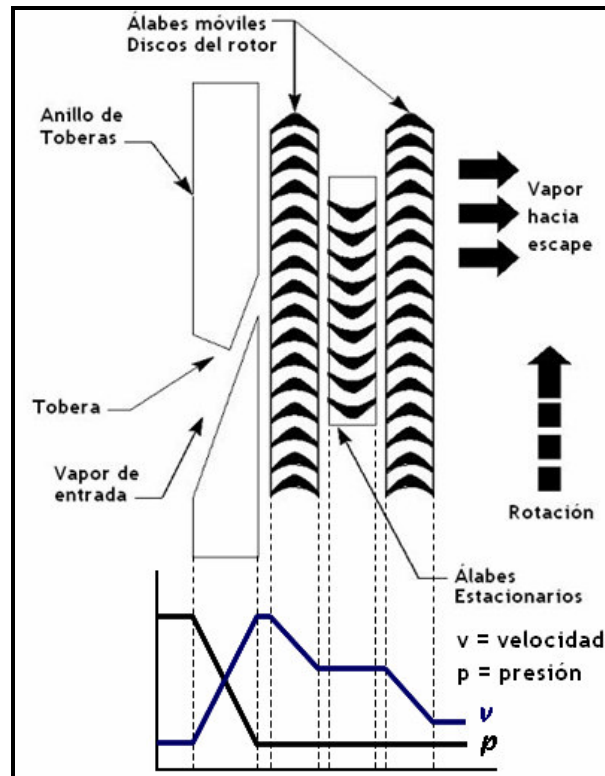


Figura 6. Esquema del principio de operación en una turbina Elliott.

- **Altura de los álabes**

A medida que el vapor o fluido de trabajo pasa a través de los álabes, su velocidad disminuye gradualmente. Con el fin de compensar esta disminución y mantener un flujo estable, el área debe incrementarse a través de su recorrido de acuerdo con la ecuación de continuidad y para lograrlo se aumenta la altura del álabes.

La ecuación de continuidad o conservación de masa es una herramienta muy útil para el análisis de fluidos que fluyen a través de tubos o ductos con diámetro variable. En estos casos, la velocidad del flujo cambia debido a que el área transversal entre álabes varía de una sección a otra siguiente.

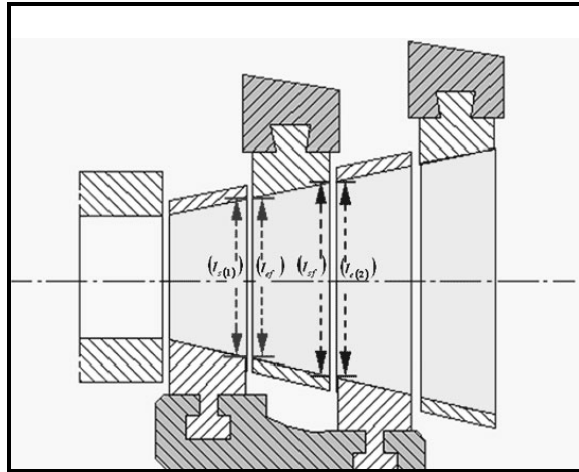


Figura 7. Esquema del aumento de altura de los álabes en una turbina.

Debido a que en los álabes móviles la presión no varía, en el cálculo de su altura se considera que el volumen específico del fluido permanece constante, aunque en realidad varía un poco por el leve recalentamiento que produce la fricción.

Normalmente en la primera etapa de una turbina de acción o impulso, el conjunto de toberas que entrega el vapor no cubre toda la circunferencia de la rueda o disco con álabes de la turbina, sino parte de ella. Cuando esto sucede se dice que tiene una admisión parcial.

- **Perfil de los álabes**

Varios autores clasifican las secciones transversales de los álabes de la turbina de acción en dos grupos: álabes de lámina y álabes perfilados.

Como su nombre lo indica, los álabes de lámina se construyen con una lámina de metal, generalmente, a la que se le da una curvatura cilíndrica de tal forma, que el ángulo de entrada del flujo sea igual al de salida. A esta construcción básica se le efectúan algunas modificaciones tales como chaflanes o biseles en ambos bordes para reducir el impacto del flujo, pulimento de ángulos

para reducir turbulencias y extensiones en el borde de salida para tener un mejor control en el flujo de vapor que sale del álabe.

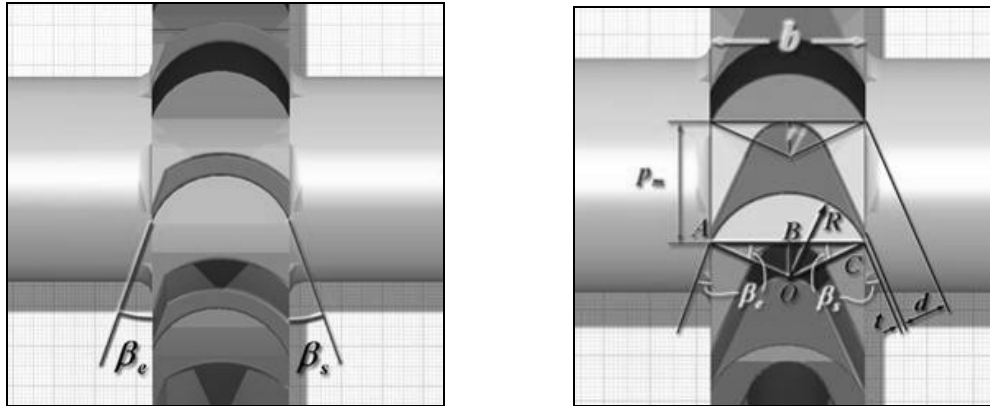


Figura 8. Tipos de perfiles de álabes. Laminado (izquierda) y Perfilado (derecha).

El diseño del álabe perfilado, permite que la separación del canal que forman dos álabes permanezca constante en la trayectoria del flujo previniendo la formación de turbulencias dentro del mismo; la forma más práctica de lograr que la separación del canal sea constante, es haciendo que los centros de curvatura que forman las paredes de los álabes coincidan.

Es necesario dejar un pequeño espesor t a la entrada y a la salida del álabe para soportar los esfuerzos del maquinado y al igual que en los álabes de lámina, se hace una extensión del borde de salida manteniendo constante el espesor para obtener un mejor control del flujo.

▪ Toberas

La tobera es un ducto con área de sección transversal uniformemente variable en el cual se acelera un flujo de vapor o gas, transformando su energía potencial, manifestada en alta temperatura y presión, en energía cinética.

En una turbina el vapor se dirige permanentemente de las toberas a los álabes uniformemente repartidos en la periferia del disco de la turbina. La

transformación de energía se lleva a cabo mediante fuerzas ejercidas sobre los álabes del rotor a causa de los cambios de cantidad de movimiento del vapor al pasar a través de los canales de los álabes. De esta forma la entalpía o energía calorífica del vapor se convierte en energía cinética a medida que el vapor circula por la tobera. La variación de entalpía es, por lo tanto, igual a la ganancia en energía cinética.

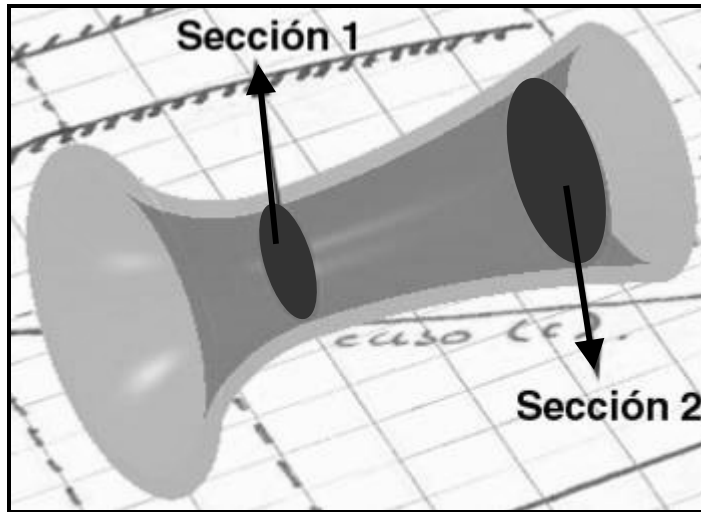


Figura 9. Esquema típico de una tobera.

En una turbina ideal, toda variación de entalpía del vapor aparece en forma de energía cedida al eje. La turbina ideal tiene, por consiguiente, interés al estudiar la velocidad que adquiere el chorro de vapor, su comportamiento y las dimensiones de la tobera requerida.

- **Eficiencia de la tobera**

Debido a la fricción que ocurre entre el fluido y las paredes de la tobera y entre las propias capas del fluido, se producen algunas pérdidas que hacen que el proceso de expansión sea irreversible pero adiabático y por lo tanto, habrá una diferencia entre el proceso de expansión en condiciones ideales y el proceso en condiciones reales relacionada con la eficiencia.

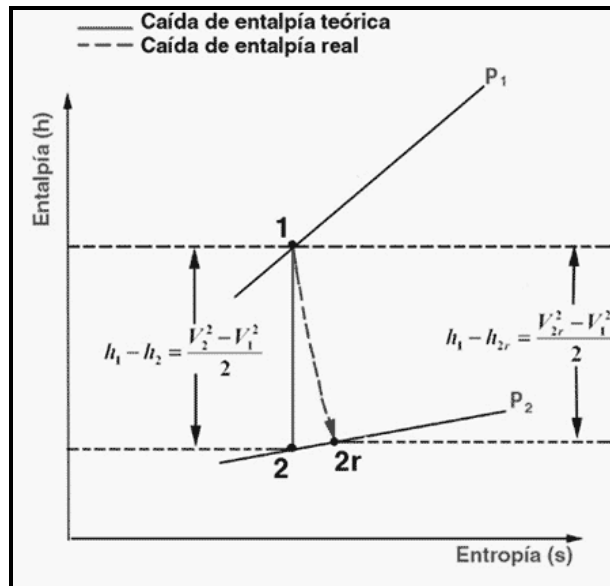


Figura 10. Diagrama de la eficiencia de una tobera.

En general, se puede decir que para determinar la eficiencia de una tobera se compara el desempeño real bajo condiciones definidas, con el desempeño que alcanzaría en condiciones ideales. Una manera de evaluar esta eficiencia es por medio de la relación que existe entre la ganancia de energía cinética debida a la caída de entalpía en condiciones reales y la ganancia de energía cinética debida a la caída de entalpía en condiciones ideales.

Cuando el vapor se expande en forma lenta e isentrópica, comienza a condensarse al pasar por la línea de saturación. Sin embargo se ha encontrado que cuando este proceso de expansión ocurre muy rápidamente como en el caso de una tobera, el vapor continúa seco aún por debajo de la línea de saturación hasta que alcanza un punto en el cual la condensación ocurre repentinamente.

3.1.3 Pérdidas de energía

Las pérdidas que sufre la energía del vapor en las turbinas son principalmente:

- La energía cinética de salida, ya que el vapor inevitablemente debe tener cierta velocidad para salir de la turbina.
- El rozamiento sobre los discos móviles.
- Si la turbina trabaja con admisión parcial, como es el caso de la turbinas Elliott modelo DYR, el movimiento de las paletas inactivas que giran en el vapor sin producir trabajo (pérdidas por ventilación).
- Fugas por los espacios entre los extremos de los álabes y la carcasa (móviles) o el disco (fijas).
- Fugas por los ejes, en los sellos de laberintos o de otros tipos.

Están además las pérdidas por fricción en los conductos formados por los álabes, el disco y la carcasa, y se cuantifica afectando a las velocidades de salida isentrópicas de los álabes fijos y móviles. Las pérdidas se pueden clasificar según su variación con la potencia desarrollada como:

- A. Pérdidas que decrecen con el aumento de la potencia, como son las pérdidas por ventilación de los álabes inactivos.
- B. Pérdidas constantes, tales como pérdidas mecánicas en cojinetes, accionamiento de accesorios, pérdidas de calor al exterior.
- C. Pérdidas proporcionales a la carga, tales como las fugas en los laberintos y por los extremos de álabes.
- D. Pérdidas que crecen con el cuadrado de la carga, como la energía cinética de salida.

La suma de estas pérdidas forma una curva, indicada como E en la siguiente gráfica. El mínimo de esta curva define el punto de operación económica:

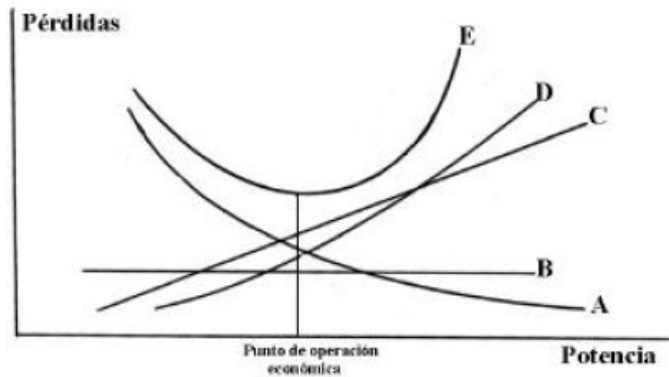


Figura 11. Diagrama de operación económica de una turbina.

3.1.4 Empuje axial

Si se considera el rotor de la turbina de vapor simplemente como un objeto cilíndrico en una carcasa, se observa que un extremo está sometido a la alta presión del vapor de entrada y el otro a una presión de descarga que es muy inferior, como resultado el rotor experimenta un empuje axial hacia la descarga. Dadas las altas presiones de alimentación y los grandes diámetros de las turbinas de potencia, el empuje puede ser sumamente elevado, más de lo que razonablemente pudiera soportarse con cojinetes de empuje axial.

Para reducir este empuje se utilizan técnicas de balance de fuerzas utilizando la misma presión de vapor. Una técnica efectiva es la del émbolo compensador.

3.2 Descripción de la turbina Elliott modelo DYR

Las turbinas Elliott modelo DYR, son turbinas de vapor de una etapa, controlada por una única válvula de admisión de vapor, y de acuerdo con la sección 3.1, podemos agregar que la turbina Elliott modelo DYR es, una turbina de acción o impulso, de una etapa con 2 escalonamientos de velocidad o curtis, admisión parcial y controlada mediante una única válvula de admisión de vapor.

Estas turbinas de vapor son utilizadas como máquinas motrices en numerosas aplicaciones como ventiladores, compresores, generadores, etc., y bajo diversas condiciones de vapor, lo cual permite obtener potencias de hasta 3000 caballos de fuerza (hp).

3.2.1 Componentes principales

La turbina Elliott DYR y en general, todas las turbinas Elliott modelo YR, consisten de las siguientes partes principales y que pueden identificarse en el siguiente diagrama y cuya descripción encontramos en las páginas siguientes.

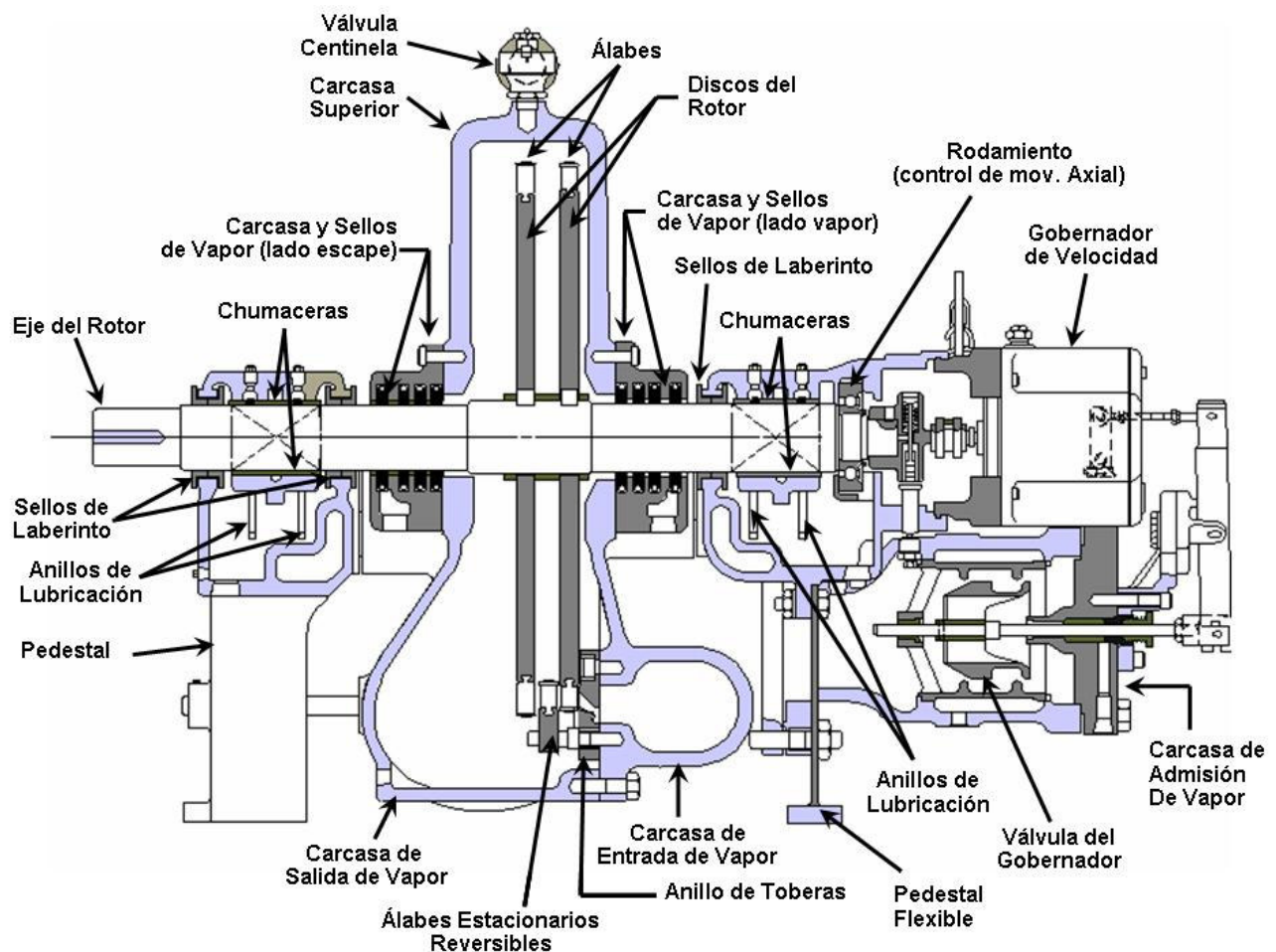


Figura 12. Esquema de una turbina Elliott DYR.

▪ Carcasas

La carcasa de la turbina, que se puede identificar en la figura de arriba y resaltada en rojo en la figura a la derecha, rodea por completo al elemento rotante de la turbina y sirve de soporte para los elementos estacionarios que definen la trayectoria del vapor hacia los álabes de la turbina. La carcasa en sí está compuesta por 3 partes: carcasa superior, carcasa de entrada de vapor y carcasa de salida de vapor.

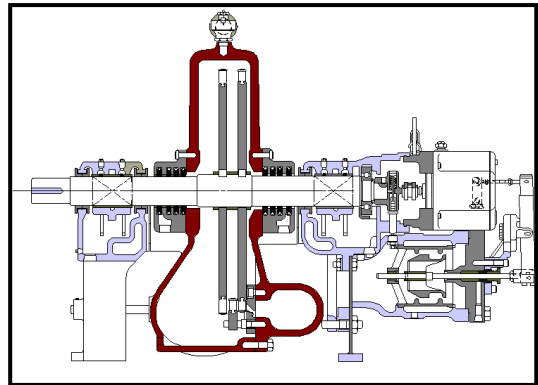


Figura 13. Carcasas.

La carcasa de entrada de vapor constituye la cámara de vapor de alta presión y las cámaras de toberas. La carcasa de salida de vapor recibe el vapor que se ha expandido en las toberas y que ha cedido energía a los álabes de la turbina, contiene además la conexión para escape del vapor. Estas dos carcasas componen la parte inferior y soportan la carcasa superior o cobertora.

▪ Carcasa y Sellos de Vapor

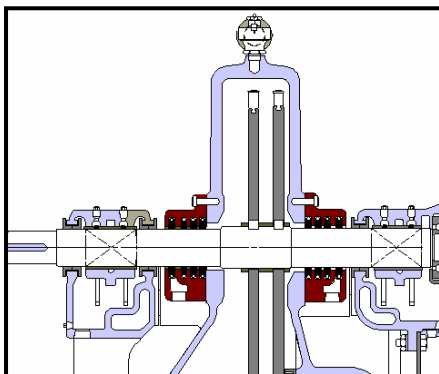


Figura 14. Sellos de vapor.

Las carcasas de los sellos de vapor, resaltadas en rojo en la figura a la izquierda, están compuestas de dos partes separables horizontalmente y se identifican como sellos lado vapor y sellos lado escape.

En los sellos lado vapor, a la derecha según la gráfica, la carcasa de estos sellos se

encuentra atornillada a las carcasas de entrada de vapor y superior. En los sellos lado escape, que se encuentran al lado izquierdo según la gráfica, la carcasa de los sellos se encuentra atornillada a las carcasas de salida de vapor y superior.

En el interior de las carcasas de sello, se encuentran los anillos de carbón, cuya función es la de sellar las carcasas y el eje de la turbina, evitando de esta manera la fuga de vapor.

- **Válvula Centinela**

Este componente instalado en la carcasa superior, es un artefacto de alerta que indica excesiva presión en la turbina. En el caso de que la presión del vapor dentro de la carcasa de la turbina exceda un valor predeterminado y configurado en la válvula centinela, la válvula permite que una pequeña cantidad de vapor salga a la atmósfera, produciendo un sonido silbante. Esta válvula no constituye una válvula de alivio.

- **Anillo de Toberas y Álabes Estacionarios (Reversibles)**

El anillo de toberas, señalado en rojo en la gráfica a la derecha, va atornillado a la carcasa de entrada de vapor. Las toberas, que se encuentran en el anillo de toberas, expanden el vapor y lo direccionan hacia la primera fila de álabes móviles.

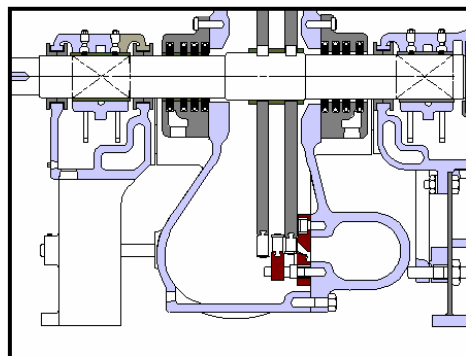


Figura 15. Anillo de Toberas.

Los álabes estacionarios, o también conocidos como segmento de álabes reversibles, se encuentra posicionado en medio de las dos filas de álabes móviles rotativos y está atornillado al anillo de toberas. Este grupo de álabes se encarga de recibir el flujo de vapor que abandona la primera fila de álabes rotativos y le cambia la dirección orientándolo hacia la segunda fila de álabes rotativos.

▪ Carcasa de Chumaceras y Pedestales

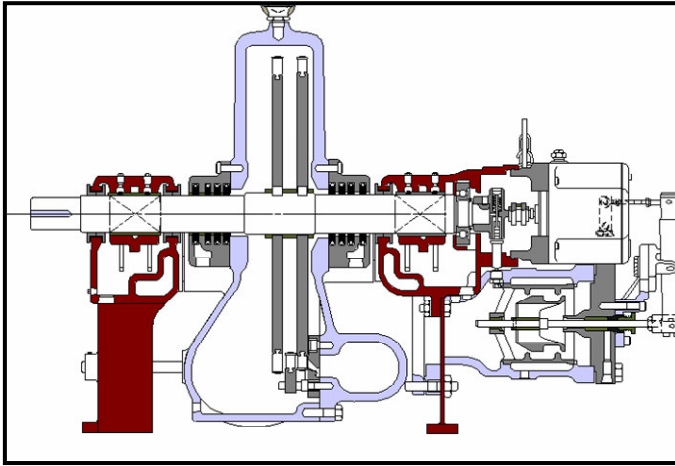


Figura 16. Chumaceras y pedestales.

La carcasa de chumaceras del lado escape (izquierda en la gráfica), se encuentra atornillada a la carcasa de salida de vapor y la carcasa de chumaceras lado vapor (derecha en la gráfica), se encuentra atornillada a la carcasa de entrada de vapor.

Dos pedestales colocados en la parte inferior de ambas carcasas de chumaceras soportan el peso de la turbina y en el caso del pedestal flexible, permite además cierta flexibilidad para soportar los crecimientos térmicos de la carcasa en dirección axial.

En el lado escape, la carcasa de chumaceras contienen internamente las chumaceras, 2 anillos de lubricación y 2 sellos de laberinto. En el lado vapor, la carcasa de chumaceras contiene las chumaceras, 2 anillos de lubricación, 1 sello de laberinto, rodamiento de soporte axial, el mecanismo de disparo por sobrevelocidad y la configuración necesaria para acoplar el gobernador. Los sellos de laberinto (uno en el lado vapor y dos en el lado escape), previenen las fugas de aceite de la carcasa de chumaceras e impide la entrada de polvo, suciedad y humedad proveniente de fugas de vapor.

▪ Chumaceras

Dos chumaceras posicionadas radialmente, soportan el rotor y permiten que este pueda girar. Una está localizada en la carcasa de chumacera lado vapor y la otra en la carcasa de chumacera lado escape.

Estas chumaceras están conformadas por una base de acero maquinada con precisión y recubiertas de babbit, separables horizontalmente en dirección axial para facilitar su instalación e inspección. Su lubricación se realiza mediante los anillos de lubricación, los cuales giran impulsados por el eje del rotor o de la turbina, aunque en algunos casos el aceite se suministra por una bomba auxiliar (lubricación forzada).

- **Rodamiento de Soporte Axial**

Este rodamiento se encuentra instalado en el eje de la turbina y posicionado en la carcasa de chumacera lado vapor. El propósito de este rodamiento es posicionar axialmente el rotor de la turbina en las carcasas principales e impedir que el rotor se desplace o mueva en dirección axial, debido al empuje axial que se produce por la diferencia de presiones de vapor en el rotor de la turbina.

- **Sistema de Disparo por Sobrevelocidad y Gobernador de Velocidad**

El mecanismo de emergencia por sobrevelocidad, o sistema de disparo por sobrevelocidad, opera entera e independientemente del sistema del gobernador. Puede identificarse la parte interna la cual está encerrada en el círculo de la gráfica a la derecha, y el mecanismo externo se muestra en la foto abajo.

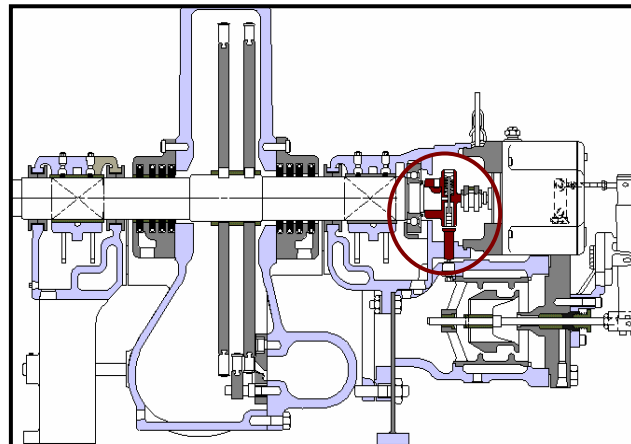


Figura 17. Mecanismo de sobrevelocidad.

El sistema de disparo está diseñado para detener la marcha de la turbina, cortando la alimentación de vapor a la turbina mediante el accionamiento de una válvula que corta el paso del vapor.

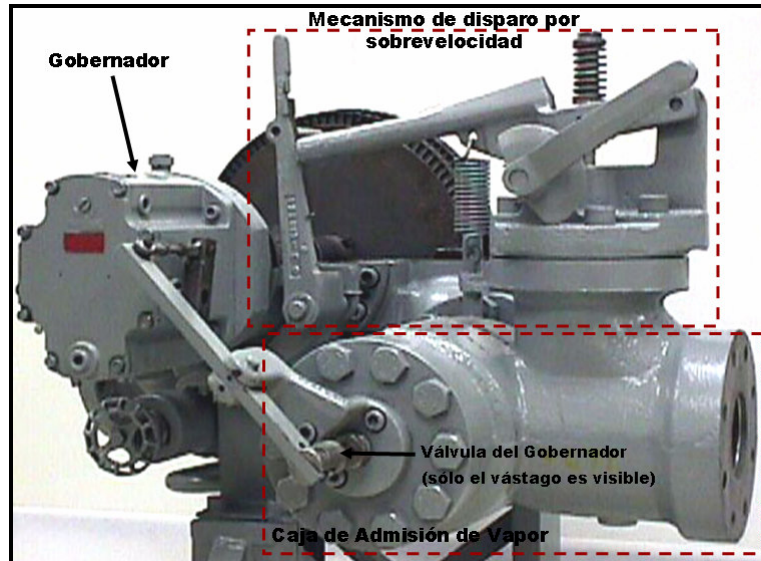


Figura 18. Ubicación del sistema de gobernación y sobrevelocidad.

Este tipo de turbinas, emplea varios tipos de gobernadores para controlar y regular la velocidad de operación (revoluciones por minuto).

El gobernador, el cual lo podemos identificar en la fotografía anterior, es el encargado de controlar la posición de la válvula del gobernador, regulando de esa manera la cantidad de vapor que ingresa a la turbina y con ello regular la velocidad de operación, ya que si la turbina empieza a sobrepasar la velocidad de operación configurada, el gobernador hace reducir el paso de vapor mediante la válvula del gobernador y con ello reducir la velocidad de operación. Por el contrario, si la turbina empieza a girar a una velocidad inferior a la configurada, el gobernador posicionará la válvula del gobernador para que una cantidad mayor de vapor ingrese a la turbina y con ello aumentar la velocidad de operación.

- **Rotor**

El rotor de la turbina, identificado por las secciones en rojo en la gráfica a la izquierda y mostrado en la fotografía a la derecha, está compuesto por el eje, sellos de laberinto, cuerpo de sistema de disparo por sobrevelocidad y el disco o discos con álabes.

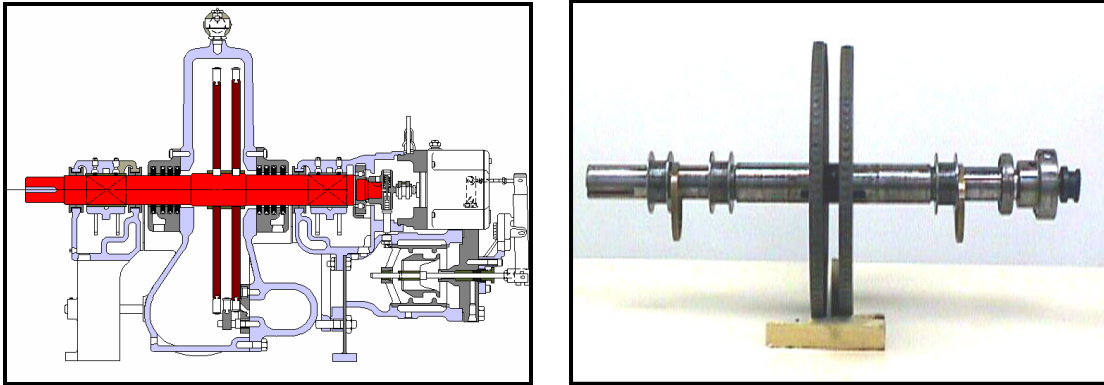


Figura 19. Esquema y fotografía de un rotor de turbina.

Se menciona disco o discos con álabes, debido a que las turbinas Elliott DYR emplean en algunos casos, un único disco con dos filas de álabes (tipo *profyle*) o puede emplear dos discos cada uno con una fila de álabes (tipo *straight*), que es el caso de la gráfica y fotografía antes mostrados.

Los discos van instalados en el eje, mediante ajuste y apriete por constricción, y adicional emplean una cuña para evitar posibles rotación del disco con relación al eje.

Los sellos de laberinto, acople motriz, rodamiento de carga axial, cuerpo de sistema de disparo por sobrevelocidad y acople para el gobernador, van instalados en el eje. Anillos adicionales pueden instalarse en el eje por constricción, a los lados de los discos para evitar desplazamiento axial del disco sobre el eje.

El rotor completo, compuesto principalmente por el eje y los discos con álabes además de los otros componentes mencionados, debe ser dinámicamente balanceado antes de instalar, para proveer una operación confiable.

▪ Caja de Admisión de Vapor

La carcasa denominada caja de admisión de vapor y por donde fluye el vapor de admisión, se encuentra atornillada a la carcasa de entrada de vapor y se

puede identificar por la sección en rojo de la gráfica a la izquierda y a la derecha podemos verla con mayor detalle.

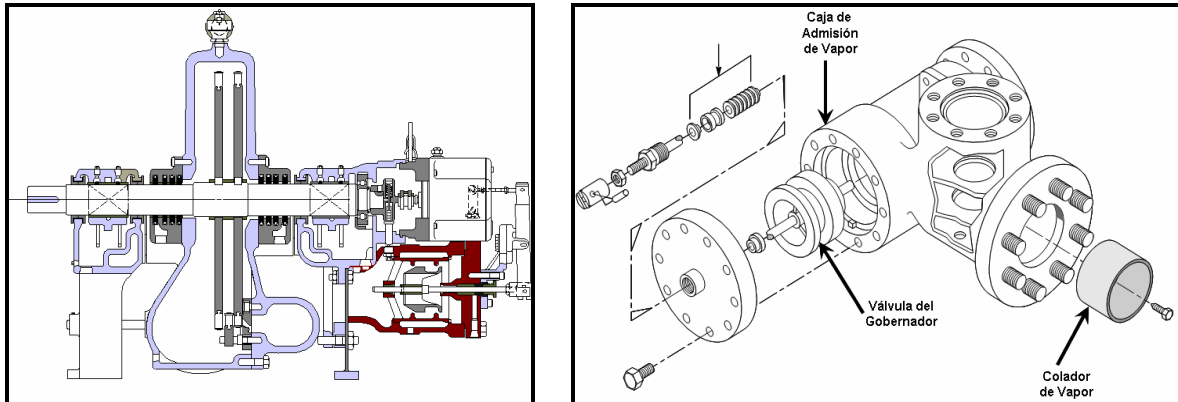


Figura 20. Esquema de la caja de admisión de vapor.

El vapor que viene de la tubería de alimentación pasa inicialmente por el colador para eliminar posibles cuerpos sólidos que arrastre el vapor, luego circula por la caja de vapor pasando por la válvula del mecanismo de disparo y la válvula del gobernador para luego entregar el vapor al anillo de toberas.

3.2.2 Holguras y ajustes

En esta sección muestra las holguras y los principales ajustes a realizar, para asegurar un buen armado de la turbina. Un diagrama completo que muestra las holguras principales, se presenta en la página siguiente.

- **Anillos de carbón**

HOLGURAS. La holgura entre anillos nuevos y el eje de la turbina DYR es entre 0.001" y 0.0035". No puede confiarse en las medidas de holguras de los anillos sin recurrir a reglas de medición adecuadas. En último término, el ajuste de los anillos será siempre satisfactorio si no se escapa vapor por la carcasa de sellos a todo lo largo del eje.

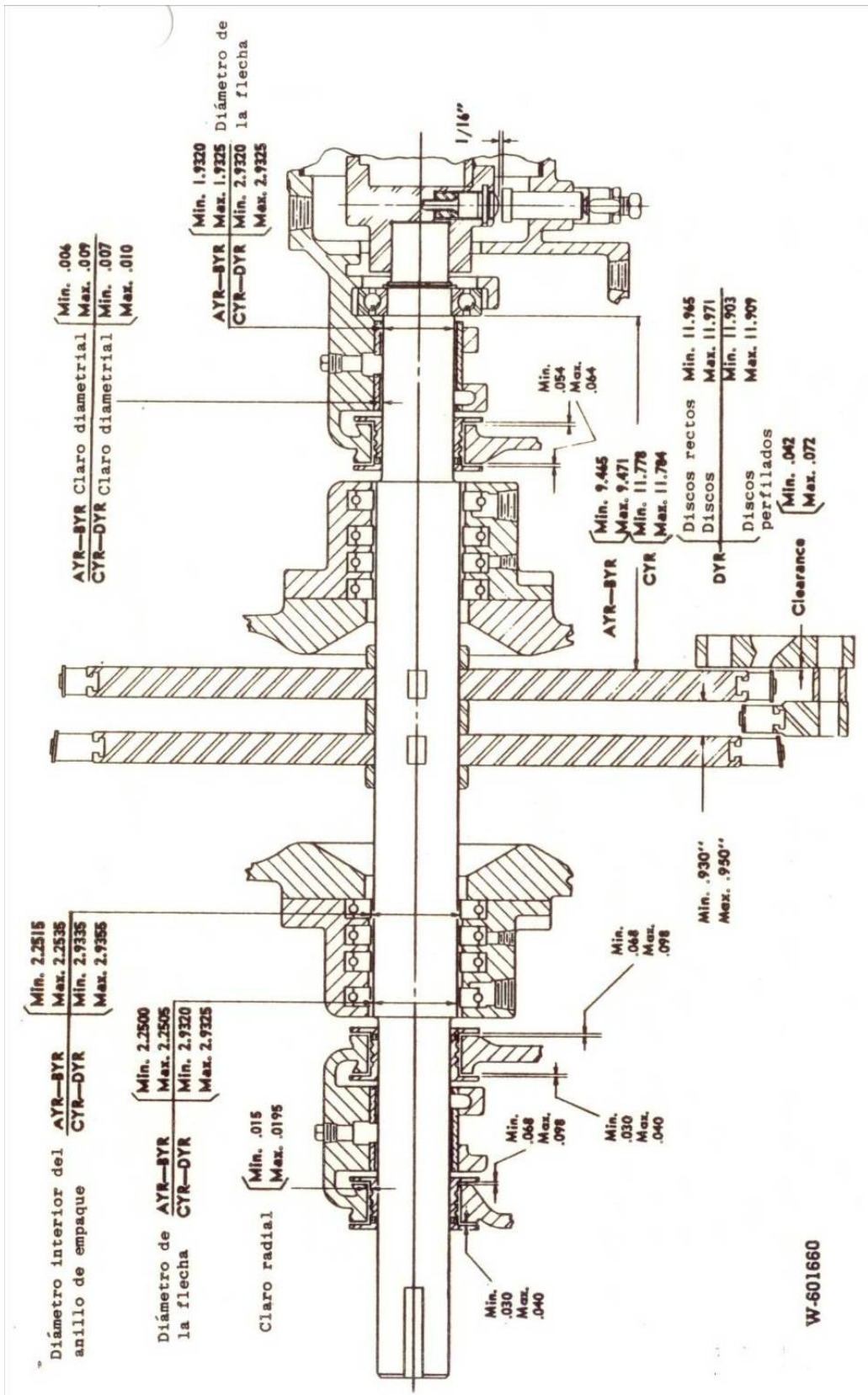


Figura 21. Diagrama de holgas en frío para turbinas Elliott modelo YR.

AJUSTES. El área del eje bajo estos anillos de carbón está recubierto a presión por un recubrimiento que proporciona una superficie dura no corrosiva que hace posible claros de trabajo muy estrechos. Todos los anillos, cuando se instalan, deben asentarse muy lentamente para conseguir la superficie extremadamente pulida y brillante que se requiere para que los anillos duren lo más posible. El procedimiento recomendado para el arranque inicial de la turbina y el asentamiento de los anillos de carbón es el siguiente:

- a) Hacer girar la turbina durante 10 o 15 minutos a 500 rpm, con presión atmosférica de escape. Aumentar lentamente la velocidad hasta unas 800 rpm y mantener esta velocidad durante 5 minutos.
- b) Reduzca la velocidad a 500 rpm y hacer funcionar en estas condiciones durante cinco minutos. Esto permite que el eje se enfríe.
- c) Aumentar la velocidad de la turbina a unas 1,000 rpm y dejarla funcionar a esta velocidad durante 5 minutos, reduciéndola de nuevo a 500 rpm durante otros 5 minutos para que se enfríe el eje.
- d) Aumentar gradualmente la velocidad de la turbina hasta alcanzar la velocidad de trabajo sin que el eje se caliente demasiado. Si el eje comienza a calentarse, reduzca la velocidad ligeramente hasta que se enfríe y vuelva después a aumentar la velocidad.
- e) Si el funcionamiento continuo a la velocidad de régimen origina un excesivo calentamiento en el eje, reducir la velocidad de la turbina y repetir el proceso anterior.
- f) Si el funcionamiento a presión atmosférica de escape parece satisfactorio, aumente gradualmente la presión de escape hasta que la turbina esté funcionando a la contrapresión y a la velocidad de régimen.

- **Válvulas manuales**

HOLGURAS. No requieren revisión.

AJUSTES. En el caso de ser requeridas, se pueden suministrar toberas extras en el anillo de toberas, controladas mediante una válvula de mano y que soportan carga total normal con presión de vapor reducida o para carga parcial con economía de vapor.

La operación con las válvulas de mano debe ser o totalmente abiertas o totalmente cerradas. Si se desea rendimiento máximo, opere las válvulas de mano tal como se ha indicado. Mantenga el empaque apretado o ajustándolo con el seguidor.

- **Chumaceras de alineamiento**

HOLGURAS. Las chumaceras son ajustadas en fábrica para una holgura en frío de 0.006” a 0.010” entre el diámetro interior y el diámetro del eje en el área de chumaceras.

Verificar a intervalos regulares (unidad fuera de operación), colocando en sentido radial una tira corta de metal deformable (o plástico) en el centro de la chumacera sobre la parte superior del eje colocando y apretando la chumacera hasta su posición para medir después el metal aplastado con un micrómetro. El claro del cojinete puede verificarse también midiendo el diámetro interior de la chumacera colocada y apretada en su lugar (el rotor no está instalado) y comparándolo con el diámetro del eje.

Chumaceras desgastadas producirán vibración, por lo que deben cambiarse tan pronto muestren señales de desgaste excesivo. Cuando se ponga en servicio chumaceras nuevas, colóquelas en su sitio y sujételas con su cubierta; opere la

unidad de 5 a 10 minutos, quite y examine las chumaceras. Asegúrese de que están adecuadamente asentadas, bien lubricadas y de que no hay señales de daño en la chumacera ni en el eje.

AJUSTES. Estas chumaceras son intercambiables. Las dos mitades de la chumacera se colocan una frente a otra colocándolas en el alojamiento de la carcasa en sus muescas de fijación. Estas muescas localizan perfectamente a las chumaceras en el alojamiento de las carcasas y mitades inferiores de las carcasas de chumaceras. Estas chumaceras no necesitan ser raspadas ni rectificadas y no debe intentarse ninguna de estas operaciones.

- **Sellos de laberinto**

HOLGURAS. La holgura axial debe mantenerse entre un máximo de 0.064" y un mínimo de 0.054". La holgura radial debe mantenerse entre un máximo de 0.0145" y un mínimo de 0.010".

AJUSTES. Esta camisa tipo laberinto, es parte del sello y evita la entrada de polvo, impurezas o vapor hacia el aceite, evitando también la fuga de aceite de las carcasas de chumaceras. Este sello de laberinto está fijo sobre el eje mediante dos tornillos de fijación radialmente opuestos. Para obtener el máximo rendimiento, este sello debe ajustarse de forma que mantenga el mismo claro axial y radial con respecto a las carcasas de chumaceras.

- **Gobernador Mecánico**

HOLGURAS. El perno debe encajar fácilmente en la palanca del gobernador y en la conexión. Los conjuntos de los contrapesos del gobernador deben estar siempre perfectamente asentados, de tal modo que no exista claro alguno entre ellos y el alojamiento; el más ligero movimiento de los contrapesos debe transmitirse al conjunto del vástago sin juego alguno.

AJUSTES. La placa de fábrica de la turbina indica la velocidad de régimen a la que debe funcionar la turbina con carga total y con las condiciones de vapor especificadas.

Para cualquier alteración de importancia, estas condiciones deben consultarse primero a la oficina de Elliott Company más cercana. Las variaciones de poca importancia en la velocidad para controlar variaciones menores en las cargas de operación se consiguen apretando la tuerca de ajuste para aumentar la velocidad, y aflojándola para reducirla. El rodamiento de bolas interno en el gobernador, tiene como misión soportar el empuje de la válvula del gobernador, el cual debe girar libremente en todo momento, con un juego longitudinal muy ligero. Si es notable este juego longitudinal se verá afectado el funcionamiento del gobernador. Este rodamiento no puede ajustarse y, por lo tanto, si el juego longitudinal llega a ser apreciable se debe cambiar. Deben adoptarse todas las precauciones posibles y limpiarlo antes de arrancar la unidad, así como cuando se pare para inspecciones periódicas.

- **Palanca del Gobernador**

HOLGURAS. Los pernos de la palanca y las conexiones deben mantenerse siempre limpias y bien engrasadas. Un buen pivoteo ajustado debe mantenerse en todo momento y cuando el desgaste sea excesivo deben cambiarse las piezas.

AJUSTES. Ninguno.

- **Válvula del Gobernador**

HOLGURAS. El vástago de la válvula debe moverse libremente en todo momento en el empaque. Una vez ajustado el seguidor pruebe el movimiento del vástago de la válvula para asegurar que tiene movimiento libre.

AJUSTES. El recorrido de la válvula del gobernador debe ser el mínimo requerido para capacitar a la turbina para soportar la carga total bajo las condiciones de vapor de diseño. La válvula del gobernador ha sido diseñada para tener un recorrido máximo de 7/16”.

El ajuste de la válvula en fábrica puede determinarse y anotarse como sigue: con la turbina parada, mida la distancia desde la cara interior de la contratuerca del vástago de la válvula hasta la superficie del seguidor y anotar la dimensión. Afloje la contratuerca ligeramente y gire el vástago de la válvula en sentido de las manecillas del reloj hasta que ésta asiente. Con la válvula en esta posición, vuelva a tomar la medida del mismo modo que antes. La diferencia entre estas dos medidas es el recorrido de la válvula del gobernador. Vuelva a fijar la válvula en su posición original.

- **Rodamiento de Control Axial**

HOLGURAS. Amplia holgura radial (no soporta carga radial) y muy pequeña holgura axial.

AJUSTES. No es ajustable. Este rodamiento se localiza en sentido axial al conjunto del rotor con respecto a las piezas estacionarias del aparato. No soporta carga radial. Nótese que este rodamiento es una sola placa lateral. El montaje correcto del rodamiento es con la placa hacia el gobernador.

- **Anillo de Toberas**

HOLGURAS. Normalmente 1/16” entre el anillo de toberas y la cubierta del conjunto de álabes del primer disco.

En este ajuste son tolerables alteraciones de poca importancia. Esta holgura se obtiene mediante medición con el calibrador de hojas y debe verificarse

siempre que se quite de la turbina y vuelva a montarse el rotor, el anillo de toberas o el soporte de álabes.

AJUSTES. Ninguno.

- **Interruptor por Sobrevelocidad y sus Conexiones**

HOLGURAS. Debe mantenerse una holgura de 1/16" medido entre el perno de disparo y el conjunto del pistón.

La holgura del vástago de la válvula en el buje superior así como la holgura del vástago de válvula en el buje inferior es de 0.008" a 0.010". El vástago de la válvula y el buje deben mantenerse limpios y sin costras de óxido para evitar que la válvula se trabe. Los pernos de conexión, el perno de tope, el bloque y el bloque de desconexión deben tener un buen ajuste y libre deslizamiento. Debe mantenerse una holgura de 1/16" entre el bloque y el bloque de desconexión.

AJUSTES. La velocidad de desconexión de la turbina a la que dispara el perno de desconexión y activa el mecanismo de desconexión por sobrevelocidad puede ajustarse desmontando la grapa de fijación en forma de U y girando la tuerca de ajuste. Si se afloja esta tuerca se reduce la velocidad de desconexión. Si se aprieta, aumenta. En caso de que el ajuste de esta tuerca no bastara para lograr el deseado incremento de velocidad, agregue arandelas. La holgura entre el perno de desconexión y el conjunto del pistón puede ajustarse con el tornillo de ajuste y la contratuerca. Esta contratuerca debe estar fija en su sitio, bajo cualquier condición de funcionamiento.

La válvula de sobrevelocidad debe estar ajustada de tal modo que su extremo superior esté asentado en la guía de la cubierta en la posición de restablecido, y contra el asiento de la válvula en la caja de admisión de vapor en la posición de desconexión. La válvula de sobrevelocidad se mantiene asentada

contra la guía de la cubierta mediante el resorte, asegurándose de este modo el sello del vástago de la válvula evitando fugas. La tuerca de fijación debe oprimir siempre el buje entre el asiento del resorte y el bloque de conexión, dado que éste controla la carga del resorte sobre la válvula de sobrevelocidad cuando ésta se encuentra en posición de restablecido. Para ajustar las posiciones del brazo y la válvula de sobrevelocidad, desconecte el resorte del brazo y suelte la tuerca de fijación. Cuando la parte inferior del borde de cuchilla de la palanca de restablecer se encuentra a 1/8" por debajo de la parte superior del borde de cuchilla del brazo de desconexión manual, la válvula de sobrevelocidad debe asentar sobre la guía de la cubierta. La posición de la válvula de sobrevelocidad se regula haciéndola girar dentro del bloque roscado de conexión, para elevarla o bajarla. El conjunto de la válvula de desconexión está diseñado como válvula metal a metal de asiento contrario.

Esta disposición cierra eficientemente el vástago de la válvula sin introducir fuerza friccionante alguna como se manifestaría con otros tipos de asentamiento de válvulas.

La palanca auxiliar de restablecer facilita la apertura de la válvula de sobrevelocidad cuando la turbina se encuentra bajo la presión total del vapor. Esta palanca debe volver a colocarse en su posición, por la acción torsional del resorte. Puede aumentarse el momento torsional de este resorte tomando vueltas adicionales.

3.2.3 Instrucciones generales

Toda persona relacionada con el manejo o mantenimiento del aparato accionado mediante la turbina debe estar totalmente familiarizada con todos los detalles del equipo en cuestión. Por lo tanto es oportuno conocer toda la información necesaria para la instalación, manejo y mantenimiento, así como una

descripción de la estructura y ajuste de las diferentes piezas de la turbina y sus accesorios.

3.2.3.1 Almacenamiento

Cuando la turbina es proveída nueva o al regresar de un centro de servicio donde se le efectuó mantenimiento, y en el caos que no sea puesta en servicio durante un tiempo prolongado, se recomienda tener en cuenta las instrucciones que aquí se anotan para lograr una mejor protección. Esto implica abrir la carcasa de la turbina antes de ponerla de nuevo en servicio. De acuerdo con la duración del almacenamiento y las condiciones atmosféricas los métodos varían así:

1. Utilice aceite ligero para el engrasado interno volviendo a montar los anillos de carbón una vez engrasado el eje, rehágase la junta de vapor o déjese el aparato dispuesto para entrar en funcionamiento en cualquier momento.
2. Para cortos períodos de almacenamiento de algunas semanas (o más, si las condiciones atmosféricas son favorables), puede rociarse aceite ligero para turbinas sobre las piezas interiores a través de las diferentes aberturas existentes en la carcasa.

3.2.2.2 Cimentación

No se intenta dar detalles completos sobre las exigencias de cimentación, dado que las condiciones de cada caso tales como altura del suelo, etc., varían considerablemente. Los principales requisitos de cimentación son:

- Adecuación contra deflexión y vibración bajo las mayores cargas estáticas y dinámicas posibles.
- Facilitar el acceso a todas las piezas del aparato y a sus accesorios durante el funcionamiento para su inspección.

- Dotarlo de una amplia base de asiento para evitar hundimientos.

3.2.3.3 Instalación

La instalación requiere un conocimiento especializado del equipo así como la capacidad y el criterio obtenidos en experiencias previas con aparatos similares. Debe emplearse por esta razón, personal competente para realizar la instalación.

Una instalación y alineación adecuadas son absolutamente necesarias para un buen funcionamiento. Estudie el diseño fijándose en todas las tuberías exteriores, lea todas las notas y sígalas.

El acoplamiento deberá realizarse según las instrucciones proporcionadas y nunca debe intentarse colocar o desmontar el acople con un martillo, pues la fuerza de los golpes pueden perjudicar el rodamiento de carga axial del rotor.

Al alinear la turbina con respecto al equipo con el que se acoplará, será necesario mover la turbina sobre su asiento y nivelarla a una altura adecuada, colocando láminas calibradas o alzas debajo del pedestal fijo o del pedestal flexible, según sean necesarias. Luego deberá realizarse movimientos horizontales necesarios para eliminar desviaciones paralelas en el plano horizontal. Calcule una separación de ajuste (0.004" a 0.008") para la expansión del pedestal cuando se encuentre a temperatura de funcionamiento y tenga en cuenta posibles expansiones del aparato al cual se está acoplando la turbina.

Cuando la turbina esté a la altura apropiada y alineada horizontalmente, atornille los pernos de ambos pedestales. Las turbinas y máquinas accionadas deberán alinearse siempre en frío y ser revisadas a temperatura de funcionamiento. Esta inspección puede facilitarse con el uso de un equipo de alineamiento con sistema láser.

3.2.3.4 Válvula de relevo a la atmósfera

Para proteger la carcasa de la turbina debe instalarse una válvula de relevo atmosférica entre la brida del tubo de escape y la primera válvula de cierre. Esta válvula de relevo debe ser amplia, de tal forma que pase la mayor cantidad posible de vapor a través de la turbina sin que la presión aumente por encima de la presión máxima tolerable para la carcasa de la turbina. Las válvulas de relevo no son proporcionadas por el fabricante de la turbina.

La válvula centinela colocada en la carcasa superior o cubierta de la turbina no sirve más que para una señal auditiva de alerta que indica la existencia de presión excesiva dentro de la carcasa.

3.2.3.5 Tuberías para vapor

No hay parte más importante en la instalación de la turbina para su óptimo funcionamiento futuro que las tuberías bien diseñadas e instaladas. Los objetivos de un buen entubado son tres, a saber:

1. Contrarrestar las fuerzas y momentos tolerables como se indica en NEMA SM20-1958 "Standards Publication for Mechanical Drive Steam Turbines" (Publicación de los estándares para el funcionamiento mecánica de las turbinas de vapor).
2. Evitar que los tubos calientes originen deformaciones en la carcasa de la turbina y afecten con ello la alineación.
3. Conectar y drenar la entrada de la turbina y los tubos de escape a fin de suministrar vapor seco a la turbina y evitar la acumulación de agua en dichos tubos.

Se recomienda una válvula de cierre en el tubo de vapor, preferentemente en un lugar fácilmente accesible dentro del espacio de la turbina, entre el colador de vapor y la admisión de la turbina, a fin de que sea posible trabajar en la turbina sin tener que parar la caldera.

La carcasa de la turbina debe estar protegida contra el peso de los tubos y esfuerzos de la expansión de los mismos. El peso de las tuberías deberá cargarse independientemente sobre soportes apropiados. Los esfuerzos de expansión pueden ser reducidos al mínimo utilizando tramos largos de tubo en lugar de tramos cortos directos y con dobleces adyacentes a las conexiones de la turbina. La tubería puede considerarse instalada en forma satisfactoria siempre que los tubos de conexión no desplacen al calentarse a la temperatura de funcionamiento la alineación de la turbina cuando se desconecte ésta de los tornillos de la brida. Deben utilizarse pernos fijos siempre que se instale una junta de expansión en la tubería de escape. La siguiente figura ilustra como es conveniente disponer los tubos de escape y vapor.

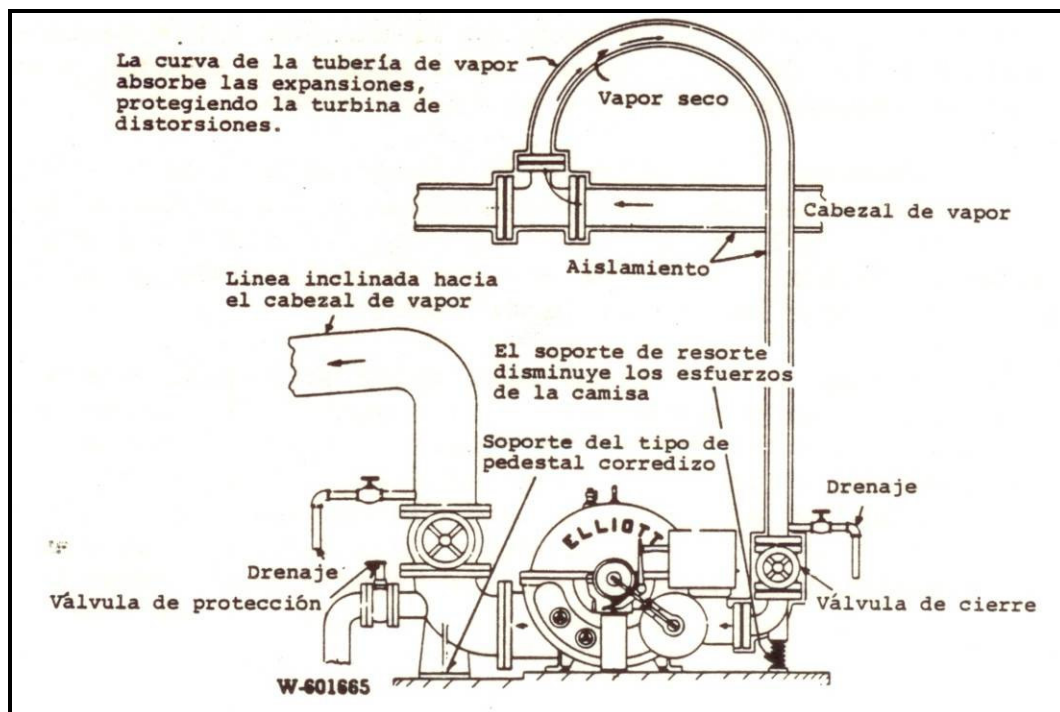


Figura 22. Disposición de los tubos de vapor y escape que se recomienda.

3.2.3.6 Suministro de vapor

El vapor debe estar en todo momento seco y preferentemente sobrecalentado. Debe colocarse un separador de agua de condensado tipo embudo con amplios tubos de drenaje delante de la válvula de cierre para evitar que el agua arrastrada con el vapor perjudique a la turbina. Si no se tiene este separador o colector, debe colocarse una válvula de descarga o una línea de drenaje continuo en el punto más bajo de la tubería de entrada de vapor.

El colador que tiene la turbina a la entrada en la caja de admisión de vapor, la protege contra las grandes partículas de costras, fragmentos de soldaduras, etc. Este colador no protege contra materias abrasivas, componentes de la combustión o residuos de sustancias ácidas o alcalinas, que son acarreados por el vapor. Estas sustancias pueden corroer, erosionar o formar depósitos en las partes donde pasa el vapor, reduciendo así el rendimiento y la potencia, provocando que los asientos de las válvulas tengan fugas. Es necesario que el tratamiento del agua de alimentación y el funcionamiento de la caldera sean cuidadosamente controlados para asegurar un abastecimiento de vapor limpio en todo momento.

3.2.3.7 Aceite lubricante

Nunca puede destacarse suficientemente la importancia de utilizar en la lubricación de turbinas, aceite de la más alta calidad. Si bien el costo inicial del aceite de mayor calidad puede ser considerablemente superior al del de una calidad inferior, la diferencia de costo es más que compensada por la mayor duración de la turbina, menor peligro de deterioro de las superficies de las chumaceras y eliminación de interrupciones graves debidas a lubricación deficiente.

Los requerimientos básicos de un buen aceite para turbinas son los siguientes:

1. petróleo puro adecuadamente refinado y con elevado grado de filtración, sin ácidos, álcali, agua, sedimentos, jabón, resinas o cualquier otra sustancia que durante el funcionamiento pueda ser perjudicial para el aceite mismo o para la turbina y sus accesorios que entren en contacto con el aceite;
2. la mayor capacidad posible de separación rápida del agua y la menor tendencia posible a emulsionarse o formar espuma, cuando se agita con aire o agua;
3. la menor tendencia posible a sedimentarse o a separarse al ser agitado a las temperaturas normales de funcionamiento y mezclado con agua o aire (ver tabla en página siguiente);
4. puntos de inflamación y combustión razonablemente elevados, tomando en cuenta las temperaturas probables de funcionamiento y la proximidad inevitable de superficies de vapor a elevadas temperaturas;
5. viscosidad e índice de viscosidad (relación entre la viscosidad y los cambios de temperatura) adecuados a la función que con él se pretende (ver tabla).

	Unidades lubricadas a presión	Unidades lubricadas por anillos o engranes
Viscosidad (SUS) a 100 °F	140 – 170	280 – 325
Viscosidad (SUS) a 210 °F	42 – 44	49 – 55
Temperatura mínima del depósito de aceite en operación, en °F	130	130
Temperatura mínima antes del arranque, en °F	50	60
Temperatura normal del aceite de las chumaceras, en °F	140 – 170	150 – 190
<i>SUS = Segundo Universal "Saybolt"</i>		

Tabla I. Propiedades de lubricante para turbinas de vapor.

- **Sistema de Lubricación por Anillos**

Es un sistema en el que los anillos de aceite sólo tienen como fin el acarreo de aceite desde el depósito a las chumaceras. En este sistema se utiliza el enfriamiento estándar por agua. No se recomiendan chumaceras no enfriadas por agua, si bien pueden permitirse con tal que el funcionamiento propiamente dicho en un lugar fijo tenga como resultado temperaturas de aceite inferiores a 190 °F. En tal caso, podría utilizarse un aceite cuidadosamente seleccionado, con un contenido mínimo de grasa o grafitos e ingredientes que den lugar a sedimentaciones.

- **Sistema de Circulación a Presión**

Es un sistema en el que una bomba de aceite impulsa a éste a través del enfriador de aceite, filtro, etc., hacia las chumaceras, el gobernador y otras partes, regresando el aceite caliente por gravedad a un depósito. Los anillos de aceite se incluyen únicamente para los arranques y rotación con la turbina parada.

- **Cuidado del Aceite**

Todo aceite deberá mantenerse en condiciones óptimas mediante la eliminación de humedad, sedimentos y otras impurezas. Para el sistema de circulación por presión, filtre o purifique el aceite frecuentemente o emplee el sistema de paso continuo para eliminar las impurezas cuando el aparato esté instalado en una atmósfera extremadamente contaminada.

Consulte al fabricante del aceite en busca de consejo sobre la utilización de anticorrosivos cuando se coloque en el sistema la carga inicial del nuevo aceite o las adiciones de aceite nuevo que han de añadirse cuando se reabastece el tanque. Indique también al fabricante de aceites el tipo de sistema de purificación utilizado, en el caso de utilizar alguno, no debe reducir la eficacia del anticorrosivo.

3.2.3.8 Arranque y parada

Preparar la turbina para el arranque inicial, como sigue:

1. Desconecte el acoplamiento entre la turbina y la máquina accionada por la turbina.
2. Saque todo el vapor de las tuberías, desconectando la conexión de entrada a la turbina si fuera necesario.
3. Quite la tapa de la carcasa de chumaceras, tanto en el lado vapor como en el lado escape, con cuidado para evitar cualquier deformación en los anillos de lubricación, mantenidos en su sitio por la parte superior de las chumaceras. Quite las chumaceras de la parte inferior girándolos hacia el lado contrario de las muescas de fijación para evitar daño a las mismas. Inspeccionarlas y limpiarlas.
4. Limpie cuidadosamente los dos depósitos de aceite y los pedestales. Vuelvan a colocarse las chumaceras de la parte inferior en su sitio. La colocación de los topes antirrotación debe hacerse en la posición correcta colocándolas en sus muescas respectivas.
5. Llene los depósitos hasta el rebosadero con aceite de turbina de la calidad adecuada. Compruebe que las mitades inferiores de las chumaceras estén inundadas con aceite y que el rodamiento de carga axial esté igualmente lubricado.
6. Coloque de nuevo las chumaceras de la parte superior alrededor de los soportes del eje y por debajo de los anillos de lubricación. Las chumaceras de la parte superior deben alinearse con las de la parte inferior, en su sitio, para asegurar que el borde de asiento en la chumacera de la parte superior quede

colocado debidamente en la tapa de la carcasa de chumaceras. Monte las tapaderas de las carcasas de chumaceras, haciendo uso de los pernos guía y ponga los tornillos en su sitio, apretándolos muy bien. Haga girar el aparato a mano para comprobar si todo funciona adecuadamente.

7. Quite la cubierta del gobernador y límpiense todas las piezas de este último de impurezas, pintura, óxido y grasas. Lubrique cuidadosamente y vuelva a montarla con cuidado en su sitio correcto. Reabastezca el lubricador del eje del gobernador con aceite ligero de turbina.
8. Abra la caja de admisión de vapor y los drenajes de la carcasa y observe si funcionan todas las trampas para agua. Asegure que la válvula del tubo de escape de la turbina esté abierta. Si la turbina descarga a vacío, compruebe que se forma vacío en la descarga. Compruebe que las válvulas de mano (si las hay), estén totalmente abiertas.
9. Abra la válvula de cierre en la línea de admisión de vapor, fije la palanca restablecedora. Mantenga abiertas todas las válvulas de drenaje hasta que se hay eliminado toda el agua del sistema. Cierre todas las válvulas de drenaje y escuche si se oyen ruidos raros. Revise los anillos de lubricación, quitando los tapones de las carcasas de chumaceras para asegurarse que los anillos están girando y acarreando aceite. Si se utiliza el sistema de circulación de aceite a presión, compruébese que la bomba de aceite está cerrada y establece la presión adecuada. Abra la válvula del agua del sistema de enfriamiento del aceite.
10. Una vez que la turbina se ha calentado, párela golpeando la palanca de interrupción manual. Cierre la válvula de entrada de vapor y compruebe la alineación de la tubería y del acoplamiento nuevamente.

11. Monte nuevamente la palanca restablecedora. Abra la válvula de obstrucción del tubo de vapor. Revise los anillos de lubricación o la presión en el sistema de alimentación a presión y compruebe que el gobernador mantiene a la turbina a velocidad sin carga que es ligeramente arriba de la velocidad de carga total. Corrija el ajuste de velocidad si fuera necesario.
12. Para un funcionamiento por condensación, ajuste la válvula de sello de vapor de tal modo que sólo una ligera cantidad de condensado o vapor sea descargada de las líneas de drenaje.
13. Observe la velocidad de paro por sobrevelocidad con un operador que lea la velocidad y otro sujetando firmemente los dos extremos de la palanca del gobernador, empujando hacia adentro sobre el vástago del gobernador y jalando hacia fuera la barra que conecta con el vástago de la válvula del gobernador. Esto hará que la turbina acelere, haciendo funcionar el mecanismo de disparo por sobrevelocidad, deteniendo la turbina. La velocidad de disparo deberá coincidir con lo señalado en la placa de identificación de la turbina. Regule el mecanismo si fuera necesario.
14. Restablezca el mecanismo de disparo por sobrevelocidad y arranque la turbina a velocidad de régimen. Déjela funcionando durante una hora aproximadamente, revisando las chumaceras y haciendo observaciones generales, tal como se ha indicado anteriormente. Pasado ese tiempo puede aplicarse carga y la turbina estará dispuesta para funcionar.
15. El arranque de rutina se lleva a cabo controlando los niveles de aceite, abriendo los tubos de drenaje y acercando poco a poco la turbina controlada por el gobernador. Cierre los drenes cuando escape vapor en vez de agua.

16. Al parar el aparato, sobre acelere la turbina manualmente para probar el interruptor de sobrevelocidad, cierre las válvulas de cierre y abra todas las líneas de drenado.

17. Si se usa la turbina con un mecanismo de reducción y/o con equipo especial, atiéndanse también las instrucciones para estos equipos.

3.2.3.9 Operación, inspección de rutina

Estas máquinas requieren un mínimo de atención en operación. Una lubricación adecuada es lo más esencial e importante para una buena operación. De todos modos, cualquier sistema de inspección de rutina que prevea posibles fallas de operación antes de que revistan serias proporciones, es altamente deseable, razón por la que más adelante se da una guía básica al respecto.

Se recomienda la adopción de este sistema de inspección rutinaria, con las modificaciones o ampliaciones que se consideren necesarias para ajustarla al programa de mantenimiento preventivo de cada unidad en particular.

▪ Inspección Diaria del Rotor

- a. Compruebe el nivel del aceite en las chumaceras del rotor y agregue aceite si fuera necesario.
- b. Llene el lubricador del vástago del gobernador al nivel necesario.
- c. Controle las temperatura de las chumaceras y su lubricación
- d. Compruebe la suavidad de operación y anote cualquier anomalía.
- e. Anote cualquier ruido o condiciones extraños e inspecciones frecuentemente.
- f. Verifique la velocidad de la unidad.
- g. Si se para todos los días, deténgala con el mecanismo de paro por sobrevelocidad, moviendo la palanca de paro manual.

- **Inspección Semanal**

- a. Si no existe una operación continua, desconecte el interruptor por sobrevelocidad sobre acelerando la turbina a mano como se ha indicado.
- b. En caso de operación continua, el funcionamiento de la válvula de interrupción por sobrevelocidad puede verificarse, moviendo la palanca de desconexión manual que permite cerrarse a la válvula de interrupción. Restablezca de inmediato a la palanca de desconexión manual. Esto puede hacerse tan pronto como la velocidad de la turbina se haya reducido entre un 15 y 20 por ciento, aproximadamente.

- **Inspección Mensual**

- a. Cambie el aceite y limpie los alojamientos de las chumaceras cuando sea necesario.
- b. Quite la cubierta del gobernador y las tapas de los rodamientos haciendo una inspección visual de las partes del gobernador y los rodamientos.
- c. Inspeccione las conexiones del gobernador y del mecanismo de disparo por sobrevelocidad, por desgaste o pérdida de movimiento.

- **Inspección Anual**

- a. Antes de montar o desmontar cualquiera de las piezas de la turbina, leer y revisar detenidamente el manual.
- b. Revise todas las holguras y ajustes tal como se indica en el manual.
- c. Quite el colador que se encuentra a la entrada de la caja de admisión de vapor y límpielo. En caso de estar muy sucio hágase esta limpieza cada seis meses.
- d. Desmonte el gobernador y sus conexiones y compruebe si existe pérdida de movimiento o piezas desgastadas. Límpielo a fondo y vuelva a montarlo. Ajústelo a la velocidad correcta.

- e. Examine la válvula del gobernador y su asiento y límpielos. Asiente con polvo de esmeril la válvula si tuviera desgaste desigual. Revise el empaque del vástago de la válvula del gobernador y cámbielo si fuera necesario. Asegúrese que el empaque no se tuerza al montarse.
- f. Examine el rodamiento de carga axial del rotor y lávelo con una corriente de aceite limpio a presión.
- g. Desmonte el mecanismo de disparo por sobrevelocidad y compruebe su buen funcionamiento limpiándolo si es necesario.
- h. Limpie el vástago de la válvula del mecanismo de disparo por sobrevelocidad.
- i. Revise los anillos de carbón por desgaste y, si han sufrido daño por acumulación de costras u óxido en sus carcasa. Quite cuidadosamente los anillos, límpielos y vuélvalos a montar.
- j. Levante la carcasa superior e inspeccione los álabes móviles y estacionarios; elimine cualquier acumulación de óxido o impurezas entre los álabes.
- k. Compruebe el funcionamiento de la válvula centinela. Una vez en operación, verifique la velocidad de la turbina, la velocidad de desconexión y la operación en general.

3.2.4 Indicaciones generales sobre operación y mantenimiento

Las breves notas que a continuación se transcriben, sirven para una rápida referencia en el caso de que la turbina de vapor no funcionara adecuadamente.

▪ Vibración

En el caso de que la turbina comience a vibrar, puede deberse a las siguientes causas:

- a. Alineación deficiente con la máquina accionada.

- b. Desgaste de las chumaceras de alineamiento, chumaceras con holguras excesivas. Deben reemplazarse.
- c. Acoplamiento desgastado con juego excesivo. Si el acoplamiento es de un tipo no reparable, deberá cambiarse.
- d. Anillos de carbón apretados. Puede ser que al montarlos hayan sido apretados contra el eje. Debe mantenerse la holgura recomendada entre los anillos y el eje. Los anillos viejos pueden rectificarse con cuidado, pero se recomienda instalar nuevos.
- e. Alineación deficiente del eje. Se debe probablemente a excesiva entrada de vapor o a deformación de la tubería. Debe rectificarse la tubería para eliminar los esfuerzos y realinear la unidad.
- f. Rotor desbalanceado. Esto ocurre principalmente si los álabes han sufrido algún desperfecto o desgaste por erosión. En caso de no poder corregirse fácilmente, deberá realizarse reparación y un nuevo balanceo dinámico en cualquiera de los centros de servicio Elliott. Hay que hacer notar que puede originarse desbalance en el rotor debido a depósitos de costras de óxido no uniformes e incrustaciones derivadas de vapor con impurezas.
- g. Ranuras de alojamiento de los anillos de carbón obstruidos por impurezas en los alojamientos de la carcasa. Desmontarlos y limpiar.

▪ **Inestabilidad del gobernador**

En caso de que el gobernador oscilara, puede deberse a que:

- a. Las piezas del gobernador están desgastadas o apretadas. Desmunte y limpie todas las piezas. Las piezas desgastadas deberán cambiarse.
- b. El acoplamiento del gobernador está desgastado o apretado. Desmunte y limpie todas las piezas y localice el desgaste. Las piezas desgastadas deben sustituirse.

- c. El vástago de la válvula del gobernador está pegado. La protección del vástago de la válvula puede estar dañado o demasiado apretado, o bien, cubierto de costras de óxido de los residuos de la combustión de la caldera. Desmonte y limpie e inspeccione todas las piezas. Limpie el vástago de la válvula y cambie su empaque.
- d. La válvula del gobernador tiene fugas. Puede deberse a depósitos de impurezas o cualquier materia extraña. Quite la válvula y remueva la costra tanto de la válvula como de su asiento. Debe tenerse especial cuidado en no deteriorar los asientos. La válvula también puede tener fugas debido a un ajuste inadecuado del gobernador.
- e. Hay aire atrapado en el sistema de los gobernadores accionados por aceite o hidráulicos. Libérese a través de la tubería de venteo a la atmósfera.

- **El mecanismo de sobrevelocidad detiene la turbina, a la velocidad de régimen**

Puede ocurrir debido a las causas siguientes:

- a. Ajuste inadecuado del interruptor por sobrevelocidad.
- b. Excesiva vibración.

- **El mecanismo de sobrevelocidad no funciona adecuadamente a la velocidad para la que se ha fijado**

Puede deberse a lo siguiente:

- a. El perno del interruptor está gomoso, pegado y oxidado. Desmóntelo, límpielo y vuelva a colocarlo.
- b. Holgura excesiva entre el perno de disparo y el émbolo. Revísense las piezas en busca de desgastes y cambie las desgastadas. Deben ajustarse a las holguras recomendadas.

- **El mecanismo de sobrevelocidad funciona pero la válvula no cierra**

Esto ocurre debido a alguna de las causas siguientes:

- a. Que el vástago de la válvula esté trabado y apretado. Quítese, límpiase e inspecciónese. El vástago puede haberse doblado. El vástago y su buje pueden estar desgastados formándose holguras excesivas e insuficiente guía. El vástago puede tener rebaba debido a depósitos de óxido producidos por mezclas de los componentes de la combustión de la caldera.
- b. La palanca aseguradora puede haberse corroído o puede estar demasiado apretada. Límpiela y ajústela.

- **Fugas en el alojamiento de los anillos de carbón**

Puede deberse a lo siguiente:

- a. Anillos rotos o dañados al montarlos. Quítelos, revíselos y vuélvalos a instalar.
- b. Anillos desgastados. En caso de emergencia este defecto puede corregirse rebajando un poco los extremos de cada segmento de anillo. Esta es una reparación provisional. Se recomienda instalar anillos nuevos.
- c. Posibles fugas entre la superficie del anillo y la correspondiente superficie del alojamiento de la carcasa. Se debe normalmente a la existencia de impurezas o costra de óxido procedentes de la combustión o del sellados usado en la junta. Limpie las superficies pero sin dañarlas.

- **Fugas en el vástago de la válvula**

Si existe una fuga de vapor después del vástago de la válvula de emergencia (válvula del mecanismo de disparo por sobrevelocidad), cuando la válvula está abierta, puede deberse a un asentamiento defectuoso del sello

auxiliar en el fondo de la guía del vástago, o puede deberse a una obstrucción del tubo de escape. Los tubos de escape deberán ser amplios y con salida al exterior. Si aumenta el escape de vapor se debe a desgaste del vástago o de la guía; cambie las piezas desgastadas.

Los escapes de vapor después del vástago de la válvula del gobernador, se deben a desgaste o montaje defectuoso del empaque; cámbielo y móntelo adecuadamente.

▪ **Desgaste excesivo en las chumaceras**

Puede ocurrir un desgaste excesivo, debido a alguna de las siguientes circunstancias:

- a. Falta de lubricación adecuada. En las chumaceras lubricadas por anillos de lubricación, si éstos no forman un auténtico círculo, no transportarán aceite suficiente para la lubricación, y lo mismo sucederá si el nivel de aceite no es el recomendado. En las chumaceras lubricadas a presión, la existencia de impurezas y obstrucciones en los tubos de alimentación de aceite puede dar lugar a lubricación deficiente.
- b. La vibración excesiva del rotor puede ovalar las chumaceras. El rotor de la turbina debe mantenerse balanceado y funcionar con suavidad en todo momento.

3.3 Análisis de vibraciones. Introducción

Cuando se tiene la oportunidad de estar de pie frente a una máquina en operación, y el funcionamiento es óptimo, definitivamente es posible permanecer cerca de la máquina, altamente confiado en que probablemente nunca ocurrirá una falla que pudiera exponerlo a uno a lesiones.

Sin embargo, si de pronto, en esa máquina se empieza a generar más calor del usual en sus rodamientos, empieza a generar más ruido al extremo de ser sumamente molesto, muestra incremento en la vibración, etc., seguramente nadie sentirá la confianza suficiente para permanecer operando esa máquina, debido a que las máquinas con problemas pueden fallar en cualquier momento, provocar errores de fabricación o cualquiera que sea su propósito, se volverán ineficientes y hasta improductivas, y seguramente vibrarán.

Si medimos periódicamente la vibración, buscamos patrones y observamos los cambios, podremos detectar un problema con margen de tiempo suficiente para actuar. Al proceso anterior se le llama diagnosticar problemas. Para diagnosticar problemas en máquinas mediante análisis de vibraciones, debemos entonces medir con cierta frecuencia el nivel de vibración en nuestras máquinas, pues nuestras medidas y la tendencia de los cambios nos avisarán de la severidad del problema y pueden servirnos de información para planificar el mantenimiento.

Los análisis de la vibración también nos da información que nos ayuda a saber la raíz del problema de tal forma que sea posible corregir el origen de los problemas en la máquina (desbalance, desalineamiento, etc.), y de esta forma no enfocar el mantenimiento en sencillamente reemplazar los componentes dañados o con síntomas de desgaste o fatiga.

3.3.1 Generalidades

Vibración se define como “movimiento oscilatorio rápido de un cuerpo o una masa en torno a su posición de reposo”.

Se entiende por vibraciones mecánicas, las oscilaciones perceptibles y medibles en la superficie de las máquinas, elementos constructivos, sus fundaciones o carcasas, etc. También es llamado ocasionalmente, ruido

estructural ya que se propaga exclusivamente en cuerpos sólidos, en contraste el ruido aéreo se transmite por un medio gaseoso como el aire. Se les puede clasificar como vibración armónica y vibración periódica.

La **vibración armónica**, también denominada vibración senoidal, tiene una única frecuencia. Una vibración de esta clase puede ser originada por un desbalance en un rotor. Una vibración armónica puede ser completamente descrita o caracterizada por su amplitud, frecuencia y ángulo de fase.

Es frecuente que en una máquina, se presenten vibraciones de diferentes frecuencias simultáneamente, tal como sucede por ejemplo en la vibración de una cuerda de violín, la cual está compuesta por la frecuencia fundamental y de sus armónicas. Tales vibraciones se manifiestan en una forma de onda compleja que se repite periódicamente. Esta es la característica básica de la **vibración periódica**, la cual se repite a sí misma luego de un intervalo de tiempo específico o período T .

Una vibración puede ser completamente descrita (caracterizada) por su amplitud, frecuencia y ángulo de fase.

- **Amplitud:** Al máximo valor instantáneo **A** (ver figura 1) de una vibración armónica se le denomina amplitud. La amplitud es una medida de la magnitud de la vibración, y puede ser utilizada para evaluar la carga vibratoria de la máquina. En otras palabras, la amplitud de la vibración es la medida de la magnitud del movimiento dinámico o vibración que ocurre en la máquina o partes de la misma. La amplitud de una vibración puede ser indicada de varias formas: amplitud pico a pico, amplitud cero a pico, amplitud promedio y amplitud rms.

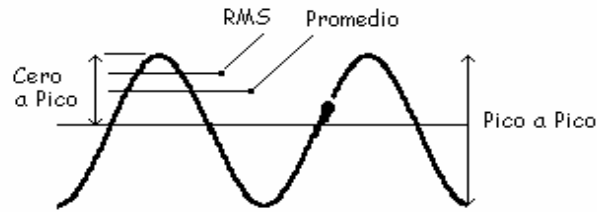


Figura 23. Caracterización de la onda de vibración.

- **Frecuencia:** La frecuencia f , expresa cuantas veces una vibración o ciclo vibratorio se repite en una unidad de tiempo. Normalmente, la frecuencia está expresada en *ciclos por minuto (cpm)*, o en *ciclos por segundo (cps o Hertz, Hz)*.
- **Angulo de Fase:** El ángulo de fase define la posición inicial de una componente vibratoria al tiempo $t = 0$. La información sobre el ángulo de fase o de la posición de la fase de una vibración es de la mayor importancia para corregir el desbalance de un rotor, o para diagnosticar ciertas causas de vibración.

3.3.2 Tipos de vibraciones

Las vibraciones mecánicas a menudo tienden a confundirse con las fuerzas que pudieran actuar como excitador de las vibraciones, tal como es el caso de un desbalance, de tal forma que las fuerzas centrífugas causadas por el desbalance, y otras fuerzas (por ejemplo: magnéticas, hidráulicas, etc.) causan que el rotor y su eje vibren. Las vibraciones generadas en máquinas son principalmente rotativas y reciprocantes.

- **Rotativas.** Las vibraciones rotativas son las que se generan en aquellas máquinas cuyas partes o elementos móviles rotan alrededor de un eje, tal es el caso de los ventiladores, motores eléctricos, etc.

- **Reciprocantes.** Las vibraciones reciprocantes se generan básicamente en dos tipos de máquinas: los motores de combustión interna y los compresores de émbolo.

Esas vibraciones y esfuerzos son transmitidos por los elementos rodantes de los rodamientos o película de aceite de los cojinetes de deslizamiento a las carcasas, llegando hasta las cimentaciones de la máquina.

3.3.3 Unidades para medición de nivel de vibración

En el campo de las vibraciones, las magnitudes que comúnmente son usadas para medir las vibraciones mecánicas son: desplazamiento, velocidad y aceleración.

- ✓ **Desplazamiento:** El desplazamiento es una medida del movimiento total de la masa, esto es, que tanto de desplaza la masa en su movimiento hacia arriba y hacia abajo cuando está vibrando, desde su posición de reposo. El desplazamiento puede ser expresado en milésimas (sistema inglés, 1 milésima = 0.001 pulgadas) o en micras (sistema métrico, 1 micra = 0.001 mm).
- ✓ **Velocidad:** La velocidad de la vibración es la velocidad a la cual la masa se está moviendo o vibrando durante sus oscilaciones. La velocidad de la masa es cero en el límite superior e inferior del movimiento de la masa. Luego de pasar por éstos puntos, la velocidad empieza a incrementarse hasta alcanzar su máximo valor en el punto que corresponde a la posición neutral y luego comienza a decrecer hasta volverse cero en el límite opuesto. La velocidad es expresada en unidades pulgadas por segundo (pulg/s, sistema inglés) o milímetros por segundo (mm/s, sistema métrico).
- ✓ **Aceleración:** La aceleración es definida como la cantidad de cambio en la velocidad a la cual se está moviendo la masa vibrante. La aceleración es máxima cuando la velocidad es mínima (límites superior e inferior) y cero

cuando la velocidad es máxima en la posición neutral. En el campo de las vibraciones, la aceleración es comúnmente expresada en unidades de aceleración de la gravedad, G ($1\text{ G} = 9.81\text{ m/s}^2 = 32.2\text{ pie/s}^2$).

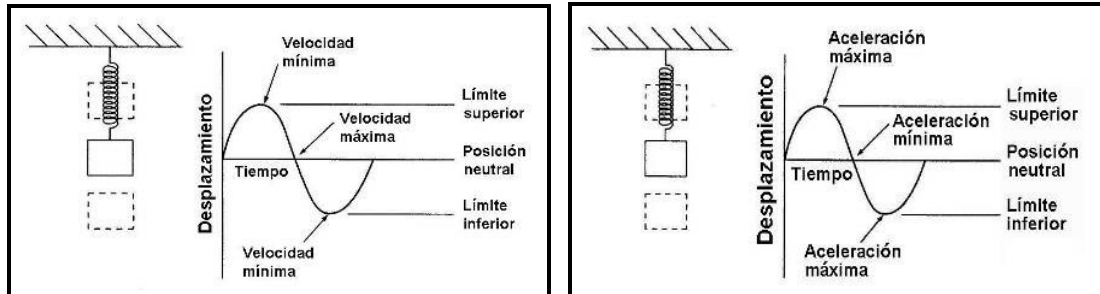


Figura 24. Gráficas de velocidad y aceleración de la vibración.

La amplitud de la vibración es proporcional a la severidad de los problemas potenciales en la máquina y es uno de los primeros indicadores de la condición de la máquina. Para indicar la magnitud de la amplitud de la vibración, pueden emplearse unidades de desplazamiento, velocidad o aceleración. Sin embargo, generalmente se toma la amplitud en unidades de velocidad.

Las **unidades de desplazamiento** normalmente se emplean para medir el nivel de la vibración en máquinas con rangos de frecuencias de giro muy bajos (menores a 600 cpm o 10 Hz y cercanas o casi 0 cpm) o en aquellos casos donde es importante medir la cantidad de desplazamiento de un eje o la expansión de una carcasa.

Las **unidades de aceleración** típicamente se recomiendan para medir la magnitud del nivel de la vibración en aquellas máquinas de alta velocidad de giro, por ejemplo, máquinas que pueden generar frecuencias de vibración de 300,000 cpm (5000 Hz), tales como cajas de engranajes (reductores de velocidad), frecuencia de paso de las barras de un rotor eléctrico, etc. No olvidar que en algunos casos, estas frecuencias pueden generar armónicos o múltiplos de esas vibraciones.

Por otro lado, las **unidades de velocidad** son casi de uso general para medir los niveles de vibración de máquinas a partir de frecuencias de 600 cpm hasta 120,000 cpm (10 Hz a 2000 Hz), y son generalmente la unidad escogida cuando la vibración generada en la máquina se encuentra entre los rangos de frecuencias de 300 a 300,000 cpm (5 a 5000 Hz). La experiencia ha determinado que la mayoría de las máquinas generan frecuencias de vibración entre los 600 hasta aproximadamente 100,000 cpm, de allí una de las principales razones del porqué se emplean en la mayoría de los casos, las unidades de velocidad.

3.3.4 Ubicación de puntos para medición

Este es un aspecto no menos importante que todo lo discutido anteriormente. Las medidas de vibración deberían ser tomadas sobre los rodamientos, carcasas que soportan los rodamientos, o en alguna parte de la carcasa de la máquina con significativa transmisión de las fuerzas dinámicas que se genera por la vibración.

Luego, es necesario tomar medidas en el mismo rodamiento, en tres direcciones perpendiculares, tal como lo muestra la siguiente figura.

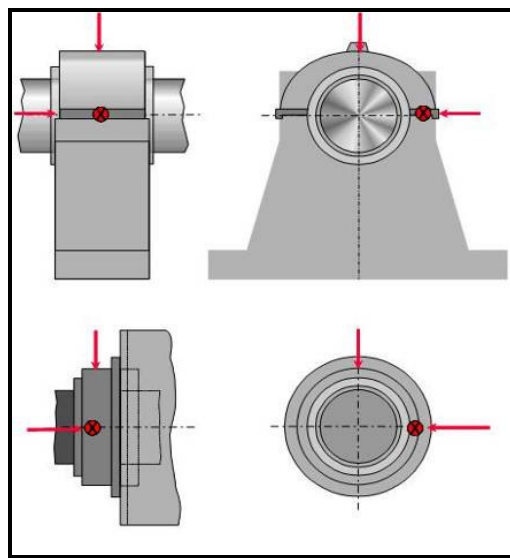


Figura 25. Ubicación de los puntos para medición de vibración.

3.3.5 Evaluación del estado de la máquina

Cuando evaluamos el estado general de las máquinas, normalmente se empieza por tomar medidas de la vibración global presente en la máquina, siendo estas medidas un parámetro que puede determinar la severidad de la vibración mediante la evaluación de los valores globales de la vibración tomados. Los resultados de esta evaluación preliminar determinarán si:

1. La máquina puede continuar en operación sin tomar acción alguna
2. Debería tomarse alguna acción de mantenimiento, y en que momento en el tiempo
3. Deberá ejecutarse un estudio analítico para definir las causas de un daño en progreso, o
4. La máquina debe ser sacada de operación de inmediato para evitar un daño inminente

Medir la vibración es la parte más importante en los programas de análisis de vibraciones, dado que sin buenos datos, no se pueden esperar buenos resultados. La incógnita ahora es ¿cómo determinar si el nivel de vibración global encontrado en la máquina está indicando vibración excesiva?

Posiblemente, uno de los aspectos más importantes cuando se está evaluando la condición de la máquina y detectando si existen problemas, radica en saber si el nivel de vibración encontrado es o no aceptable. Para ello, puede escogerse alguno de los siguientes tres métodos de evaluación:

1. Evaluación por comparación de los valores medidos con valores límite recomendados por una guía o norma, por ejemplo: ISO 2372, ISO 10816.

2. Evaluación por comparación de los valores obtenidos con valores límite recomendados por el fabricante. Estos valores por lo general vienen indicados en los manuales de operación.

3. Evaluación de la variación de los valores medidos a lo largo del tiempo (tendencia). En síntesis consiste en la comparación de los niveles actuales de vibración con niveles o tendencias anteriores, y por lo general aplica en aquellos casos en los que no se cuenta con valores establecidos por el fabricante o se carece de normas.

Los métodos arriba enumerados pueden no ser los únicos, y dadas las circunstancias que se viven en cada planta, puede ser que exista otro método que resulte más efectivo que los antes mencionados.

IV. INVESTIGACIÓN PROPUESTA

Como se mencionó al inicio del presente trabajo, la investigación está orientada a mejorar la condición de operación de una turbina de vapor marca Elliott modelo DYR, y evaluar su impacto en los costos de operación.

4.1 Caracterización del sitio

La turbina a la que se hace referencia en este trabajo, se encuentra instalada en ingenio Palo Gordo, y es la máquina motriz de uno de los 6 molinos de caña con que cuenta.

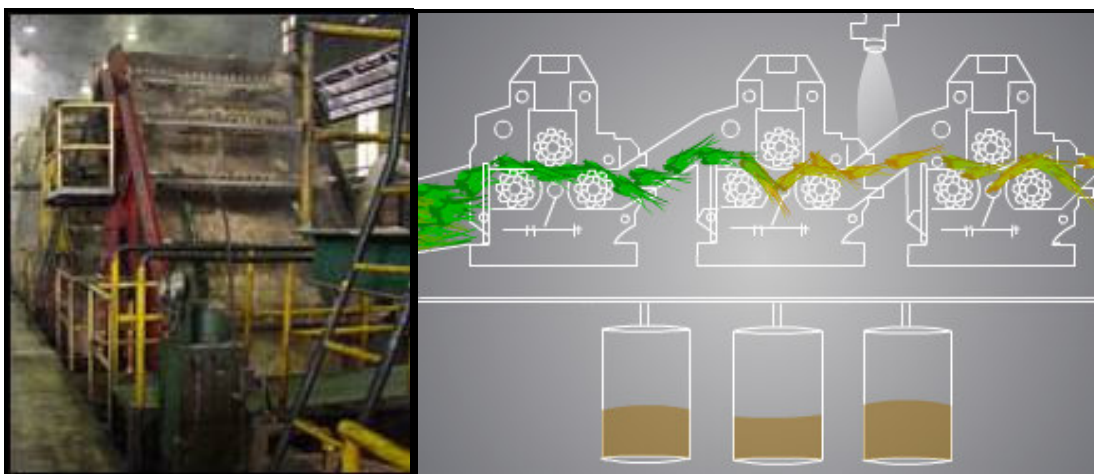


Figura 26. Fotografía y esquema de los molinos de caña en un ingenio azucarero.

Los molinos forman parte de la línea de producción de azúcar, a los molinos se les alimenta con caña de azúcar y agua, con el objetivo de extraer el jugo de la caña. El bagazo que resulta luego de extraer el jugo a la caña, es utilizado como combustible para las calderas donde se genera el vapor que luego es utilizado como fluido de trabajo en las turbinas de vapor.

Una condición de operación inadecuada para la turbina de vapor trae como consecuencia múltiples problemas que impiden la continuidad de la operación, que

es justamente el caso que se reporta. La información que cataloga la condición de operación como no aceptable o inadecuada, se da a conocer en el siguiente inciso.

Como resultado del análisis de vibraciones e información del ingenio en cuanto a la dificultad de que la turbina trabaje adecuada e ininterrumpidamente más el aumento de la cantidad de vapor, se opta porque esta turbina sea trasladada al centro de servicio de Elliott, ubicado en Guatemala, para que sea realizado un mantenimiento integral y de esa manera eliminar los problemas que causan interrupciones en la continuidad de las operaciones.

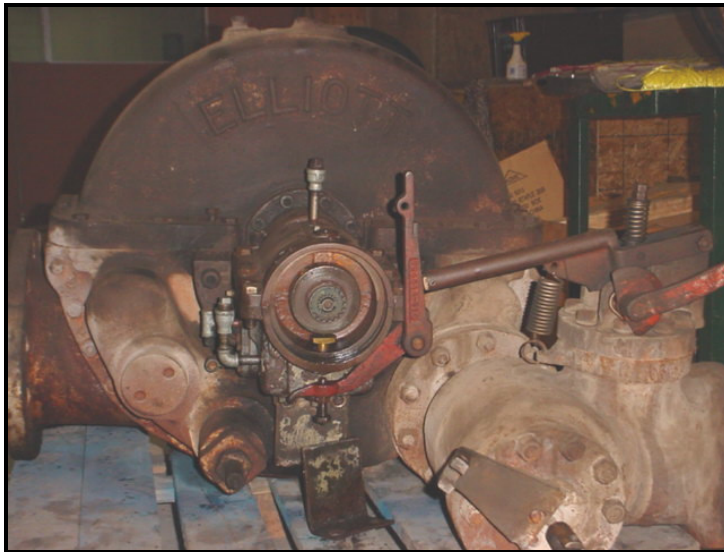


Figura 27. Aspecto de la turbina al llegar al taller.

En relación al centro de servicio, este es un taller inscrito en el Registro Mercantil de Guatemala con el nombre de Elliott Turbocharger Guatemala, S.A., y es el lugar a donde se trasladó la turbina completa para llevar a cabo el mantenimiento integral.

Elliott Guatemala es un taller de mantenimiento que se encuentra adscrito al taller Elliott Turbomachinery de Houston, Texas, y es parte de Elliott Company, con sede en Jeannette, Pennsylvania.



Figura 28. Vista parcial de las instalaciones del taller Elliott en Guatemala.

Este taller provee a diferentes compañías, a nivel centroamericano, de servicios de mantenimiento industrial (outsourcing). Dentro de los servicios de mantenimiento que se brindan, se encuentran los servicios que se efectúan en el sitio de operación (*in situ*) y servicios desarrollados en el taller.

Los servicios de campo, desarrollados en las instalaciones de las empresas clientes, son:

- 🏭 Análisis de Vibraciones
- 🏭 Balanceo Dinámico
- 🏭 Alineamiento de Ejes Acoplados con Sistema Láser
- 🏭 Mantenimiento Preventivo a Turbocargadores

Entre los servicios que se efectúan en el taller, encontramos:

- 🏭 Balanceo Dinámico
- 🏭 Reparación, Mantenimiento y Reacondicionamiento de Turbinas de Vapor
- 🏭 Reparación, reconstrucción y mantenimiento de turbocargadores

4.2 Información disponible

Vamos a empezar por recordar los principales inconvenientes que presentaba esta turbina de vapor y que en esencia son tres:

- disminución de potencia,
- aumento del consumo de vapor, y
- vibración excesiva

A continuación analizamos información relacionada con la operación de la turbina, y que determina o mantiene la turbina de vapor en condición de operación no aceptable.

4.2.1 Disminución de potencia

La disminución de potencia, fue detectada hipotéticamente al ver disminuida la capacidad de molienda del molino que es accionado por la turbina de vapor.

La disminución de potencia en la turbina de vapor, propició que este molino en diversas oportunidades, se viera sobre abastecido produciendo un paro en la línea de producción y teniendo la necesidad de aligerar su carga para que pudiera volver a entrar en línea con los restantes molinos.

Se estima que, según historial de producción, inicialmente el tandem o línea de producción donde se encuentra éste molino, era capaz de procesar en promedio 4,000 toneladas métricas de caña al día, con la turbina operando a aproximadamente un 80% de su capacidad, lo que significa que el molino estaba proyectado para procesar hasta 5,000 toneladas métricas de caña al día con la turbina operando al 100% de carga. Esto quiere decir que la capacidad instalada sobrepasa el nivel de producción, y de hecho fue proyectado de esa manera estimando que a largo plazo, el nivel de producción iría en ascenso.

Antes de realizar el mantenimiento integral a la turbina de vapor, el nivel de producción exigido era procesar en promedio 4,400 toneladas de caña al día, lo que significa que la turbina debería operar a aproximadamente un 90% de su capacidad de diseño, sin embargo algunas veces no fue posible sobrepasar las 4,400 toneladas al día, debido a la insuficiente potencia de la turbina para hacer seguir trabajando el molino.

Posteriormente, cuando la turbina ya fue desarmada en el taller de Elliott Turbocharger Guatemala, S.A., se encontró evidencia de la pérdida de potencia, siendo estos principalmente:

- deterioro por erosión en las toberas
- desgaste en los álabes móviles y estacionarios
- holguras incorrectas tales como la separación entre anillo de toberas y la primera etapa de álabes
- depósitos y erosión en los álabes móviles

El detalle de las holguras las podemos observar en el capítulo anterior, mientras que el resultado de las inspecciones realizadas en la turbina de vapor, se comentan en este capítulo, inciso 4.2.4.

4.2.2 Aumento del consumo de vapor

Cualitativamente, el aumento del consumo de vapor se reflejaba en las fugas de vapor existente, principalmente en los sellos del lado vapor, en donde se encuentra el vapor a alta presión.

Otro aspecto en el cual se puede detectar el aumento del consumo de vapor, de acuerdo al balance de energía en el ingenio, es la existencia de una mayor cantidad de vapor de escape en el área de proceso con la constante liberación del excedente de vapor de escape a la atmósfera, aunque la mayor

cantidad de vapor de escape en el área de proceso no sea producido únicamente por la turbina a la cual se hace referencia en este informe, lo que significa que probablemente todas las turbinas estén consumiendo una cantidad de vapor superior a la de diseño.

Este aumento del consumo de vapor, se hace evidente también por la necesidad de aumentar la producción de vapor en la caldera que provee vapor directo o de alta presión al grupo de turbinas, una acción que incrementa los costos operativos, puesto que para producir ese vapor adicional, el ingenio se ha visto en la necesidad de utilizar combustible derivado del petróleo, debido a que el vapor generado únicamente bagazo sería insuficiente.

Posteriormente, cuando se realizó la inspección a la turbina desarmada, se determinó que el estado de desgaste y ligera erosión en que se encontraban los álabes de la turbina, principalmente en la primera etapa, además del desgaste y erosión en las toberas, lo que modificó la geometría original, hace disminuir la eficiencia de la turbina.

También se encontró que en el área del eje donde se produce el sellado con los anillos de carbón, se encontraba erosionado lo que impedía realizar un buen sellado y propiciaba las fugas de vapor que se habían reportado en el ingenio.

Al disminuir la eficiencia de la turbina y para mantener la velocidad de operación de la misma (característica de las turbinas de vapor), el gobernador reacciona haciendo que la válvula del gobernador permita el ingreso de una cantidad mayor de vapor, lo que sin duda alguna, contribuye al aumento del vapor de escape, además el vapor de escape abandona la turbina con una presión ligeramente superior a la de diseño, por lo que también se veía incrementada la cantidad de fugas en la tubería de vapor de escape.

4.2.3 Vibración excesiva

Con relación a la vibración excesiva, la medición de los niveles de vibración indicaba que la condición de operación de la turbina era no aceptable, de acuerdo con la norma ISO 2372 (ver tabla resumen de la norma en los anexos).

El análisis de vibraciones efectuado, indicaba la presencia de desbalance, ligero desalineamiento entre la turbina y el reductor al cual está acoplado, y holgura mecánica, la que probablemente fue producida por desgaste en los cojinetes de deslizamiento ocasionado por las altas cargas dinámicas producto de la vibración excesiva. En los anexos puede observarse los valores de los niveles de vibración encontrados antes y después del mantenimiento.

El inconveniente con la vibración radica en que contribuye al desgaste mismo de los cojinetes de deslizamientos, fatiga elementos de la turbina y además provoca que se active el mecanismo de disparo de la turbina o mecanismo de paro de emergencia, el cual está diseñado para activarse únicamente en presencia de problemas de sobrevelocidad.

4.2.4 Inspección realizada en la turbina de vapor

La inspección realizada en el taller a la turbina de vapor, consistió en esencia en la evaluación de los componentes de la turbina y medición de holguras.

La realización de medición de algunas holguras va de la mano con el desarmado, y posteriormente se realizó limpieza e inspección a las partes que componen la turbina. Los resultados principales de esta inspección, pueden observarse en los formatos que se encuentran en los anexos.

Posteriormente, una vez evaluadas las partes y/o componentes de la turbina, se realizó un análisis para determinar que componentes debían ser

reemplazados, que componentes podrían ser reutilizados, y principalmente que nivel de reacondicionamiento se le debía dar a las partes que presentaban algún nivel de desgaste o deterioro y que se reutilizarían posteriormente.

Sin lugar a dudas, la turbina se encontraba en condiciones no óptimas para una operación eficiente y se encontró suficiente evidencia que respaldó la premisa inicial, de que los principales problemas tales como disminución de potencia, aumento de consumo de vapor y vibración excesiva, eran ocasionados por el mal estado de algunos componentes de la turbina.

4.2.5 Análisis de la información

De la información contenida en los reportes de inspección, la inspección propia y el análisis con los manuales del fabricante, se encontró que era necesario realizar como mínimo, los siguientes trabajos:

- Limpieza con chorro de arena a presión al rotor para la eliminación de depósitos de sarro y maquillaje de álabes móviles (para mejorar geometría del área de flujo de vapor)
- Balanceo dinámico al rotor
- Cambio de los anillos de carbón (juego completo) y reacondicionamiento del área de sello del eje
- Cambio de chumaceras (los 2 juegos) y sus anillos de lubricación
- Cambio de empaques a las válvulas de mano, válvula de gobernador y válvula de disparo por sobrevelocidad
- Cambio de camisas de sello del eje con las carcasas de chumaceras
- Cambio de rodamiento de empuje axial
- Cambio de resorte y asiento de la válvula de disparo por sobrevelocidad, así como otros componentes del mecanismo de disparo por sobrevelocidad
- Pistón de disparo por sobrevelocidad
- Colador de admisión de vapor

- Cambio de álabes estacionarios (álabes reversibles) y maquinado de anillo de toberas
- Fabricación de espaciadores para ajustar holguras entre álabes móviles, anillo de toberas y álabes estacionarios
- Reparación de roscas varias para instalar toda la tortillería (muchos tornillos estaban sin colocarse)
- Esmerilado de válvulas y asientos de válvulas
- Alineamiento de chumaceras

Recordando los principales problemas en la turbina, los trabajos que se listaron anteriormente tenían como propósito minimizar o eliminar los problemas de la turbina y se indica a continuación el efecto que se espera al realizarlos.

Para ayudar a minimizar el nivel de vibración, realizamos:

- a) La limpieza con chorro de arena, para eliminar los depósitos de sarro en los álabes móviles, los cuales contribuyen al desbalance debido a que la acumulación no es uniforme.
- b) Posterior a la limpieza, el balanceo del rotor es indispensable debido a que aunque se elimina el sarro, también existe un cierto grado de erosión y desgaste en los álabes, y al no ser uniforme la pérdida de material, también contribuye al desbalance.
- c) El cambio de chumaceras, sirve para eliminar las condiciones de holgura mecánica que se descubrieron con el análisis de vibraciones y que pudo ser corroborado al momento de la inspección de holguras en taller, y ayuda a tener una operación más suave.
- d) El alineamiento entre las carcassas de las chumaceras ayuda a minimizar aún más el nivel de vibración y al mismo tiempo ayuda a minimizar el desgaste.

Mientras tanto, para recuperar potencia en la turbina, se propone la realización de trabajos tales como:

- a. Cambio de álabes estacionarios, para contribuir a la mejora de la geometría del flujo de vapor.
- b. Maquillaje de álabes móviles, que en esencia consiste en la eliminación de rebabas producto de desgaste y erosión, más la eliminación de deformaciones ligeras en el perfil del álabe. Esto también contribuye a mejorar la geometría del flujo de vapor y minimiza la fricción entre vapor y superficie de los álabes.
- c. Trabajos de maquinado en el anillo de toberas para mejorar la eficiencia.

Estos tres trabajos contribuirán a mejorar el funcionamiento termodinámico y con ello aumentar la potencia desarrollada, pero no sin antes olvidar que la fabricación de los espaciadores para reemplazar los que tenía y ajustar de mejor manera las holguras, principalmente las holguras entre los álabes móviles, álabes estacionarios y anillo de toberas.

Para ayudar a disminuir el consumo de vapor, se tendrá que realizar lo siguiente:

- a) Reacondicionamiento del eje en el área donde se ubican los anillos de carbón, más el cambio de los anillos de carbón, permitirá realizar un buen trabajo de sellado que impedirá fugas de vapor.
- b) Colocación de nuevas empaquetaduras varias que se sitúan entre las carcasas y los vástagos de las válvulas del gobernador y de disparo por sobrevelocidad.
- c) Colocación de productos adecuados para sello entre las carcasas al momento de realizar el armado de la turbina.

- d) Reparación de roscas, que permitirá colocar la cantidad correcta de tornillos para que exista el apriete justo y correcto entre partes y evitar el apareamiento de nuevas fugas de vapor.

Por último, cambio de partes como camisas de sello del eje, anillos de lubricación, rodamiento de empuje axial, pistón de disparo por sobrevelocidad, y la reparación de roscas entre otros, contribuirá a mejorar el funcionamiento en general de la turbina.

4.3 Metodología

La forma como se llevó a cabo el presente trabajo, consistió inicialmente en la utilización de la sistematización de experiencias, lo que posteriormente dio paso a la elaboración y adaptación del presente informe.

Dentro del proceso de la sistematización, luego de determinar el objeto de estudio, el cual es el mejorar la condición de operación de una turbina de vapor Elliott modelo DYR, a través de un correcto proceso de mantenimiento, se fijaron los objetivos los que podemos encontrar al inicio de este informe, identificar las fuentes de información, las cuales se clasificaron en primarias y secundarias.

- **Fuentes de Información Primaria**

Encontramos como fuente primaria de información, los reportes generados durante las inspecciones de trabajos anteriores, que indican el trabajo realizado, así mismo sirve como una retroalimentación para analizar junto a las mejoras que se reportaron luego de los trabajos realizados.

Esta información es sumamente importante, pero se considera que los encargados de completar dichos instrumentos, no completan toda la información basándose en el hecho de que nunca ha existido necesidad de completarla, o en

algunos otros casos por la falta de entendimiento a razón de que los formatos en su mayoría están redactados en idioma inglés, tornándose esta situación en dificultad ocasional para entender que información debe colectarse.

Sin embargo, hay que hacer notar que mucha de esa información sin completar puede ser vital para la decisión en cuanto a los trabajos de reacondicionamiento o recuperación que pueda necesitarse y que el éxito en la mejora de la condición de operación depende mucho de estos factores. Dicha información se complementa con estudio a textos relacionados con la materia, pero principalmente al estudio y análisis de manuales e información específica de la turbina de vapor que se menciona en este informe.

Las técnicas e instrumentos principales fueron el arqueado de archivos y material informativo, lo que permitió buscar, ordenar, clasificar y establecer un listado de todos los reportes generados durante las inspecciones de trabajos anteriores, que son los registros con que se cuentan y a información a analizar.

- **Fuentes de Información Secundaria**

En las fuentes de información secundaria, encontramos dos fuentes: la memoria de los protagonistas, y, la información relacionada con la operación de la turbina obtenida directamente en el lugar de operación de ésta.

El uso de la primer fuente se justifica en el hecho de que los técnicos mecánicos que han trabajado en éste tipo de máquinas, cuentan con experiencia propia y conocimientos adquiridos en la praxis y en el intercambio con técnicos del mismo campo, principalmente cuando se ha tenido la asistencia de personal procedente de los talleres de Estados Unidos, sin olvidar también, las capacitaciones recibidas con el objeto de mejorar las habilidades y conocimientos del personal.

Dichas experiencias no aparecen en el manual del fabricante, lo que definitivamente ayudaría y fortalecería el desempeño, ya que la experiencia de algunos, puede ayudar a otros a resolver de mejor manera las dificultades y viceversa.

Finalmente, la información obtenida en el ingenio relacionada con la operación de la turbina, sirve como agente de comparación para verificar la mejora en la condición de operación.

Con el producto obtenido de la memoria de los protagonistas y la formulación de un cuadro de reconstrucción de procesos se buscará establecer los procedimientos de trabajo e inspección que se realizan durante el mantenimiento y/o reacondicionamiento de una turbina de vapor Elliott.

Ordenamiento de la Información Primaria

Lugar: Taller Elliott Turbocharger		Fecha: Año 2003
<p>Tema: Mejorar la condición de operación a turbina de vapor marca Elliott</p>	<p>Preguntas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ ¿Qué factores determinan la condición de operación? ▪ ¿Para qué debemos realizar el mantenimiento? ▪ ¿Qué partes se deben inspeccionar? ▪ ¿Con qué método deberíamos realizar las inspecciones? ▪ ¿Qué medidas y holguras debemos realizar? ▪ ¿Cómo deberíamos realizar dichas mediciones? ▪ ¿Qué cuidados se deben tener al desarmar para no dañar partes? ▪ ¿Qué proceso de armado se debe seguir para evitar procedimientos erróneos que puedan producir una falla prematura de la máquina? ▪ ¿Quiénes se benefician si realizamos un conveniente mantenimiento y se mejora la condición de operación? 	

Tabla II. Ordenamiento de la información.

Situación Inicial:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Necesidad de reparar la turbina de vapor para que esta mejore su condición de operación, para evitar paros no programados durante la época de zafra, pero principalmente disminuir el consumo de vapor, aumentar potencia y eficiencia y minimizar vibración mecánica. 2. Antecedentes indican que esta turbina había sido objeto de mantenimiento en años anteriores, por personal de ingenio a donde pertenece la turbina. 3. No se consideraba la utilización de repuestos originales y muchos de ellos eran fabricados según muestra, pero no tomaban en cuenta desgaste o deformaciones por trabajo, por lo que los nuevos repuestos, ya traían defectos que perjudicaban la operación.
Proceso de Intervención:	<ol style="list-style-type: none"> 1) Analizar la situación previa al mantenimiento, minuciosa inspección de todos los componentes de la turbina, reparar adecuadamente las partes que así lo ameritaban, instalar partes nuevas donde se necesitó y realizar un cuidadoso proceso de armado. 2) Se analizó la operación de la turbina posterior al mantenimiento, para corroborar la mejora en la condición de operación y proyectar la disminución de costos operativos. 3) Elaboración de reporte para el cliente, indicando los resultados de la inspección y mantenimiento realizados.
Situación Final:	<ol style="list-style-type: none"> 1) La condición de operación de la turbina mejoró considerablemente, y el resultado se hizo palpable en la reducción de la vibración mecánica, reducción de consumo de vapor, aumento de potencia y prácticamente la eliminación de los paros no programados. 2) Se sentó un precedente que indicaba que una adecuada reparación y mantenimiento, logra mejorar las condiciones de operación de las turbinas de vapor.

Tabla II (continuación). Ordenamiento de la información.

<p>Lecciones Aprendidas:</p>	<p>1) Fue necesario estudiar los manuales de la turbina de vapor, para asegurar no olvidar evaluar detalles durante la inspección.</p> <p>2) Será necesario modificar los formatos que se utilizaron en la inspección, específicamente realizar la traducción a idioma español, debido que al estar en inglés (formatos originales provenientes de casa matriz), pueden confundir a quien no domina dicho idioma y puede inducir confusiones o errores en la inspección.</p> <p>3) Fue necesario auxiliarse en algunos puntos, con opiniones y recomendaciones de técnicos estadounidenses, pertenecientes al taller de Houston.</p>
------------------------------	--

Tabla II (continuación). Ordenamiento de la información.

4.4 Resultados

Los resultados más relevantes obtenidos, están orientados al objetivo general planteado al inicio de este trabajo y se enumeran a continuación:

1. Una vez realizados todos los trabajos indicados en el numeral 4.2.5, y finalizado el armado de la turbina, se determinó que el mantenimiento en general es altamente satisfactorio, pues se logró que la turbina quedara con las holguras dentro de las especificaciones indicadas en el manual, además el reemplazo de componentes y el reacondicionamiento de las partes que se volvieron a utilizar, permitió que la turbina pueda nuevamente estar bajo los estándares con las cuales fue fabricada.

2. Los resultados más apreciables sin lugar a dudas, se dieron en el lugar de trabajo de la turbina, en el ingenio azucarero, donde se tuvo la oportunidad de realizar un análisis de vibraciones, indicando un nivel máximo de 4.06 mm/s rms, lo que coloca a esta turbina en un nivel aceptable.

3. Además, ya no se visualizaron las anteriores fugas de vapor, y en las estadísticas de consumo de vapor que maneja el área de operaciones del ingenio, se vio una reducción sustancial en el consumo de vapor, que pasó de ser 3,940 kilogramos / hora, antes del mantenimiento, a 3,425 kilogramos / hora, después del mantenimiento, logrando una reducción aproximada del 15% del consumo de vapor. Las condiciones generales del vapor suministrado a la turbina son: presión de vapor a la entrada: 180 psi; temperatura del vapor a la entrada: 210 °C; presión de vapor a la salida: 20 psi.
4. El aumento de potencia, se percibe en función de que la máquina no presentó atascamientos en el molino, o paradas no programadas como anteriormente ocurrían. El aumento de potencia sin duda es producto de la mejora de la eficiencia de la turbina cuyo resultado se obtuvo a partir de la corrección de importantes piezas como los álabes móviles y estacionarios, anillo de toberas y holguras, y esta mejora de la eficiencia también contribuye de manera indirecta en una disminución del consumo de vapor, puesto que se obtiene una mayor cantidad de potencia motriz con una menor cantidad de vapor.
5. Los costos de operación se ven reducidos en función de prácticamente la eliminación de las paradas no programadas en la zafra siguiente al mantenimiento de la turbina, además, la disminución del consumo de vapor incide en una disminución del vapor de escape, lo que se traduce en ahorro en vapor no liberado a la atmósfera y al mismo tiempo, disminución de combustibles en la caldera para la generación de vapor.

Datos preliminares indican un ahorro en utilización de combustibles de aproximadamente Q.200,000.00 por zafra, en función de la reducción de consumo de vapor en 515 kilogramos / hora de vapor en la turbina, equivalentes a 1,802,500 kilogramos de vapor por zafra.

4.5 Discusión de resultados

La discusión de resultados se efectúa a continuación, siguiendo el orden en que se presentaron los resultados en el inciso anterior.

1. Se determina satisfactorio el mantenimiento que se realizó a la turbina de vapor en las instalaciones de Elliott Guatemala, debido a que el proceso en general se realizó cuidando que toda la información posible fuera reportada y analizada, fueron reemplazados los componentes necesarios y reacondicionadas las partes que se reutilizaron, y sobre todo, el nivel de satisfacción expresado por el cliente con relación a la condición de operación y el nivel de disponibilidad alcanzado.

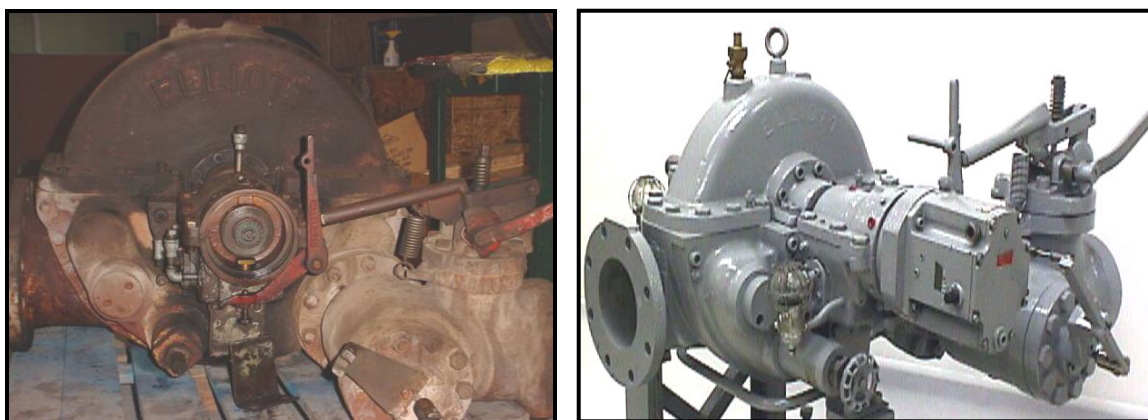


Figura 29. Turbina Elliott antes (izquierda) y después (derecha) del mantenimiento.

2. Se obtuvo una reducción sustancial en el nivel de vibración mecánica, habiendo quedado la vibración en un nivel de 4.06 mm/s rms, mientras que antes del mantenimiento se encontraba en 39.9 mm/s, revelando esta situación una operación poco confiable debido al alto nivel de vibración.

Este alto nivel de vibración como ya se explicó anteriormente, se producía por problemas de desbalance, holgura mecánica producida por desgaste en chumaceras y desalineamiento entre otros. Además, esta abrupta vibración provocaba que el sistema de disparo por sobrevelocidad se activara sacando

de operación la turbina. Los elementos del sistema de disparo se encontraban con fuertes marcas de desgaste a causa del constante golpeteo y este problema se solucionó únicamente con el cambio de los elementos que se encontraban con deterioro.

Con la reducción de la vibración se asegura una continuidad en la operación en un nivel confiable y no repercute en la activación del sistema de disparo por sobrevelocidad, evitando así la interrupción no deseada en la operación de la turbina.

3. Como se expresó en el inciso anterior, de acuerdo con información proporcionada por el ingenio, se encontró aproximadamente una reducción en el consumo de vapor del 15% (515 Kg./hora), pasando de consumir 3,940 Kg./hora a 3,425 Kg./hora, con el vapor en las siguientes condiciones: a la entrada, una presión de 180 psi y 210 °C de temperatura, mientras que a la salida tenemos una presión de 20 psi.

Sin embargo, de acuerdo con los valores de diseño, se puede reducir aún más el consumo de vapor en ésta turbina, a aproximadamente a 2,950 Kg./hora, y para ello lo que se requiere es cambiar las condiciones del vapor a la entrada, a una presión de 200 psi y 280 °C, e implicaría además un aumento en la potencia desarrollada en la turbina, por lo que en un futuro podría incluso soportar carga de trabajo superiores a las 5,000 toneladas métricas de caña al día, que es la capacidad proyectada por el ingenio.

4. La premisa del aumento de potencia, se fundamenta en el hecho de que el mantenimiento adecuado, un armado correcto y holguras adecuadas, permitirán que el ciclo termodinámico que se lleva a cabo en la turbina sea más eficiente y por lo tanto permita desarrollar una mayor potencia.

Esta premisa fue validada en el ingenio, cuando en la zafra siguiente al mantenimiento, no ocurrieron los problemas anteriores de acumulación de caña en el molino y que provocaban que tuvieran que salir de operación con la intención de aligerar la carga del molino y de esa manera poder seguir produciendo.

5. En relación a los costos de operación, que es uno de los aspectos a analizar en el presente informe, no se tienen cantidades exactas y/o monetarias para evaluar la totalidad de la reducción, por lo que en este caso la evaluación de la reducción de los costos de operación se realizan en función del ahorro que significa la reducción del consumo de vapor.

Del punto 3, anteriormente discutido, encontramos que la reducción del consumo de vapor en la turbina es de 515 Kg. de vapor / hora. Este ingenio opera en cada zafra un promedio de 145 días, lo que equivale a 3,500 horas de producción, es decir que la turbina producirá un ahorro de vapor por zafra de 1,802,500 Kg.

Anteriormente vimos que el ingenio siempre necesita utilizar bunker como combustible para la generación de vapor, debido en parte a la variabilidad en el porcentaje de fibra y humedad del bagazo (combustible principal), que no asegura la producción de vapor necesaria para la operación del ingenio, y adicional a estos factores se encuentran la eficiencia de la caldera, más las fugas de vapor en tuberías. El bunker utilizado en el ingenio garantiza una producción promedio de 25 kilogramos de vapor por litro, lo que indica que podemos prescindir de 72,100 litros de bunker por zafra, en función del vapor que no necesitará consumirse en la turbina de vapor, además, considerando que en el mercado local se pueda encontrar el precio del bunker en Q. 2.80 por litro, tenemos el siguiente cálculo:

$$72,100 \text{ litros de bunker} * Q 2.80 / \text{litro} = Q 201,880.00$$

Este valor representa una aceptable disminución en el costo de operación, y representa un ahorro, considerando que el costo de la reparación se calcula en Q 50,000.00, sin embargo, podemos encontrar otros rubros que en ésta oportunidad no pudieron ser cuantificados, los que significan una disminución adicional en los costos de operación.

- a) Paradas no programadas. Este aspecto reduce los costos de operación del ingenio; la razón radica en que al mantener la continuidad en la operación, desaparecerán los costos vinculados a los salarios de las horas-hombre de los operadores que tienen que estar presentes, pero sin poder trabajar mientras se restablece la operación.
- b) Disminución del consumo de vapor. La reducción del consumo de vapor, se da como resultado de la eliminación de fugas y el aumento de la eficiencia termodinámica de la turbina.

Al reducirse el consumo de vapor, la turbina entrega una menor cantidad de vapor de escape al sistema de baja presión que se necesita en producción, y con ello reducimos la cantidad de vapor liberado a la atmósfera, debido al excedente de vapor en el proceso, lo que se traduce en energía desperdiciada.

Adicional, como se presenta en la página anterior, se reducen los costos por consumo de bunker que se necesitaba para producir más vapor y abastecer vapor a alta presión, ya que de acuerdo al balance energético del ingenio, vimos que no era suficiente el bagazo como combustible.

- c) Otro factor que nos hará reducir costos operativos, radica en la eliminación de las intervenciones de emergencia, costos de repuestos y los costos de inventarios.

Es impresionante ver los costos que muchas veces implican horas extras en personal de mantenimiento y los costos de los repuestos para restablecer la máquina y que muchas veces tendrán ser reemplazados en poco tiempo no llegando ni siquiera a pasar el 50% de la vida útil estimada, además están los costos que implica mantener un inventario alto de repuestos, puesto que no se tiene certeza de que partes pueden llegar a necesitarse, lo que obliga muchas veces a abastecerse innecesariamente de grandes cantidades de repuestos que implica dinero inutilizado.

Los planteamientos anteriores muestran en esencia, que la realización de un buen mantenimiento a una turbina de vapor solamente, beneficia enormemente el sistema productivo del ingenio, lo que nos muestra el camino a seguir, es decir realizar el mismo tipo de mantenimiento al conjunto de turbinas, y esperar que los resultados obtenidos se multipliquen.

Como una empresa de servicios de mantenimiento, queda también la satisfacción manifestada por el cliente, lo que nos indica que se realizó un buen trabajo.

V. CONCLUSIONES

1. Las principales condiciones encontradas que contribuían para que la condición de operación de la turbina estudiada fuera no aceptable eran: desbalance, holguras inadecuadas, desgastes en chumaceras y anillos de carbón. El desbalance y el desgaste en chumaceras provocaban alta vibración, las holguras inadecuadas mermaban la eficiencia y por lo tanto disminuían la potencia y aumentaban el consumo de vapor, mientras que los anillos de carbón desgastados provocaban fugas de vapor contribuyendo también a un mayor consumo de vapor.
2. Se determinó que el correcto proceso de reacondicionamiento va en función de una correcta inspección y para ello es imprescindible tener la mayor cantidad de información que ayude a determinar niveles de desgaste o daño y con ello determinar cual es el trabajo a realizar, y que se presentó en el numeral 4.2.5, para que la condición de operación mejorara.
3. Los principales cambios que debían realizarse en la turbina de vapor, eran las chumaceras, anillos de lubricación y los sellos para evitar fugas de vapor, tales como los anillos de carbón. Las reparaciones en sí fueron más orientadas al tema del reacondicionamiento, con excepción de los álabes estacionarios que tuvieron que ser reemplazados.
4. Se registró un cambio sustancial en la condición de operación, dicho cambio es altamente positivo y se vio reflejado en los informes del ingenio que registraban prácticamente el desaparecimiento de las paradas no programadas y el descenso en el consumo de vapor, y en relación a la vibración mecánica, un análisis de vibraciones posterior al mantenimiento registró una disminución sustancial de la vibración. En otras palabras aumentó el porcentaje de disponibilidad de la turbina.

5. Los costos de operación principales están vinculados al tema de la producción de vapor y los repuestos. Al mejorar la condición de operación, se redujo el consumo de vapor lo que implicó reducir el consumo de combustibles para la generación de vapor, calculado en Q 200,000.00 por zafra. Por otro lado, se redujo la necesidad de mantener un inventario de repuestos amplio y variado, por lo que el costo del inventario de repuestos puede ser reducido. Indirectamente, al incrementar la eficiencia y disponibilidad de la turbina, se eliminan costos indirectos tales como los salarios horas-hombre de improductividad cuando se tenían paros no programados, salarios por horas extras del personal de mantenimiento, así como el costo de no producción.

VI. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda que el conjunto de turbinas del área de molinos del ingenio sean objeto de mantenimientos integrales que ayuden a mejorar la condición de operación de todas las turbinas y de esa manera poder reducir aún más el consumo de vapor, aumentar las eficiencias y poder desarrollar un sistema productivo más rentable.
2. Cambiar las condiciones del vapor generado en la caldera, ya que esto ayudará enormemente al mejoramiento de la eficiencia, desarrollo de potencia y disminución de consumo de vapor. En esencia implica aumentar la presión en 20 psi y la temperatura en 70 °C. Se deben mejorar también, las condiciones del vapor, ya que muchas veces el agua empleada no es tratada correctamente, perjudicando a las turbinas por que dejan depósitos de sarro y pueden corroer los álabes.
3. Mantener un monitoreo periódico de medición de niveles de vibración, para evitar que un aumento excesivo de vibración pueda causar un deterioro de prematuro de componentes importantes y que ello pueda ser negativo para la condición de operación.
4. Atender a las instrucciones generales e indicaciones sobre operación y mantenimiento, incluidas en el capítulo 3 de este trabajo, para ayudar a mejorar la operación de la turbina y prolongar la vida útil de la máquina.

VII. BIBLIOGRAFIA

Libros

- Duffuaa, Salih O. Sistemas de Mantenimiento. Planeación y Control. México: Editorial Limuna, S.A. de C.V. 2006. 419 Pág.
- Elliott Company. Instruction Book No. 100-L Elliott Turbines Type YR. Jeannette, Pennsylvania, 1997.
- Kearton, William J. Steam turbine theory and practice. 7a. edición. Londres, UK. Editorial Sir Isaac Pitmain & Sons, Ltd. 1961.
- Landaverry Villeda, César Adalberto. Actualización del Balance Energético del Ingenio Los Tarros. Informe final del Ejercicio Profesional Supervisado, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1996.
- Severns, W.H. y otros. Energía mediante vapor, aire o gas. 5ª ed. México: Editorial Reverté, S.A., 1996. 503 Pág.

Manuales Técnicos

- Elliott Turbomachinery Inc. Elliott YR Drawing and Working Procedures. Jeannette, Pennsylvania, 1998.
- United Technologies Elliott. Installation, Operation and Maintenance Instructions for Elliott CYR/DYR/DYRM Turbine. Jeannette, Pennsylvania, 1990.

Otros

- Material didáctico proporcionado en curso de entrenamiento en YR Steam Turbine Training.
- Notas tutoriales de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad de América, Bogotá, Colombia, consultadas el mes de noviembre de 2006. Disponible en: <http://www.uamerica.edu.co/tutorial/1intro.htm>

VIII. ANEXOS

8.1 REPORTE DE VIBRACIONES MECÁNICAS

REPORTE DE ANALISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS			
CLIENTE:	Ingenio Palo Gordo	Realizado por:	Luis Velásquez
LUGAR:	Area de Molinos	Revisado por:	Luis Velásquez
MÁQUINA:	Turbina de Vapor, Molino # 1	Proyecto:	Trabajo graduación

Esquema de posiciones de la máquina

Análisis efectuado previo a Mantenimiento



PUNTO	TURBINA		REDUCTOR	
	CHUMACERA 1	CHUMACERA 2	CHUMACERA 3	CHUMACERA 4
Vertical	25.70	39.90	6.50	1.55
Horizontal	6.80	6.50	6.20	5.00
Axial	9.50	No se registró	No se registró	2.10


Análisis efectuado después del Mantenimiento

PUNTO	TURBINA		REDUCTOR	
	CHUMACERA 1	CHUMACERA 2	CHUMACERA 3	CHUMACERA 4
Vertical	4.06	2.41	3.76	1.31
Horizontal	1.88	1.74	2.85	3.01
Axial	1.85	No se registró	No se registró	2.95


8.2 NORMA ISO 2372 PARA EVALUACIÓN DE LA VIBRACION.

**VALORES LIMITES PARA EVALUAR
VIBRACIONES MECANICAS DE MAQUINARIA
SEGÚN ISO 2372 Y VDI 2056
Vibración (rms) en mm/s**








NO ACEPTABLE



APENAS ACEPTABLE




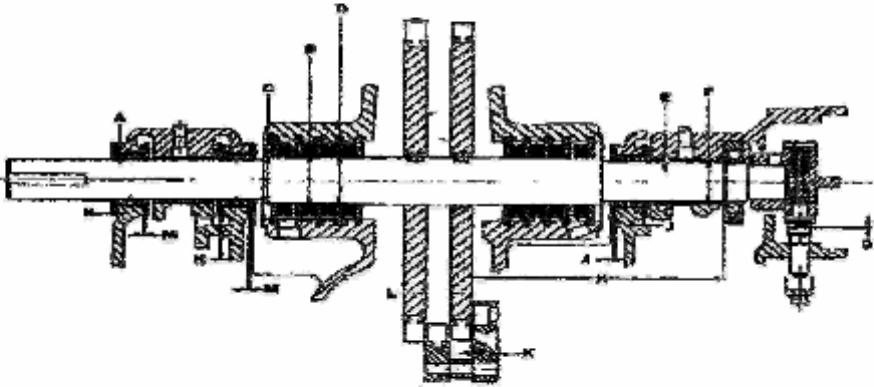
ACEPTABLE




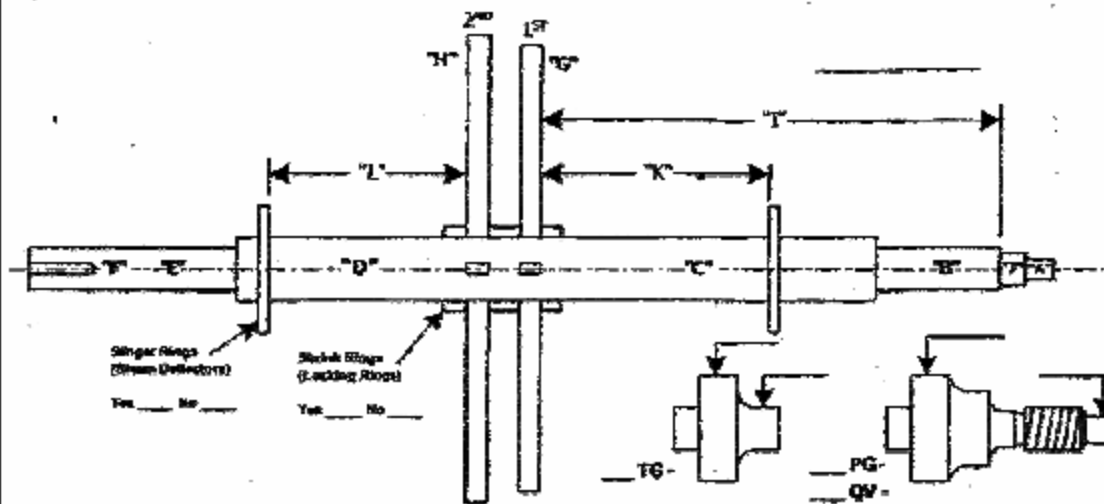
BUENO

mm/s				
rms				
28				
18				
11				
7				
4.5				
2.8				
1.8				
1.1				
0.70				
0.45				
0.28				
	Máquinas pequeñas (Motores eléctricos hasta 15 Kw.)	Máquinas medianas (Motores eléctricos de 15Kw hasta 75 Kw)	Maquinas Grandes	Turbinas
	20 HP	100 HP		

8.3 INSPECCIÓN DE LA TURBINA ELLIOTT DYR

Elliott Inspection Report		Form No. 6061-402		Page 1 of 1		
YR STEAM TURBINE ASSEMBLY DATA SHEET						
Customer:		Job Number:		Rotation		
Inspected by:		Date:		CW	CCW	
						
Description			Design	As Found	Rebuilt	
A	Shaft Sleeve Seal	Radial	Stm End i/b	0.010" - 0.0145" Typical	0.017	0.012
A			Exh End i/b		0.008	0.013
A			Exh End o/b		0.014	0.013
J	Shaft Sleeve Seal	Axial	Stm End i/b inside	0.054" - 0.064" Typical		0.063
J			Stm End i/b outside			0.062
M			Exh End i/b outside	0.068" - 0.098" Typical		0.08
M			Exh End o/b inside	Allow for rotor to grow long at start		0.086
N			Exh End i/b inside	0.030" - 0.040" Typical		0.032
N			Exh End o/b outside			0.036
F	Shaft Journal	Diameter	Stm End			
F			Exh End			
E	Journal Bearing	Diameter	Stm End		0.008	
E			Exh End		0.007	
B	Carbon Seal	Diameter	Stm End	See Table 4-2 in Book Note Exhaust Temp:		
B			Exh End			
	Laby Seal	Diameter	BYRHH only			
C	Shaft under seal	Diameter	Stm End			
C			Exh End			
D	Spacer Ring	ID				
K	Nozzle Ring	Axial	To 1st row	0.116	0.051	
	Reversing Buckets		To 2nd row		0.035	
L	Disk Separation	Axial				
H	Disk Location					
	Thrust Float			0.019	0.016	
	Governor Cplg					
G	Trip Plunger	Radial	Cold	0.062"	1/16"	
	Gov Valve		Travel	Design		
	o/s Trip Body	TIR	Runout	<0.003"		
	Resetting Lever		Overlap	1/8"	1/8"	
	Sentinel Valve	Pressure	Setpoint			
	Overspeed Trip	rpm	Test	Test#1	Test#2	Test#3


Elliott Inspection Report		Form No. ESS-404	Page 1 of 2	
YR STEAM TURBINE INDICATION RECORD				
Customer:	Job Number: 03T1233	Rotation		
Inspected by:	Date: 05-Jun-03	CW	X	CCW
Rotor Type: DYR	Serial #: 606138-82 625006-28			

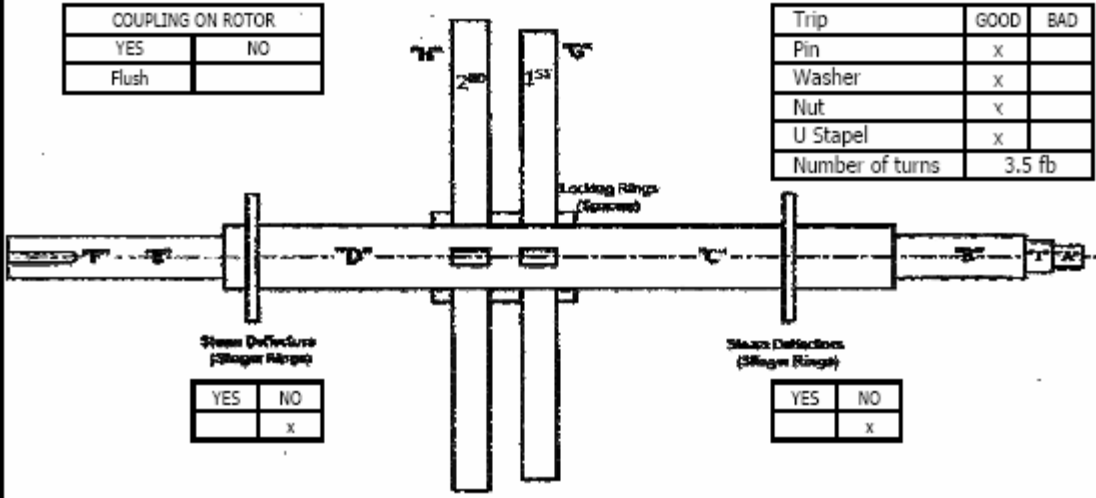


Concentricity Record

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	Trip Fit	Journal	Seal	Seal	Journal	Cplg. Fit	1st Disk	2nd Disk	Disk Loc	Brg Fit
1	0.0008	0.0002	0.0001	0.0002	0.0002	0.018		0.009		0.0025
2	0.0008	0.0002	0.0001	0.0002	0.0002	0.018		0.009		0.0025
3	0.0008	0.0002	0.0001	0.0002	0.0002	0.018		0.009		0.0025
4	0.0008	0.0002	0.0001	0.0002	0.0002	0.018		0.009		0.0025
T.I.R.	0.0008	0.0002	0.0001	0.0002	0.0002	0.018		0.009		0.0025

	AYR	BYR	BYRH	CYR	DYR STRAIGHT	DYR PROFILE	ACTUAL
A	1.627 / 1.6275	1.627 / 1.6275	1.627 / 1.6275	1.627 / 1.6275	1.627 / 1.6275	1.627 / 1.6275	1.6276
B	1.932 / 1.9325	1.932 / 1.9325	2.932 / 2.9325	2.932 / 2.9325	2.932 / 2.9325	2.932 / 2.9325	2.9361
C	2.250 / 2.2505	2.250 / 2.2505	2.932 / 2.9325	2.932 / 2.9325	2.932 / 2.9325	2.932 / 2.9325	2.9345
D	2.250 / 2.2505	2.250 / 2.2505	2.932 / 2.9325	2.932 / 2.9325	2.932 / 2.9325	2.932 / 2.9325	2.9360
E	1.932 / 1.9325	1.932 / 1.9325	2.932 / 2.9325	2.932 / 2.9325	2.932 / 2.9325	2.932 / 2.9325	2.9370
F	1.932 / 1.9325	1.932 / 1.9325	2.432 / 2.4325	2.432 / 2.4325	2.932 / 2.9325	2.932 / 2.9325	2.9280
I	9.465 / 9.471	9.465 / 9.471	14.984 / 14.690	11.778 / 11.784	11.965 / 11.971	11.903 / 11.909	
J	1.7715 / 1.772	1.7715 / 1.772	1.9685 / 1.969	1.9685 / 1.969	1.9685 / 1.969	1.9685 / 1.969	1.9691
Bore	2.2465 / 2.2470	2.2465 / 2.2470	2.9955 / 2.9960	2.9955 / 2.9960	2.9955 / 2.9960	2.9955 / 2.9960	

Elliott Inspection Report		Form No. ESS-404		Page 2 of 2	
YR STEAM TURBINE INDICATION RECORD					
Customer:		Job Number:		Rotation	
Inspected by:		Date:		CW	<input checked="" type="checkbox"/> CCW


<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr><th colspan="2">COUPLING ON ROTOR</th></tr> <tr><td>YES</td><td>NO</td></tr> <tr><td>Flush</td><td></td></tr> </table>	COUPLING ON ROTOR		YES	NO	Flush			<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr><th>Trip</th><th>GOOD</th><th>BAD</th></tr> <tr><td>Pin</td><td style="text-align: center;">x</td><td></td></tr> <tr><td>Washer</td><td style="text-align: center;">x</td><td></td></tr> <tr><td>Nut</td><td style="text-align: center;">x</td><td></td></tr> <tr><td>U Stapel</td><td style="text-align: center;">x</td><td></td></tr> <tr><td>Number of turns</td><td colspan="2" style="text-align: center;">3.5 fb</td></tr> </table>	Trip	GOOD	BAD	Pin	x		Washer	x		Nut	x		U Stapel	x		Number of turns	3.5 fb	
COUPLING ON ROTOR																										
YES	NO																									
Flush																										
Trip	GOOD	BAD																								
Pin	x																									
Washer	x																									
Nut	x																									
U Stapel	x																									
Number of turns	3.5 fb																									
<table border="1" style="width:50%; border-collapse: collapse;"> <tr><th>YES</th><th>NO</th></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">x</td></tr> </table>	YES	NO		x	<table border="1" style="width:50%; border-collapse: collapse;"> <tr><th>YES</th><th>NO</th></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;">x</td></tr> </table>	YES	NO		x																	
YES	NO																									
	x																									
YES	NO																									
	x																									

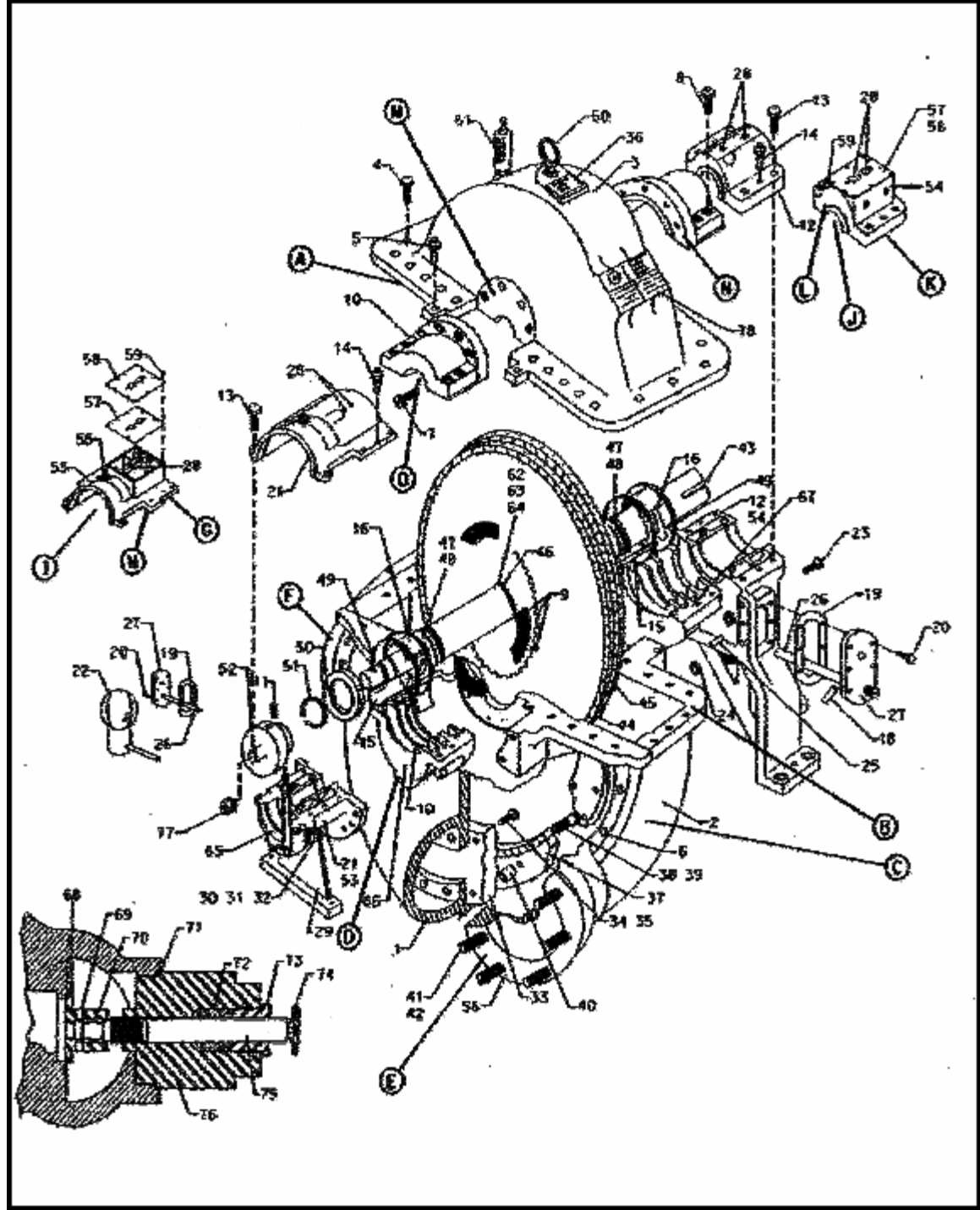
Scratches or Radial Scoring	Comments	Missing	Repair	Replace	Scrap	YES	NO
"A" Trip Body Fit (Fretting)							x
"J" Locator Brg Fit (Fretting)							x
"B" T.E Journal	Pequeño desgaste					x	
"C" C.E. Carbon Seal	Ha sido metalizado						x
"D" T.E. Carbon Seal	Pequeño desgaste						x
"E" C.E. Journal	Pequeño desgaste					x	
"F" Coupling Fit (Galling)							x


Blading Row #1		YES	NO	Blading Row #2		YES	NO
"G"	F.O.D. Erosion	x		"H"	F.O.D. Erosion		x
	Locking Piece Intact	x			Locking Piece Intact	x	
	Shroud Damaged	x			Shroud Damaged		x

Locking Ring	Missing	Good	Replace	Type of Governor or Trip		SLEEVES				
1	N/A			TG		1	.007 too small			x
2	N/A			PGPL	x	2	.006 too small			x
3	N/A			QV		3	.006 too small			x


Notes: _____


Elliott Inspection Report	Form No. ESS-401A	Page 1 of 4
YR STEAM TURBINE ASSEMBLY		
Customer:	Job Number:	Rotation
Inspected by:	Date:	CW X CCW



Elliott Inspection Report				Form No. ESS-401		Page 2 of 4				
YR STEAM TURBINE ASSEMBLY										
Customer:				Job Number:		Rotation				
Inspected by:				Date:		CW	X	CCW		
Item	Part #	Part Name	QTY	Comments	Missing	Good	Rework	Scrap		
1		Casing Steam End	1			x				
2		Casing Exhaust End	1			x				
3		Casing Cover	1			x				
4		Casing Cover Bolting				x				
5		Taper Dowel/Nut (Cover)	4		2	2				
6		Vertical Split Line Bolting				x				
7		Carbon Box Mounting Capscrew	Var			x				
8		Carbon Box Capscrew	Var			x				
9	634159-52	Carbon Ring Assembly	8					x		
10		Carbon Ring Spacers (AYR only)	8	N/A						
11		Trip Pin & Spring				x				
12		Bearing Housing CE	1			x				
13		Bearing Housing Bolting	10			x				
14	P36L228	Bearing Housing Cover Taper Dowel/Nuts	4		x					
15	667997-8	Bearing Liners CE	2					x		
16	667997-7	Bearing Liners TE	2					x		
17		Combining Stud	2			x				
18	P40E11	Combining Stud Taper Pin	2		x					
19		Gasket Cover Cooling Cap	2	N/A						
20		Machine Bolt Water Jacket Cover Flanges	12	N/A						
21		Bearing housing/cap TE	1	Area de thrust brg ha sido reparada		x				
22		Oiler plus 1/8" washer	2	N/A						
23		Bearing housing mounting bolts	8			x				
24		Bearing housing spacers	8					x		
25		Bearing housing mounting face dowel	4			x				
26		Cooling tube assembly	2	N/A						
27		Cooling caps	2			x				
28		Bearing cover pipe plugs	4			x				
29		Support, Wobble foot	1			x				
30		Wobble foot bolts	2			x				
31		Wobble foot lockwasher	2			x				
32		Wobble foot nut	2			x				
33		Nozzle ring	1					x		

Página 2 de 4. Inspección de partes y holguras.

Elliott Inspection Report			Form No. ESS-401		Page 3 of 4			
YR STEAM TURBINE ASSEMBLY								
Customer:			Job Number:		Rotation			
Inspected by:			Date:		CW	X	CCW	
Item	Part #	Part Name	QTY	Comments	Missing	Good	Rework	Scrap
34		Capscrew Nozzle ring	Var			x		
35		Lockwasher Nozzle bolt	Var			x		
36		Caution tag				x		
37		Reversing blade assembly	3				x	
38	P23T3202	Reversing blade capscrews						5
39	P25R24	Reversing blade lockwasher						5
40		Reversing blade spacers				x		
41		Steam chest connecting flange stud	10			x		
42		Steam chest connecting flange nut	10			x		
43		Rotor shaft	1					
44		1st Disk assembly	1					
45		2nd Disk assembly	1					
46		Turbine disk keys	2					
47	693952-1	Shaft seal sleeves	3					3
48	P23A50	Shaft seal sleeves setscrews	6					x
49	640927-1	Oil ring (large or small)	2 or 4					x
50	672171-18	Ball bearing (rotor locating)	1					x
51	P27D27	Retaining ring (locator bearing)	1					x
52		Trip body	1			x		
53		Bearing housing with water cooled cap	1	N/A				
54		Bearing pedestal with water cooled cap	1	N/A				
55		Pipe plug 3/4"	4			x		
56		Steam end flange	1			x		
57		Water bearing caps gasket	2	N/A				
58		Water bearing caps covers	2	N/A				
59		Hexagonal bolts 1/4"		N/A				
60		Eye bolt turbine cover			x			
61		Sentinel valve	1			x		
62		Rotor lockrings	1	N/A				
63		Turbine disk spacer	2	N/A				
64		Special lockring (BYRH only)	1	N/A				
65	693346-1	Trip plunger	1					x
66		Carbon box TE				x		
67		Carbon box CE				x		

Elliott Inspection Report			Form No. ESS-401			Page 4 of 4		
YR STEAM TURBINE ASSEMBLY								
Customer:			Job Number:			Rotation		
Inspected by:			Date:			CW	X	CCW
Item	Part #	Part Name	QTY	Comments	Missing	Good	Rework	Scrap
68		Handvalve	1			X		
69		5/16" plug	1			X		
70		Valve bolts	11			X		
71		Gasket	1			X		
72		Packing	6 pcs					X
73		Follower	1			X		
74		Handwheel	1			X		
75		Valve stem	1		X			
76		Valve body	1	Quitar tornillos rotos			X	
77		Oil pump coupling	1			X		
78		Name plate	1		X			
Comments: _____ _____ _____ _____ _____								
			Weld	Skim	OK	Bearing Housing - Measure Bores		
A	Split				x	Actual	Drawing	
B	Split				x	T.E	AYR/BYR 2.188 +.001-.000	
C	N/R Face				x	C.E	CYR/DYR/BYRH- 3.192 +.001-.000	
D	Packing case faces				x	Broken studs?		
E	Steam chest flange				x	Helicoil?		Carbon boxes 2
F	Exhaust flange				x			
			Weld	Skim	OK	Carbon Boxes - Measure Bores		
G	Bearing case				x	Actual	Drawing	
H	Bearing case split				x	T.E	AYR/BYR 2.375	
I	Bore				x	C.E	CYR/DYR/BYRH-3.125	
J	Bore				x			
K	Bearing pedestal split							
L	Bearing pedestal case							
M	Turbine to packing face				x	Blue contact % horizontal	80	
N	Packing case faces				x	Blue contact % vertical	80	
O	Bore				x			