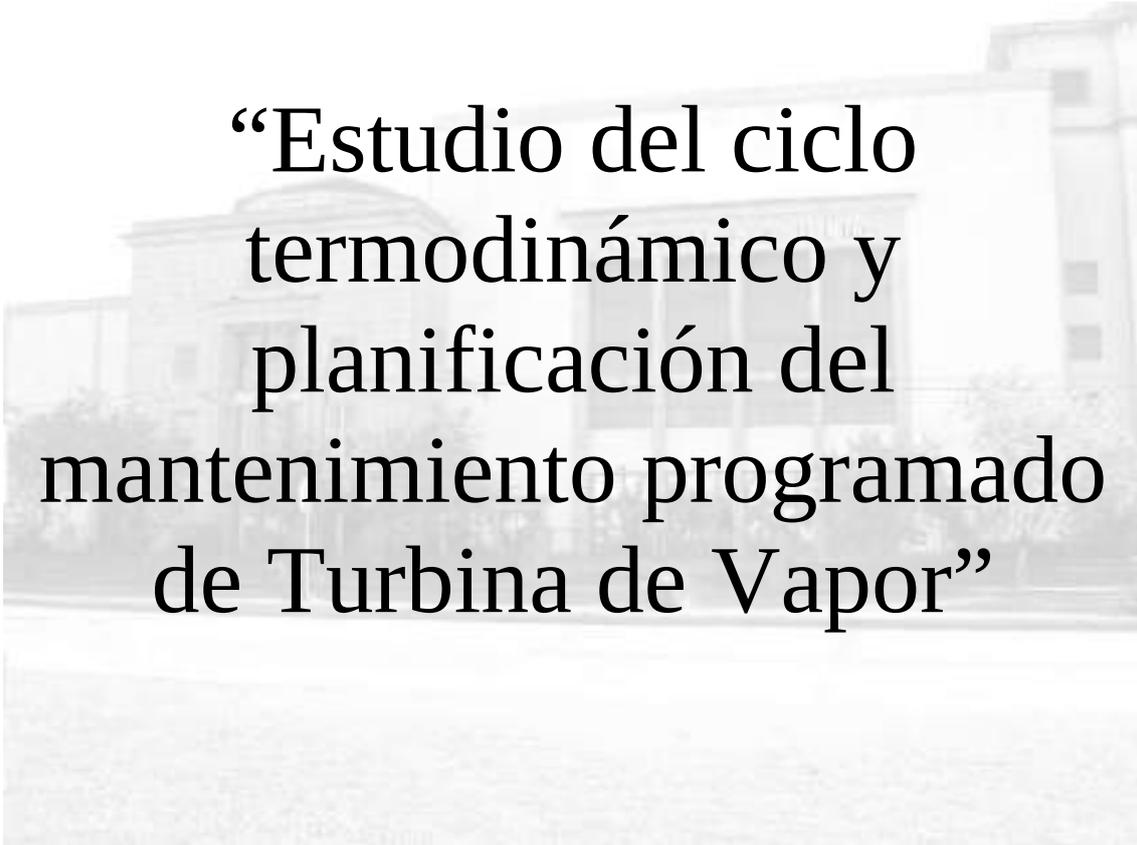


Trabajo Final de Grado
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de Mar del Plata



“Estudio del ciclo termodinámico y planificación del mantenimiento programado de Turbina de Vapor”

Director: Ing. Felipe, Eduardo L.

Fecha de entrega: 30/08/2007

Integrantes	Carrera	Matricula Interna
Scarpatti, Lucas F.	Ing. Mecánica	8980
Vallelunga, Matías J.	Ing. Electromecánica	9811



RINFI es desarrollado por la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

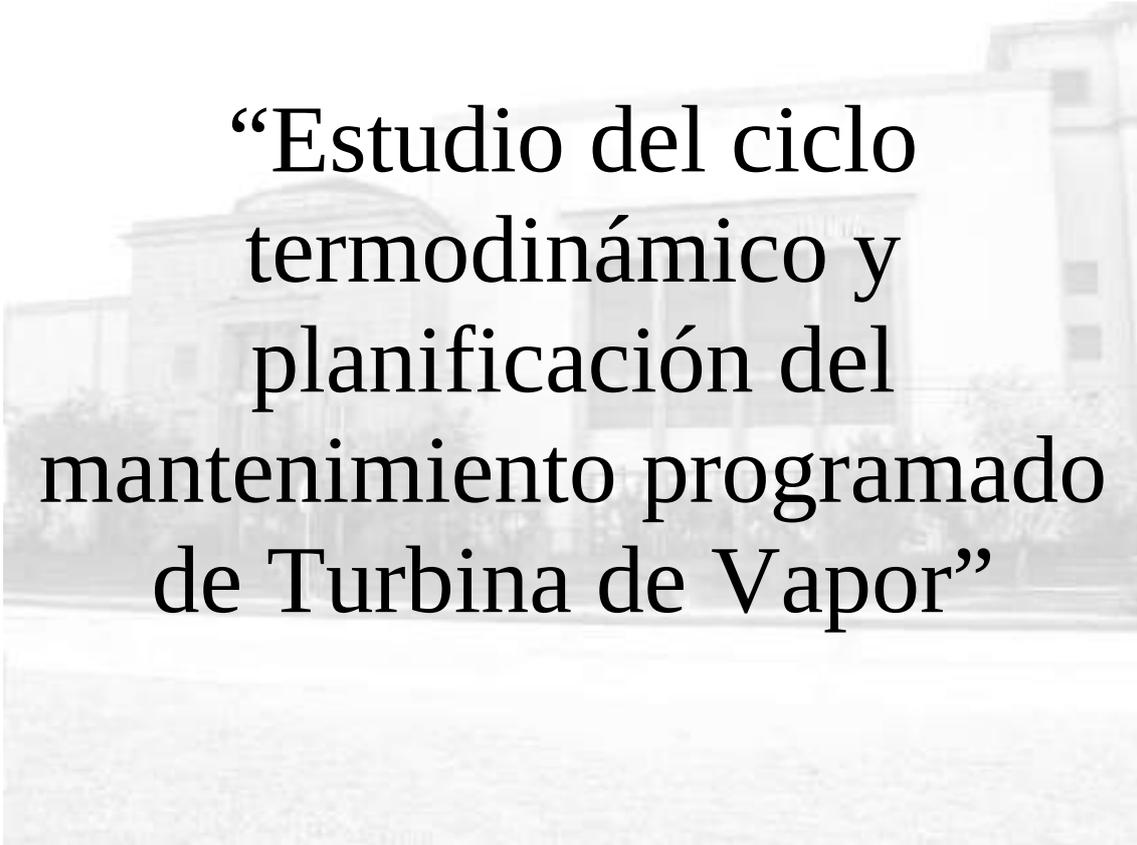
Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Trabajo Final de Grado
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de Mar del Plata



“Estudio del ciclo termodinámico y planificación del mantenimiento programado de Turbina de Vapor”

Director: Ing. Felipe, Eduardo L.

Fecha de entrega: 30/08/2007

Integrantes	Carrera	Matricula Interna
Scarpatti, Lucas F.	Ing. Mecánica	8980
Vallelunga, Matías J.	Ing. Electromecánica	9811

INDICE

Resumen.....	2
Panorama de la empresa.....	3
Centrales de la empresa.....	3
Sistema de gestión ambiental.....	3
Negocio energético.....	4
Central Eléctrica 9 de Julio.....	6
Equipos generadores.....	6
Personal activo.....	7
Impacto ambiental.....	8
Impacto en la comunidad.....	8
Seguridad e Higiene.....	9
Grupo Turbovapor.....	11
Turbina de Vapor.....	11
Regulador.....	20
Alternador.....	25
Excitatriz.....	29
Cojinetes.....	32
Sistema de aceite.....	33
Ciclo termodinámico.....	35
Circuito cerrado de agua.....	35
Análisis de la influencia de las extracciones.....	39
Régimen de servicio.....	46
Programación y seguimiento.....	57
Introducción teórica.....	57
¿Qué es el Software Microsoft ® Project?.....	59
Mantenimiento programado.....	60
Planificación del Mantenimiento Programado.....	62
Programación.....	62
Discusión.....	66
Resultado final.....	66
Descripción de tareas.....	67
Turbina.....	68
Regulador.....	95
Alternador.....	99
Excitatriz.....	118
Conclusión.....	120
Bibliografía.....	121
Anexo I.....	122
Anexo II.....	126
Anexo III.....	130
Anexo IV.....	134
Anexo V.....	137
Anexo VI.....	139
Anexo VII.....	150

Resumen

Nos presentamos como Lucas Federico Scarpati y Matías José Vallelunga, estudiantes de las carreras de Ingeniería Mecánica (8980) y Electromecánica (9811) respectivamente, en la Facultad de Ingeniería dependiente de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

A la fecha de ejecución del presente informe, nos desempeñamos profesionalmente en la Central Termoeléctrica 9 de Julio perteneciente a la empresa Centrales de la Costa Atlántica S.A. Esto motivó la ejecución del trabajo final de grado en dicho lugar.

Los objetivos principales planteados son los siguientes:

- Describir la instalación turbovapor
- Estudiar el ciclo termodinámico
- Calcular los rendimientos de la instalación
- Realizar la planificación del mantenimiento programado de turbina de vapor N° 7 y 8

A su vez se hará la planificación del mantenimiento propuesto mediante la asistencia del Software Microsoft ® Project. Dicha planificación constará del desmontaje, ensayos, ajustes y montaje del equipo completo, teniéndose en cuenta también los recursos humanos necesarios.

Se establecen además objetivos secundarios:

- Afianzar y volcar los conocimientos adquiridos en la facultad
- Aprender el lenguaje técnico utilizado en planta
- Poner a prueba nuestro desempeño en el manejo de las relaciones humanas

Panorama de la empresa

Centrales de la Costa Atlántica S.A. desarrolla actividades de generación de energía eléctrica a través de la operación de sus cuatro centrales ubicadas en la costa atlántica bonaerense. La sede institucional de la empresa se encuentra en la ciudad de La Plata, capital de la provincia de Buenos Aires.

Centrales de la empresa

Las cuatro centrales pertenecientes al grupo empresarial son:

- *Central Termoeléctrica Necochea*, situada en el Puerto Quequén de esta ciudad balnearia. Cuenta con 4 unidades generadoras Turbovapor que funcionan con combustible gaseoso o líquido, es decir Gas Natural y/o Fuel oil y su potencia instalada nominal es de 206 MW.
- *Central Termoeléctrica 9 de Julio*, ubicada en las cercanías del Puerto de la ciudad de Mar del Plata. La potencia nominal instalada es de 160 MW, y su parque generador está compuesto por 5 unidades Turbogas y 2 Turbovapor que funcionan con Gas Natural durante la mayor parte del año, pudiendo también utilizar como combustibles alternativos Gas Oil y Fuel Oil respectivamente.
- *Central Turbogas Mar de Ajó*, cuenta con 2 equipos que funcionan con Gas Natural o Gas Oil. Tiene una potencia nominal instalada que alcanza los 32 MW.
- *Central Turbogas Villa Gesell*, cuenta con 3 equipos que funcionan con dos opciones de combustible: Gas Natural y Gas Oil. La potencia nominal instalada es de 28 MW.

La potencia nominal instalada de Centrales de la Costa Atlántica S.A. es de 426 MW.

Sistema de gestión ambiental

Centrales de la Costa Atlántica S.A. asumió, en septiembre del año 2.002, el compromiso de implementar un Sistema de Gestión Ambiental tomando como referencia la norma ISO 14001, tal como lo establece el Ente Nacional Regulador de Energía (ENRE) en su artículo 2º de la resolución Nº 555 / 2.001.

Un Sistema de Gestión Ambiental (SGA), está formado por políticas, procedimientos, instructivos y recursos correspondientes, para cumplir y mantener permanentemente, una gestión ambiental efectiva en la empresa.

Este sistema implica evaluar periódicamente (auditorias) los impactos ambientales, comprometiéndose a cumplir con las leyes y regulaciones ambientales para así promover la mejora continua y progresiva de la gestión ambiental.

Alcanzar la certificación del Sistema de Gestión Ambiental no es sólo un requisito que deben cumplir quienes participan del Mercado Eléctrico, sino también una apuesta a compatibilizar la acción productiva de las empresas con la preservación del medio ambiente.

La normativa ISO 14001 son las especificaciones técnicas del Sistema de Gestión Ambiental, y corresponden a la única normativa de requerimiento en la serie ISO 14000. En otras palabras, esta norma establece los requisitos sobre los elementos de un SGA, la cual exige a la empresa su cumplimiento para así lograr su certificación, luego de pasar por una auditoria de un tercero independiente debidamente registrado.

La serie ISO 14000 corresponden al conjunto de normas y sus estándares diseñados para ayudar a las empresas a establecer y evaluar objetivamente su SGA. Estas normas exigen básicamente, que se cumpla con la legislación interna del país y se establezca una política de Mejoramiento Continuo orientada en el sentido de ciertas tendencias y prácticas de alto consenso social, que la legislación pudiera no haber incluido aún.

Negocio energético

En calidad de agente generador, *Centrales de la Costa Atlántica S.A.* forma parte del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM), y sus operaciones están integradas al Sistema Interconectado Nacional (Fig. 1). La conexión a dicho sistema es través del tendido eléctrico de 132 KV. Particularmente la Central 9 de Julio esta vinculada al sistema mediante tres tendidos diferentes a distintas ciudades. Una conexión con Balcarce, otra con Quequén y la restante con Miramar. Estas últimas dos convergen en Necochea.



Figura 1. Esquema geográfico del Sistema Interconectado Nacional – Provincia Bs. As.

Los flujos de potencia activa y las tensiones se representan mediante el esquema unifilar (Fig. 2) asociado a la región de influencia, donde se observa claramente las conexiones entre dicha Central y el Sistema Interconectado Nacional.

Al estar ubicadas estratégicamente abastecen de energía a importantes ciudades de nuestra costa atlántica, principalmente a Mar del Plata y Necochea, jugando un rol fundamental durante las temporadas estivales debido a la gran afluencia de turismo que se registra en la costa bonaerense. En épocas invernales también son de gran importancia, dada la escasez de generación a nivel nacional, época del año en la cual las empresas generadoras acostumbran a realizar paradas programadas para llevar a cabo tareas de mantenimiento.

Todo tipo de parada, ya sea por mantenimiento y/o reparación, deben ser del menor tiempo posible, con el fin de que las turbomáquinas estén disponibles para los fines de generación. Se declara el estado de disponibilidad y características (potencia máxima disponible, regulación de frecuencia y control de tensión) de las mismas ante la Compañía Administradora del Mercado

Mayorista Eléctrico - CAMME S.A., quién se encarga principalmente de la coordinación de las operaciones de despacho, y las cataloga según el estado, de la siguiente manera:

- S: en servicio
- D: disponible – reserva en frío
- I: indisponible
- A: fase de arranque
- G: disponible con falta combustible

Las máquinas declaradas como disponibles constituyen un “ranking” basado en el costo de generación. Se confecciona partiendo desde la máquina de menor costo hasta la de mayor. De la misma manera CAMME S.A. es quién solicita que entren en servicio en función de la demanda. El costo de generación está dado por el costo de operación más el costo de transporte desde su nodo de conexión hasta el mercado. La remuneración está fijada por la unidad de reserva en frío siguiente a la de mayor costo que se encuentra en servicio.

También se cataloga a las mismas de acuerdo a la posibilidad de prestar servicios adicionales, como la regulación de frecuencia y el control de la tensión. Por estos adicionales se percibe una remuneración extra.

Se aclara que no siempre entran en servicio las máquinas a pedido de CAMME S.A. sino que también pueden generar para distribuidores regionales o bien para empresas del sector privado. Todo tipo de contrato celebrado con organismos particulares debe ser igualmente notificado a CAMME S.A.

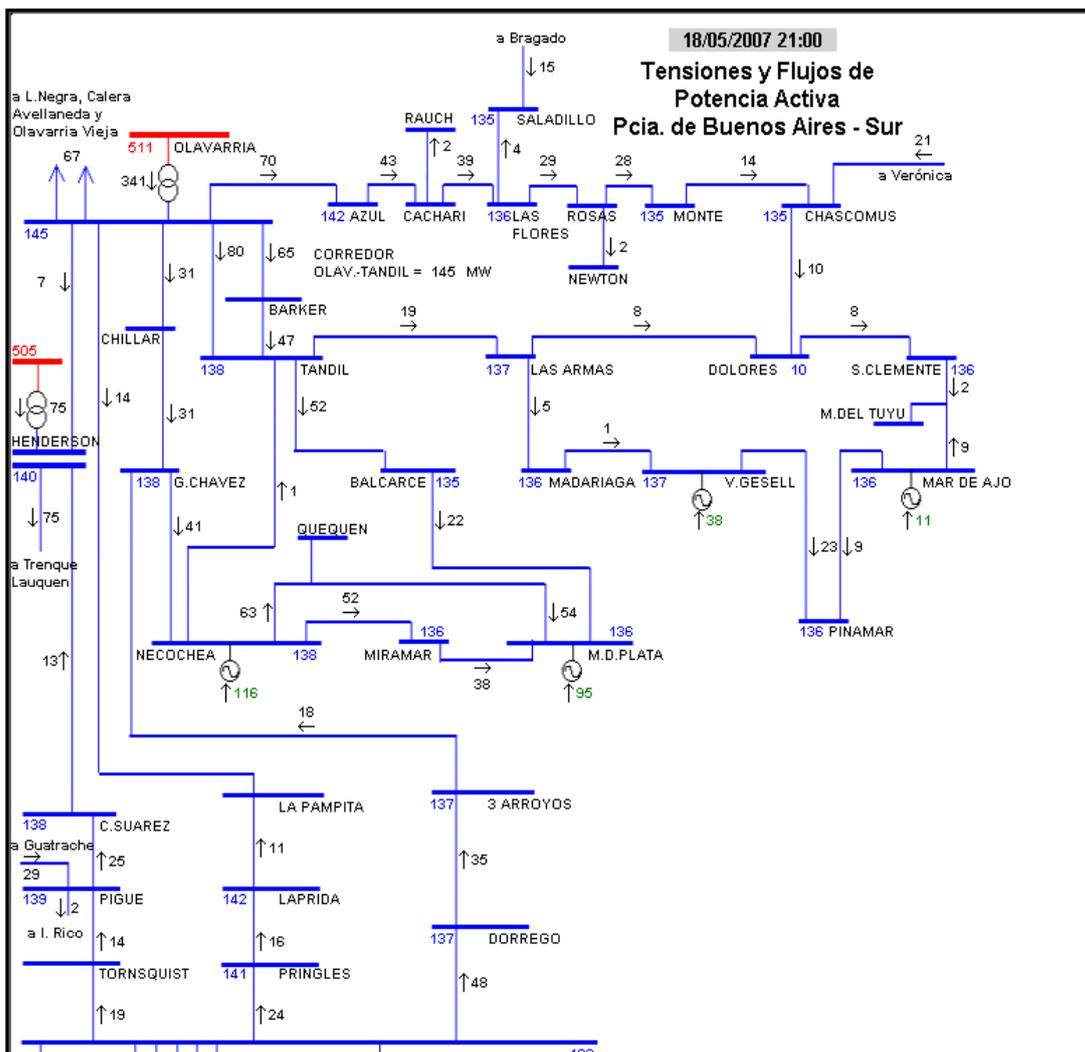


Figura 2. Esquema unifilar – Provincia de Bs. As. Zona Sur

Central Eléctrica 9 de Julio

Dado que el trabajo del presente informe se basa en la Central Termoeléctrica 9 de Julio (Fig. 3), se detallarán algunas de sus características de acuerdo a la siguiente clasificación:

- Equipos generadores
- Personal activo
- Impacto ambiental
- Impacto en la comunidad
- Seguridad e higiene



Figura 3. Fachada de la Central 9 de Julio

Equipos generadores

Actualmente el total de la potencia nominal instalada se encuentra distribuida de la siguiente manera:

- Turbogas N° 12: marca AEG – 16 MW (16 MW)
Fecha de puesta en servicio: 06/01/1993
- Turbogas N° 13: marca ALSTHOM – 25MW (23 MW)
Fecha de puesta en servicio: 08/12/1990
- Turbogas N° 19: marca HITACHI – 17,350 MW (16 MW)
Fecha de puesta en servicio: 08/02/1971
- Turbogas N° 20: marca HITACHI – 17,350 MW (16 MW)
Fecha de puesta en servicio: 04/03/1971
- Turbogas N° 21: marca ALSTHOM – 25MW (23 MW)
Fecha de puesta en servicio: 20/01/1984
- Turbovapor N° 7: marca ESCHER WYSS - BROWN BOVERI - 30 MW (30 MW)
Fecha de puesta en servicio: 17/04/1972
- Turbovapor N° 8: marca ESCHER WYSS - BROWN BOVERI - 30 MW (27 MW)
Fecha de puesta en servicio: 08/09/1972

() Valor de potencia máxima declarado a la fecha ante CAMME S.A.

Personal activo

El personal activo en la planta es de 140 personas encuadradas según el organigrama vigente (Fig. 4). En el mismo se incluye también el personal correspondiente a Villa Gesell y Mar de Ajó puesto que están a cargo de la Gerencia de Planta.

Para las tareas de mantenimiento de las turbinas de vapor y los equipos auxiliares se dispone de la mano de obra aportada por el personal de Mantenimiento de Máquinas, Eléctrico e Instrumental. Cada sector esta comprendido por una cantidad de 15, 12 y 4 personas respectivamente, asumiendo las siguientes incumbencias en el mantenimiento:

- Turbina: personal de Máquinas e Instrumental
- Alternador: personal de Máquinas, Eléctrico e Instrumental
- Excitatriz: personal de Máquinas, Eléctrico e Instrumental
- Regulador: personal de Máquinas, Eléctrico e Instrumental

Las tareas de montaje y desmontaje son exclusividad del personal de Máquinas.

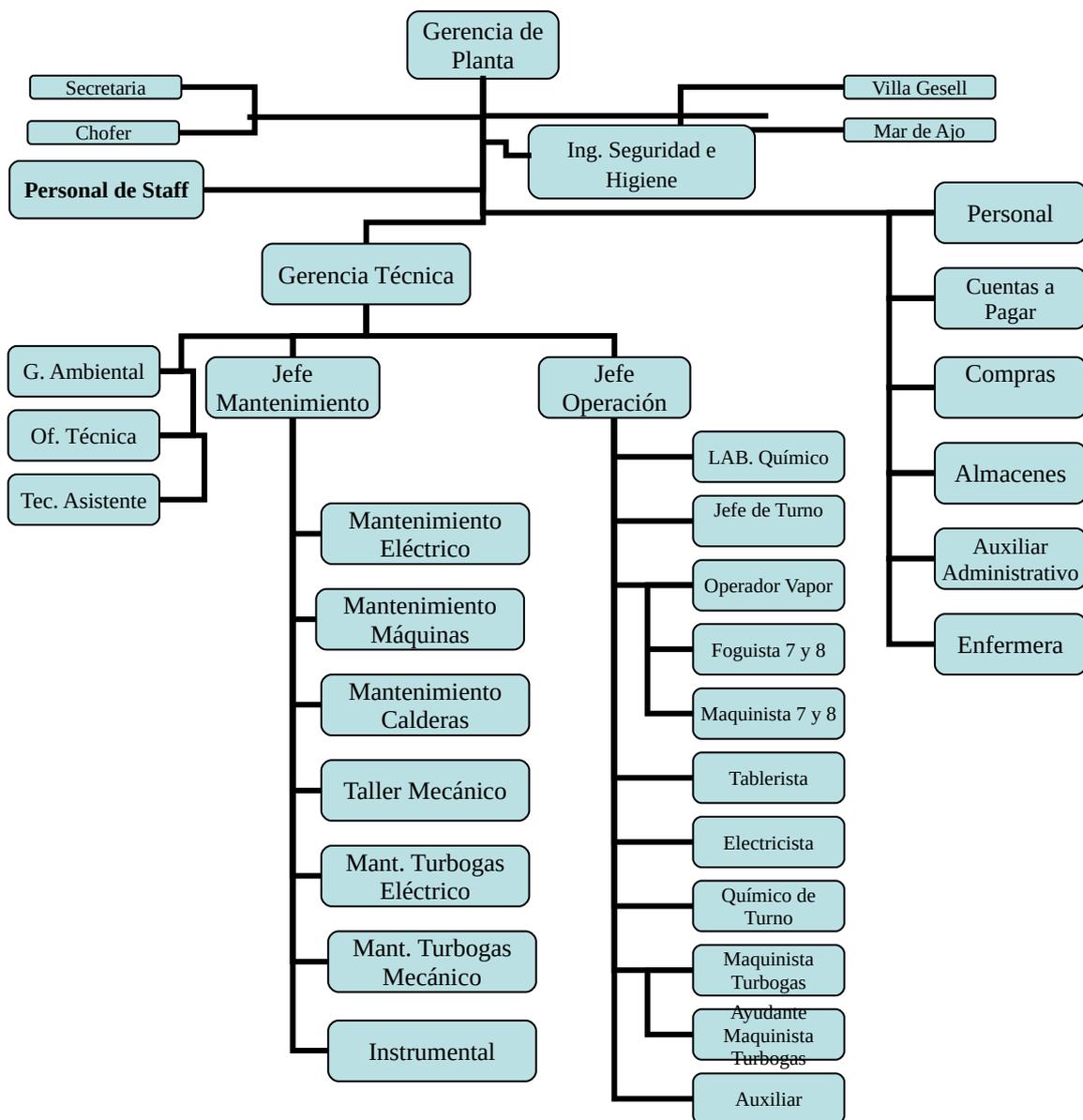


Figura 4. Organigrama del personal activo

A pesar de que conformamos el Personal de Staff, desempeñamos nuestras actividades para el grupo de Mantenimiento de Máquinas. Para la ejecución éste trabajo final de grado interactuamos a su vez con Gerencia de Planta y Técnica, Jefe de Mantenimiento y Mantenimiento Eléctrico.

Impacto ambiental

Las plantas termoeléctricas son consideradas fuentes importantes de emisiones atmosféricas y pueden afectar la calidad del aire en el área local o regional. La combustión que ocurre en los procesos termoeléctricos emite dióxido de sulfuro (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y partículas (que pueden contener metales menores). Las cantidades de cada uno dependerán del tipo y tamaño de la instalación; del tipo y calidad del combustible; y de la manera en que se lleva a cabo la combustión. La dispersión y las concentraciones de estas emisiones, a nivel de la tierra, son el resultado de la interacción compleja de las características físicas de la chimenea de la planta; de las cualidades físicas y químicas de las mismas; de las condiciones meteorológicas en el sitio, o cerca del mismo durante el tiempo que se requiere para que las emisiones se trasladen desde la chimenea hasta el receptor a nivel de la tierra; de las condiciones topográficas del sitio de la planta y las áreas circundantes; y de la naturaleza de los receptores (por ejemplo, seres humanos, cultivos y vegetación nativa).

En la Central Termoeléctrica 9 de Julio, las emisiones a la atmósfera de estos compuestos nocivos se encuentran dentro de los valores admisibles por reglamentación, considerando también el hecho de cumplir con la certificación de la norma ISO 14001 mediante auditoría externa cada 3 años, debiendo ser recertificado anualmente hasta la próxima certificación.

Impacto en la comunidad

Otros impactos que se producen son los visuales y auditivos. En la Central Termoeléctrica 9 de Julio, el impacto visual se encuentra atenuado por el hecho de contar con los turbogrupos de vapor N° 7 y 8 en el interior de la construcción edilicia. Lo mismo ocurre con la estación transformadora de 132 KV, la cual se encuentra dentro de otra edificación. En cuanto a las turbinas de gas, a pesar de estar emplazadas en el exterior, el impacto visual es bajo debido a que componen módulos compactos y la Central cuenta con un parque visualmente agradable.

Respecto al ruido, la atención se centraliza en las turbinas de gas, por estar emplazadas en el exterior. Para ello se cumple con la resolución SPA N° 159/96, la cual aprueba el método y clasificación de ruidos molestos al vecindario fijados por la norma IRAM 4062/84.

Dicha norma establece niveles máximos para aquellos ruidos que sean claramente atribuibles a una fuente determinada. Así, se estipulan valores máximos en el lugar receptor.

Se basa en la idea de establecer lo que se denomina un *nivel básico*, es decir un nivel de ruido ambiental máximo aplicable en determinadas condiciones idealizadas. Como tales condiciones en general no se verifican, se corrige dicho criterio básico en función del grado de apartamiento de esas condiciones.

El nivel básico corresponde a 40 dBA, y las correcciones (Tabla 1) se efectúan por *día* (laborable, hábil o feriado) y *hora* (diurna o nocturna), por *zona* (por ejemplo rural, urbano, predominantemente industrial, etc.), y por *ubicación de la medición del ruido* (interior, exterior).

CORRECCIONES POR UBICACIÓN K_U

Ubicación	Corrección en dBA
Interiores: - linderos con la vía pública	0
- no linderos con la vía pública	-5
Exteriores: - Áreas descubiertas no linderas con la vía pública	5

CORRECCIONES POR PERÍODO K_h

Período	Corrección en dBA
Días hábiles: de 6 a 22 hs.	5
Días feriados: de 6 a 22 hs.	0
Noche: de 22 a 6 hs.	-5

CORRECCIONES POR ZONA K_z

Zona	Tipo	Corrección en dBA
Rural (residencial)	1	-5
Suburbano con poco tránsito	2	0
Urbano (residencial)	3	5
Residencial urbano con alguna industria liviana o rutas principales	4	10
Centro comercial o industrial intermedio entre tipos 4 y 6	5	15
Predominantemente industrial con pocas viviendas	6	20

Tabla 1. Correcciones al criterio básico de 40 dBA según ubicación, período y zona.

El nivel calculado (N_c) se obtiene a partir del nivel básico de 40 dBA (N_b) y de las correcciones K_U , K_h y K_z .

$$N_c = N_b + K_U + K_h + K_z$$

La calificación entre ruido MOLESTO y NO MOLESTO se basa en la diferencia entre el nivel de evaluación total (medido experimentalmente) y el nivel calculado N_c . Si la diferencia entre dichos valores es menor que 8 dBA se considera que el ruido es no molesto, si en cambio la misma es mayor o igual a 8 dBA el ruido es molesto.

En la Central 9 de Julio periódicamente se realizan mediciones de ruidos, dando siempre dentro de los parámetros normales.

Seguridad e Higiene

La política en Seguridad e Higiene en la central es de carácter primordial, en base al tipo de trabajo y riesgo al que su personal se encuentra sometido. Para ello se cuenta con el sector de Gerencia Ambiental, que se encarga de:

- Instruir a la totalidad del personal en materia de Seguridad e Higiene
- Cumplir con la Ley N° 19.587/72 de *Higiene y Seguridad en el Trabajo*, con su decreto reglamentario N° 351/79, y la Ley N° 24.557/95 de *Riesgos del Trabajo*
- Hacer cumplir con la utilización de la indumentaria de trabajo y de los elementos de protección personal (casco, guantes, zapatos de seguridad, elementos de protección auditiva, anteojos, mascarilla, etc.)
- Fijar señalización acorde a las normas de seguridad e higiene
- Gestionar la manipulación y disposición final de los residuos

Tomando especial atención en la gestión de los residuos, se puede dar una definición de residuos, para luego considerar los tipos de residuos que se generan la Central Termoeléctrica 9 de Julio.

“Se considera que una sustancia u objeto, gaseoso (siempre que se encuentre contenido en recipientes), sólido, semisólido o líquido se convierte en residuo en el momento en que su poseedor, productor o generador no puede utilizarlo destinándolo al abandono, o se desprenda o tenga obligación legal de hacerlo.”

Se pueden distinguir los siguientes grupos de residuos:

- *Residuos domésticos:* son los provenientes de restos de alimentos, envases de productos alimenticios, elementos de vidrio no contaminados, embalajes de productos inocuos y residuos de las tareas de administración y limpieza de oficinas, talleres, baños y enfermería.
- *Residuos especiales:* son los que resultan de la utilización de aceites lubricantes (minerales y sintéticos), combustibles líquidos (gas oil y fuel oil), solventes halogenados, disolventes orgánicos, pinturas, lacas, barnices, resinas epoxídicas, zinc o compuestos del zinc, cobre o compuestos del cobre, mercurio o compuestos del mercurio, plomo o compuestos del plomo, hipoclorito de sodio, ácido sulfúrico, soda cáustica, morfina, hidracina, fosfato trisódico, amianto (polvo y fibras) pilas y baterías, etc.
- *Residuos patogénicos:* son los provenientes de la actividad de la enfermería y comprenden a los residuos farmacéuticos, vendas, materiales descartables con o sin contaminación sanguínea, algodones, apósitos y material de vidrio.

El poseedor o generador de residuos especiales o patogénicos tiene la responsabilidad legal de aplicar una adecuada gestión de los mismos, desde el momento inicial de su generación hasta su disposición final.

La gestión de los residuos comprende al conjunto de actividades encaminadas a dar a los mismos el destino final más adecuado de acuerdo con sus características. El proceso de gestión comprende a las siguientes operaciones:

- *Separación:* la misma se lleva a cabo en cada sector de trabajo por el personal que presta sus servicios en el mismo, mediante la utilización de recipientes para el depósito de los residuos domésticos, especiales y patogénicos según corresponda. Además de los recipientes ubicados en cada sector, se han estipulado cinco sitios de separación y disposición generales, los que se identifican mediante cartelería específica. Los recipientes para el depósito de residuos domésticos son de color blanco, conteniendo en su interior bolsas de polietileno del tipo domiciliario sin un color definido. Los recipientes para el depósito de residuos especiales o patogénicos son de color negro, conteniendo en su interior bolsas de polietileno de 120 micrones de espesor de color rojo.
- *Recolección:* la recolección periódica de los residuos está a cargo del personal de limpieza contratado. Los residuos domésticos son dispuestos en forma final en el relleno sanitario municipal, estando su transporte hasta el mismo a cargo de las empresas recolectoras tradicionales.
- *Almacenamiento:* los residuos especiales y patogénicos son almacenados transitoriamente en el depósito que la Central 9 de Julio ha dispuesto para tal fin, hasta que se procede a su transporte y disposición final.

Transporte y Disposición final: estas operaciones son llevadas a cabo periódicamente a través de transportistas y operadores debidamente autorizados según los requerimientos establecidos por la ley 11720 – Decreto 806 / 97.

Grupo Turbovapor

El término turbina suele aplicarse, por ser el componente principal, al conjunto de turbina conectada a un generador para la obtención de energía eléctrica. Por lo expresado se entiende por turbina al conjunto comercial integrado por: turbina, regulador, alternador y excitatriz.

A continuación se realizará una descripción de los cuatro bloques componentes del grupo (Fig. 5), en función de las unidades emplazadas en la Central Termoeléctrica 9 de Julio. También se hará hincapié en los cojinetes y en el sistema de aceite.

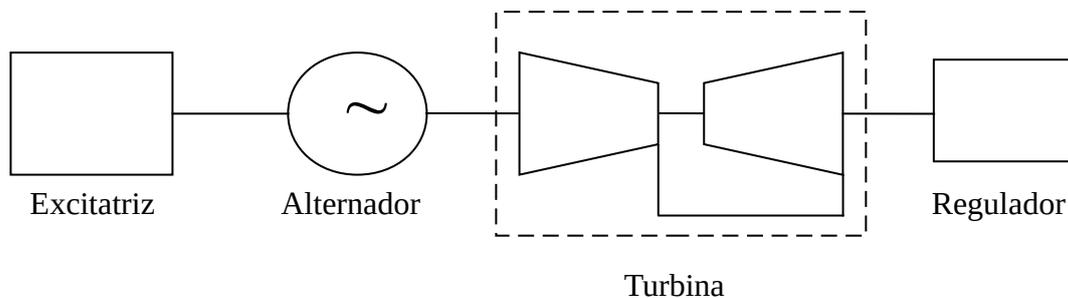


Figura 5. Conjunto completo de turbina de vapor

Turbina de Vapor

La turbina de vapor (Fig. 6) puede definirse como una máquina térmica, en la cual la energía calórica del vapor se transforma en energía cinética en las toberas, transformándose a su vez ésta energía en fuerza, que desarrolla trabajo al actuar el vapor sobre álabes o paletas montadas sobre un elemento rotatorio.



La

Figura 6. Turbina de vapor Nº 8

misma consta de cuatro elementos fundamentales:

- *Rotor*: árbol rotatorio dispuesto de álabes o paletas
- *Estator*: formado por una carcasa y por diafragmas dispuestos de álabes fijos, en su interior gira el rotor
- *Toberas*: conductos por donde fluye el vapor, generalmente fijadas en el interior de la carcasa
- *Carcasa*: para soportar al estator y al rotor, apoyándose éste último sobre cojinetes

Las turbinas de vapor Nº 7 y 8, por ser idénticas, tienen análogos datos técnicos (Tabla 2). Las mismas conforman dos turbogrupos independientes, pero hay que considerar que ante situaciones particulares, mediante el cierre y la apertura de las válvulas que corresponden, las calderas Nº 7 y 8 están preparadas para funcionar en forma "cruzada".

El rotor de alta presión presenta una primera rueda de acción con escalonamiento de velocidad, también llamada rueda Curtis, en la cual el vapor se expande totalmente en las toberas fijas, sin producir caída de presión en los álabes móviles. Dicha rueda permite la admisión parcial del vapor, ya que en ella se puede realizar la regulación cuantitativa de la turbina, es decir, es una rueda de regulación. Esta es una característica indispensable dado que estas turbinas son del tipo caudal variable.

Turbina Escher Wyss Potencia en bornes

Económica
Máxima nominal
Sobrecarga

24 MW
30 MW
33 MW ^o revoluciones 3000 r.p.m. Sentido de rotación.
Visto en la dirección del flujo de energía Antihorario Rotor Alta Presión Baja Presión N ^o de gradass (ruedas) rotor 10 10 Peso rotor 2095 Kg. 7360 Kg. Velocidad crítica rotor 2483 r.p.m. 2319 r.p.m. Cantidad de extracciones de vapor
Ubicación 1
grada 103
grada 2
grada 5
grada 7

Tabla 2. Datos característicos

La clasificación respecto al diseño interno y a la secuencia de flujo es del tipo tandem – compound, es decir, que el vapor pasa consecutivamente a través de las unidades separadas de alta (AP) y de baja (BP) presión expandiéndose en cada una de ellas. A su vez se encuentran en línea sobre el mismo eje, accionando a un único generador eléctrico. Los flujos de vapor en dichos ejes son de sentido contrario, contrarrestándose los empujes axiales entre ellos, teniendo como ventaja la utilización de cojinete de empuje de menor porte y mayor estabilidad del equipo.

Con relación a la dirección de flujo de vapor relativa al plano de rotación las turbinas son de flujo axial, en éstas el vapor fluye substancialmente en forma paralela al eje de rotación entre las paletas colocadas radialmente. Esto permite obtener casi todos los grados de expansión deseados del vapor.

Según sea las condiciones del vapor las mismas son de “alta presión con condensación”, construidas especialmente para las centrales eléctricas. Para su rendimiento máximo, se alimentan con vapor de alta presión y temperatura, en consecuencia de volumen específico reducido. El escape se realiza a muy baja presión, lo que significa volumen específico del vapor muy grande. Este gran aumento del mismo requiere paletas cortas en las etapas de alta presión y paletas largas en la región de baja presión.

A su vez son turbinas regenerativas, puesto que se extrae vapor antes que haya alcanzado la presión más baja. De esta forma se dispone de vapor a diferentes temperaturas, que se emplea para calentar por etapas el agua de alimentación, esto recibe el nombre de calentamiento regenerativo. Termodinámicamente hablando, la función de la regeneración es la de disminuir la irreversibilidad, de modo de reducir el salto entálpico entre la salida del condensador y la entrada a la caldera (disminución del trabajo perdido), y aumentarlo entre la entrada de la turbina y la entrada al condensador (aumento del trabajo positivo). Económicamente hablando, la mejora causada por la disminución del salto entre la salida del condensador y la entrada a la caldera, se traduce en un menor aporte de calor, aprovechando el calor residual de una parte de vapor en su expansión por la turbina, es decir un menor consumo específico de combustible (ver Análisis de la influencia de las extracciones).

La velocidad de rotación de la turbina es la misma que la del generador eléctrico, por estar acoplados directamente.

Detalles constructivos

La turbina propiamente dicha se encuentra dividida en dos cuerpos:

- Cuerpo de Alta presión (AP)
- Cuerpo de Baja presión (BP)

Seguidamente se desarrollarán los detalles constructivos de cada uno de los cuerpos. A su vez, se hará una descripción de la base media y de cola, las cuales vinculan los cuerpos de AP y BP, y al de BP con el alternador respectivamente. También se describirá el dispositivo giratorio del rotor, denominado "virador".

Cuerpo de Alta presión

El mismo (Fig. 7) se compone de:

- Una carcasa (base y tapa)
- Un rotor de alta presión (AP)
- Sellos laberínticos N° 1 y 2
- Cojinetes N° 1 y 2



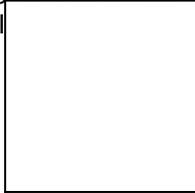
Figura 7. Vista frontal del cuerpo AP - TV N° 8

Carcasa

Está compuesta por la tapa y por la base, las cuales durante el funcionamiento de la turbina se encuentran recubiertas con aislante térmico. El mismo está compuesto por lana de vidrio y una funda de cierre.

La tapa posee cuatro extremidades, las cuales apoyan, de a dos, sobre base media y asiento en bloque de maniobras. Mediante suplementos en los apoyos se consigue el posicionamiento vertical de la carcasa. En su parte superior se dispone de las cuatro bridas de acople para el sistema de válvulas parcializadoras. A este último se vinculan, mediante bridas, las cañerías provenientes de las dos válvulas stop y las correspondientes hacia las toberas. También hay que mencionar las que sirven de vapor de sellos a las cajas de sellos laberínticos. Todo el sistema de cañerías posee el aislamiento mencionado.

La base se encuentra abulonada a la tapa, actuando ésta última como sostén vertical, dado que aquell



los ganchos N° 1 y 2, con los cuales se logra el posicionamiento horizontal de la carcasa con el bloque de maniobra y base media respectivamente. El gancho N° 1 admite movimiento axial relativo entre sus componentes, absorbiendo la dilatación térmica de la turbina (ver Anexo I). En el N° 2 está restringido dicho movimiento axial.

El ensamble entre la tapa y la base de la carcasa es mediante espárragos y tuercas, cuyo apriete es en caliente, para asegurar que no existan pérdidas de vapor a través de la junta, la cual conviene esmerilar y colocar aceite de lino cocido sobre su superficie en el momento del ensamble.

En los extremos del conjunto se disponen los asientos de las cajas de sellos laberínticos N° 1 y 2.

Interiormente se dispone el grupo de diez diafragmas. Al primero se lo reconoce especialmente como "tobera", la cual proporciona el vapor vivo a la rueda Curtis. Los nueve restantes se fijan en ranuras existentes en la carcasa, y se sujetan mediante espigas y pernos, llamados "tortas" en la jerga. Cabe aclarar que cada diafragma es el antecesor de una rueda de rotor.

En el espacio que media entre el eje y cada diafragma se disponen las empaquetaduras de laberinto, tipo peine, cuya función es disminuir las pérdidas de vapor producidas por la diferencia de presión entre las caras de los diafragmas.

Los materiales de este cuerpo son los siguientes:

- Carcasa: fundición de hierro.
- Diafragmas: fundición de hierro.
- Álabes fijos: aleación de acero (distinto grado de aleación según el número de diafragma)

Rotor de AP

El rotor de AP es un eje macizo forjado, compuesto por diez ruedas de diámetros progresivamente mayores en el sentido del flujo. La rueda Curtis es de mayor diámetro que la segunda, por cuestiones de regulación. Una de las consecuencias es el logro de la expansión deseada con un número menor de ruedas. Entre éstas se ubican los sellos, tipo "peine" o "pan", para obtener el cierre con los correspondientes a los diafragmas.

Los álabes móviles se encuentran fijados a cada rueda por una ensambladura en forma de perfil "T". El extremo de cada álabe posee una espiga, remachables a una banda metálica denominado bandaje. Cada bandaje vincula una cantidad de diez álabes aproximadamente y tiene como función variar la frecuencia de oscilación del los álabes para contrarrestar los efectos vibratorios causados por fuerzas tangenciales originadas por el vapor y la propia inercia del rotor. Para la introducción radial de los álabes, las ranuras circunferenciales se ensanchan en un punto para permitir que el encastre "T" de un álabe pueda introducirse en la ranura. Los álabes se insertan de uno en uno en los ensanchamientos y se los hace deslizar hasta llenar casi totalmente la ranura periférica. El espacio libre que queda en el lugar del ensanchamiento citado es menor que el requerido por otro álabe, por lo que se llena el espacio con piezas de cierre (chavetas). Las dimensiones de los álabes, aumentan progresivamente desde la rueda N° 1 a la 10, debido al aumento de volumen específico del vapor como consecuencia de la expansión del mismo.

En el extremo del lado BP presenta brida de acoplamiento y en el del lado regulador presenta un engranaje que actúa con el sistema mecánico de bombeo de aceite (IMO).

Sobre el eje se dispone de las llamadas "chapas jota". Éstas se hallan encastradas en ranuras provistas en el mismo y zunchadas con alambre dulce de alta calidad. Las chapas se tornean en dos alturas diferentes, en forma alternada, correspondiente a la geometría del "pan" de trabajo en caja laberíntica.

Los materiales de rotor son los siguientes:

- Eje del rotor: aleación de acero
- Ruedas: aleación de acero
- Álabes móviles: acero inoxidable

Los álabes de las rueda N° 1 a 7 son de carácter no magnetizable. En cambio los de la rueda 8 a la 10 son ferromagnéticos.

Sellos laberínticos N° 1 y 2

Las cajas de sellos laberínticos son empaquetaduras que generan un gran número de puntos de estrangulación conectados sucesivamente. El diseño es del tipo "chapa jota y panes de alturas alternadas" para lograr mayor pérdida de carga del vapor de fuga, debido a la turbulencia que se genera en esa zona. Este último se topa con el vapor de sello generándose el cierre. El producto final de ambos se dirige al condensador de vapor de sellos (chancha).

La luz existente entre las chapas y los panes ronda entre 2 y 3 décimas de milímetros.

Las cajas de sellos se encuentran apoyadas sobre la base del cuerpo de AP, dispuestas antes de la rueda Curtis y luego de la última rueda (en el sentido del flujo de vapor).

Los panes metálicos están precargados con resortes de acero.

Cojinetes N° 1 y 2

El cojinete N° 1 es de deslizamiento del tipo radial, y el N° 2 es de deslizamiento combinado radial y axial de doble efecto. Esto último se debe puesto que en los arranques o paradas de la máquina funciona el dispositivo giratorio del rotor (virador), el cual introduce un empuje axial en sentido opuesto al normal de la turbina en servicio continuo. Por lo tanto, con el virador hay empuje hacia el alternador, en tanto que con el vapor de accionamiento el empuje es hacia el regulador.

El cojinete N° 1 se encuentra apoyado sobre el pedestal asociado al bloque de maniobras, mientras que el 2 se apoya sobre la base media. Ambos funcionan según el principio de lubricación hidrodinámica; y según el principio hidrostático en el momento del arranque de la máquina o cuando la velocidad es baja.

Cuerpo de Baja presión

El cuerpo está compuesto por:

- Una carcasa (tapa y base)
- Un rotor de baja presión (BP)
- Cojinetes N° 3 y 4
- Sellos laberínticos N° 3 y 4

Carcasa

Está compuesta por la tapa y la base. A su vez las podemos subdividir en una parte en caliente y otra en frío. En el interior de la parte en caliente se aloja el rotor y está térmicamente aislada. El interior de la parte fría conduce al vapor proveniente de la rueda N° 20 hacia el condensador.

La base en caliente se encuentra abulonada a la tapa, y sus extremos están apoyados sobre la base media. Al igual que la base de AP, se encuentra "colgada". Está acoplada a la base media mediante el gancho N° 3, con lo cual se logra el posicionamiento horizontal de la misma con la base media.

El ensamble entre la tapa y la base de la carcasa es mediante espárragos y tuercas, cuyo apriete es en caliente, en el lado anterior y en frío en el lado posterior. El apriete en caliente tiene la función de asegurar que no existan pérdidas de vapor a través de la junta, debido a la posterior dilatación de los espárragos, que provoca un ajuste con interferencia, al igual que AP, conviene esmerilar y colocar aceite de lino cocido sobre su superficie en el momento del ensamble.

Interiormente se dispone el grupo de diez diafragmas, cuyos detalles constructivos son similares a los de AP. Respecto a los diafragmas de alta, las dimensiones son mayores debido al aumento de volumen específico del vapor.

La base en frío se vincula a la base de cola mediante brida de acople. Se encuentra apoyada sobre fundación y posee anclajes de referencia cero de dilatación térmica.

Los materiales de este cuerpo son:

- Carcasa: fundición de hierro
- Diafragmas: fundición de hierro
- Álabes fijos: aleación de acero (distinta grado de aleación según número de diafragma)

Rotor de BP

El rotor de BP (Fig. 8) presenta diez ruedas de álabes móviles, las ruedas N° 11 a 20, éstas son ruedas de reacción cuyo grado va en aumento hacia la última.



Figura 8. Rotor de BP - TV N° 7

Comparativamente con el rotor de AP, tanto el rotor como los álabes poseen mayores dimensiones ya que trabaja con vapor de mayor volumen específico. A su vez las dimensiones aumentan progresivamente desde la rueda N° 11 a la 20, como consecuencia de la expansión del mismo a través de cada etapa.

Los álabes se encuentran fijados a las coronas de cada rueda de la misma forma que los de AP. También poseen el mismo sistema de variación de frecuencia de oscilación, o sea el bandaje.

En ambos extremos del eje se localizan las “chapas jotas” dispuestas antes de la rueda N° 11 y luego de la última rueda (en el sentido del flujo de vapor). Las chapas dispuestas antes de la rueda N° 11 están mecanizadas en dos alturas diferentes, en forma alternada; mientras que las otras son de altura constante, debido al tipo de caja de sellos laberínticos que actúan de cierre.

Los materiales de rotor son los siguientes:

- Eje del rotor: aleación de acero
- ruedas: aleación de acero
- Álabes móviles: aleación de acero ferromagnética

Cojinetes N° 3 y 4

Ambos cojinetes son de deslizamiento del tipo radial. El cojinete N° 3 se encuentra apoyado sobre la base media, mientras que el N° 4 se apoya sobre la base de cola. Al igual que los cojinetes N° 1 y 2, ambos funcionan según el principio de lubricación hidrodinámica; y según el principio hidrostático en el momento del arranque de la máquina o cuando la velocidad es baja.

Sellos laberínticos N° 3 y 4

Las cajas de los sellos N° 3 y 4 se encuentran apoyadas sobre la base caliente del cuerpo BP, dispuestas antes de la rueda N° 11 y luego de la última rueda (en el sentido del flujo de vapor) respectivamente. La caja N° 3 (Fig. 9) presenta panes metálicos similares a los detallados para el cuerpo AP, mientras que la caja N° 4 posee panes lisos de carbón (Fig. 10), ya que trabaja con menor presión y temperatura. Éstos actúan de cierre con las chapas del rotor.



Figura 9. Caja de sellos N° 3.



Figura 10. Caja sello - "Panes de carbón"

Base media

La base media (Fig. 11) cumple diversas funciones por las cuales se vinculan los cuerpos de Alta y Baja. En su interior se halla el acople entre los respectivos ejes. Esto es a través de bridas de acoplamiento abulonadas. El sistema tornillos-tuerca, es a su vez, trabado transversalmente mediante chavetas para evitar el movimiento relativo radial de aquellos.

En la misma se disponen los asientos de los cojinetes N° 2 y 3 y los correspondientes espárragos para el apriete de los puentes.



Figura 11. Base media TV N° 7

La base constituye un “carter”, o sea un depósito de aceite la cual ya cumplió su función para retornar al depósito y reiniciar su ciclo (refrigerado, filtrado y presurizado). En su interior se disponen las cañerías, accesos y egresos del aceite de lubricación, tanto para la hidrodinámica como para la hidrostática.

Con respecto al cuerpo AP hace de apoyo a los extremos la respectiva tapa. Mediante suplementos se logra varias la posición relativa vertical. Horizontalmente se logra el mismo propósito mediante el gancho N° 2 el cual vincula a la base media con la base AP. Este gancho no admite movimiento axial entre sus cuerpos. Con respecto al cuerpo BP se encuentra vinculado por el gancho N° 3, que hace de apoyo a los extremos de la respectiva base. En este caso los propósitos de alineación y vinculación son similares a lo expresado en el párrafo anterior.

Cabe aclarar que no se procede al desmontaje de la vinculación entre base media-base BP con fines de alineación.

Por último aclaramos que en la tapa se dispone de los accesos para termómetros y manómetros. La misma es apretada en frío a la base, dispuesta sobre fundación, mediante bulones y centrada por medio de espigas.

Base de cola

La base de cola (Fig. 12) es el cuerpo contiguo al de baja y se encuentra rodeado por la parte “fría” de este último. En su interior se halla el acople entre el eje BP y el del alternador. El conjunto bridas y engranaje de virador se encuentra cubierto por un cubre manchón.

En la misma se disponen los asientos de los cojinetes N° 4 y 5 y los correspondientes espárragos para el apriete de los puentes. La base también cumple la función de “carter”.

La tapa de cola hace a su vez de base del sistema virador.



Figura 12. Base de cola

Dispositivo giratorio del rotor

El dispositivo giratorio del rotor (Fig. 13) se encuentra colocado sobre la tapa de cola. Cuenta con un motor eléctrico de relación de transmisión 1:130 aproximadamente, que está embridado a un engranaje planetario que se encuentra atornillado a la caja de engranajes, a través de un sistema de engranajes se encuentra embragado a la corona dentada ubicada en la mitad del acoplamiento (lado turbina) del rotor de Baja y el rotor del alternador.

El mismo tiene la misión, luego de una parada o en cortas interrupciones del servicio, de girar lentamente el rotor para evitar la curvatura del mismo durante el enfriamiento de la máquina.

Principio de funcionamiento

Cuando el rotor de Baja comienza a girar debido al trabajo realizado por el vapor de accionamiento, sobre la dentadura inclinada de la corona ubicada en el acoplamiento se produce una fuerza axial que separa del rotor al virador. Si el rotor no gira y se acciona el motor eléctrico, la fuerza axial opera en sentido inverso y el piñón se mantiene en contacto con la corona.

La velocidad de giro del mismo es de 26 r.p.m., durante su funcionamiento el virador se encuentra lubricado mediante la bomba principal de aceite a una presión de 1,5 Kg. /cm².

El virador posee dos interruptores de seguridad; de presión y de fin de carrera, éstos desconectan el motor cuando la presión de aceite desciende por debajo de 1 Kg. /cm² y cuando el piñón se encuentra todavía entre 10 y 30 mm en contacto con la corona del rotor, respectivamente.

En funcionamiento normal, cuando el rotor comienza a girar debido al vapor de accionamiento; comienza el movimiento de desembague entre piñón y corona del rotor y entonces actúa el interruptor de fin de carrera desconectando automáticamente al motor.



Figura 13. Dispositivo giratorio del rotor.

Regulador

El Regulador se compone básicamente del bloque de maniobras el cual se sitúa físicamente delante del cuerpo de alta presión de la turbina. La función del regulador es la de mantener constante a la velocidad de giro al variar la carga, en el caso de generadores de corriente alterna se exige la constancia de la frecuencia, para lo cual se debe mantener con mucha exactitud la velocidad de giro de la turbina.

El estudio de la regulación se divide en dos partes:

- La regulación propiamente dicha, es decir, los mecanismos y accesorios empleados para mantener la velocidad de la turbina.
- Los procesos termodinámicos empleados en los diferentes métodos de regulación empleados y sus efectos sobre el rendimiento de la turbina a cargas parciales.

Para las grandes máquinas es conveniente emplear varias válvulas, cada una de las cuales alimenta a una tobera o a un grupo de toberas, abriéndolas o cerrándolas consecutivamente mediante un servomotor o con dos servomotores en serie.

Descripción del Principio de Regulación

El vapor se conduce (Fig. 14) a la turbina a través de la tubería de vapor vivo (1), se expandiona en la turbina y se condensa en el condensador.

Una válvula de cierre de vapor (2), de cierre rápido, obstruye el paso de vapor vivo a la máquina. La cantidad de vapor que penetra en la turbina está regulada por las válvulas de regulación (3). Estas válvulas están unidas al varillaje de regulación mediante un amplificador de la energía (no se encuentra esquematizado.) El péndulo centrífugo (8) actúa, a través del dispositivo de cambio de la velocidad (7), sobre la palanca (5), la cual se apoya en un pivote (6). Las válvulas de regulación están articuladas en otro pivote (4).

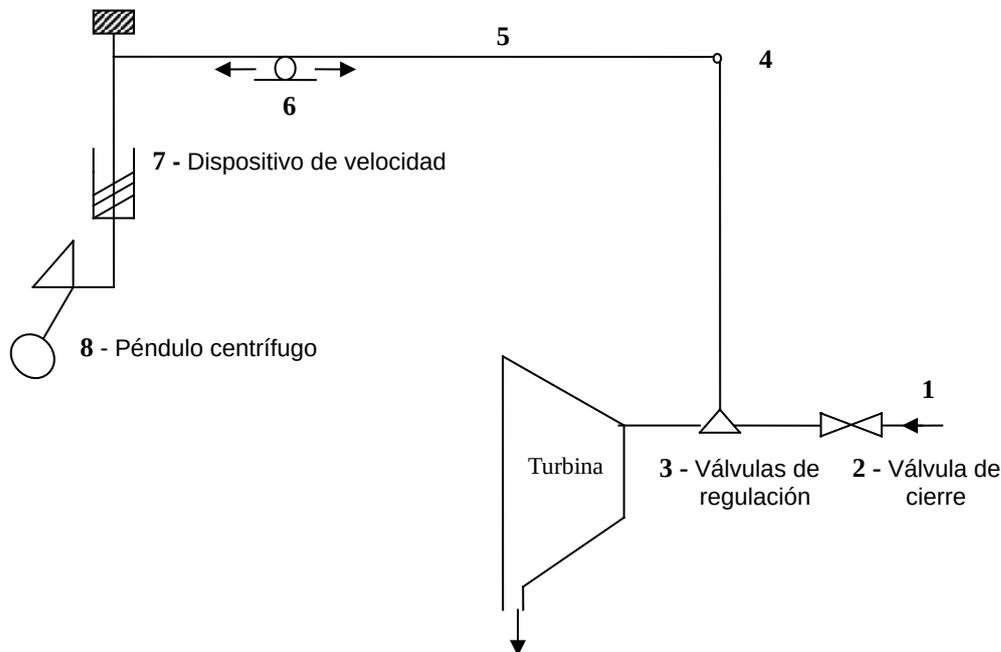


Figura 14. Esquema del principio de la regulación.

Función del Regulador

Si por ejemplo, aumentara la velocidad, el peso centrífugo del péndulo (8) se aleja de su eje giratorio y arrastra hacia abajo, alrededor del pivote (6) a la palanca (5) y de esta manera las válvulas de regulación (3) se acercan a sus asientos.

Esta regulación de la velocidad trabaja, según sea el tipo de explotación, de las formas:

Servicio aislado

Es el caso cuando el grupo está acoplado eléctricamente a una red propia en la que debe mantener la frecuencia. A pesar de que la velocidad está regulada, ésta no permanece exactamente constante, sino que varía de acuerdo con la carga.

Servicio con red

Se entiende cuando el grupo está sincronizado a una "red externa", esto es, a una red en la que varias centrales mantienen constante la frecuencia. Si por el contrario oscila la frecuencia de la red, la potencia variará según la nueva situación del regulador de velocidad. Al contrario del servicio aislado, la carga se adapta a la velocidad.

Detalles constructivos del regulador

El Regulador (ver Anexo II) se compone básicamente de los siguientes componentes:

- Bloque de maniobras
- Dos válvulas de cierre rápido (válvulas stop)
- Cuatro válvulas de regulación
- Varillajes de distribución
- Varillaje de energía
- Varillaje de retorno

A continuación se describirá constructivamente cada componente.

Bloque de Maniobras

El mismo se sitúa físicamente delante del cuerpo de alta presión de la turbina (Fig. 15). Está compuesto principalmente de:

- Péndulo centrífugo
- Amplificador de la regulación de velocidad
- Válvula de distribución
- Válvula de cierre rápido
- Regulador de seguridad
- Dispositivo de disparo
- Disparo a mano
- Bomba principal de aceite
- Dispositivo de prueba de cierre rápido
- Dispositivo eléctrico por baja frecuencia
- Dispositivo eléctrico por sobre frecuencia



Figura 15. Vista frontal bloque de maniobras – TV N° 8

Péndulo centrífugo

A partir de una disminución en la velocidad de la turbina debida a un aumento de la carga, varía la fuerza centrífuga actuante sobre el péndulo, generando en el aceite de regulación una diferencia de presión. Ésta produce una fuerza que actúa sobre la válvula de distribución, y hace desplazar al émbolo regulador, el cual libera ciertos orificios, haciendo fluir el aceite por las tuberías de distribución hacia el servomotor.

El servomotor envía al aceite hacia las válvulas de regulación, las cuales regulan la cantidad de vapor mediante el desplazamiento del émbolo, elevándose así el cono de válvula para permitir el ingreso de un mayor caudal de vapor que ingresa a la turbina.

Amplificador de la regulación de la velocidad

La función principal del amplificador es la de ampliar la carrera del péndulo y transmitirla así al varillaje regulador (distribución, energía, retorno).

Válvula de distribución

El movimiento del émbolo regulador de dicha válvula abre o cierra los orificios que permiten el flujo de aceite hacia las válvulas de regulación.

Válvula de cierre rápido

Para mayor seguridad, se disponen de dos válvulas. Para parar el grupo, es suficiente accionar sólo una de éstas válvulas.

En posición normal el casquillo de ésta se encuentra mantenida en su posición inferior por un gatillo en contra de la fuerza de un resorte. En esta posición se encuentran cerrados los orificios de retorno, de manera que el servomotor y la válvula de cierre se alimentan con aceite procedente de la tubería de distribución.

Cuando actúa el cierre rápido, se dispara el gatillo y la corredera se desliza hacia la posición superior, descubriéndose los orificios de retorno, iniciándose el movimiento de cierre.

Regulador de seguridad

Es un dispositivo mecánico de seguridad contra sobre velocidad. En el eje de la turbina se encuentran colocados dos anillos excéntricos. Cuando la velocidad supera cierto valor, la fuerza centrífuga sobre ellos supera la fuerza de un resorte, provocando el desplazamiento radial, que hace que golpee una palanca vinculada al gatillo que se encuentra en el bloque. Ésta hace que se dispare, repitiendo lo explicado en el párrafo precedente.

Dispositivo de disparo

Cumple la misma función que el regulador de velocidad. Es un dispositivo hidráulico, el cual se dispara cuando deja escapar el aceite que hay encima del émbolo y un resorte provoca el ascenso de una barra. La misma acciona las correderas que hacen disparar el gatillo que se encuentra en el bloque.

Disparo a mano

Sobre el bloque, se hallan dos botones que presionando uno o ambos, se disparan las correderas de cierre rápido mediante el gatillo antes mencionado.

Bomba principal de aceite

Es accionada por el eje de la turbina a través de un engranaje frontal de relación de transmisión 1:2,04. La misma distribuye el aceite de regulación a una presión de 8,5 Kg. /cm².

Dispositivo de prueba de cierre rápido

Tiene la finalidad de verificar separadamente, durante el servicio, cada uno de los cierres rápidos o anillos excéntricos (Fig. 16).



Figura 16. Dispositivo de prueba de cierre rápido

Válvulas Stop

Las válvulas Stop (Fig. 17) regulan y ajustan el cierre del vapor vivo mediante el giro de un volante. A pesar del gran esfuerzo de regulación de la válvula, la fuerza que se debe ejercer es pequeña ya que cuenta con la ayuda de un regulador hidráulico preliminar.



Figura 17. Válvula Stop – TV Nº 8

Válvulas de Regulación

La turbina cuenta con cuatro válvulas de regulación (Fig. 18). Las mismas se encuentran físicamente sobre el techo de la chapa protectora del cuerpo de alta presión.

El varillaje de energía transmite los movimientos del servomotor al eje giratorio, que a su vez, una palanca transmite el mismo al cono de la válvula, con ayuda de una palanca y el tornillo superior que se observa en la figura, abriéndose o cerrándose aquella según sea el sentido antihorario u horario respectivamente del varillaje, venciendo la fuerza del resorte que la mantiene apoyada en su asiento en el caso cuando se abre.

Si el eje giratorio acciona varias válvulas, el orden sucesivo y temporal del movimiento puede ser ajustado por medio del tornillo superior.



Figura 18. Válvula de regulación

Varillajes de distribución

Une al émbolo distribuidor con el amplificador de la regulación de la velocidad, las palancas transmiten los impulsos de distribución al émbolo, en el que se amplían, llegando luego a las válvulas a través del servomotor y del varillaje de energía.

Varillaje de energía

Se encarga de transmitir a las válvulas los movimientos de distribución del servomotor.

Varillaje de retorno

Cumple la función de estabilizar los procesos de regulación.

Alternador

El alternador es la máquina destinada a transformar la energía mecánica rotacional del rotor de la turbina en energía eléctrica, generando una corriente alterna trifásica mediante fenómenos de inducción. Está compuesto básicamente de los siguientes elementos:

- Estator o inducido: comprendido por un circuito magnético el cual está conformado por un conjunto de chapas ferromagnéticas, apiladas y aisladas unas de otras. Dicho circuito posee ranuras uniformemente distribuidas en las cuales se aloja el devanado trifásico del estator. La salida de cada una de las fases del estator está conectada a la red trifásica.
- Rotor o inductor: posee un devanado dispuesto en las ranuras periféricas del mismo, por donde circula la corriente continua de excitación. El rotor gira en el interior del estator inmóvil. El mismo está acoplado en un extremo al rotor de la turbina y en el otro a la máquina excitatriz.

Los alternadores acoplados a las turbinas N° 7 y 8 son similares, por ende presenta las mismas características (Tabla 3).

Alternador Brown Boveri & CIA - (BBC)
 Potencia nominal 37500 KVA
 Velocidad 3000 rpm
 Frecuencia 50 Hz
 Voltaje nominal 13200 V \pm 5 %
 Corriente nominal 1640 A
 Factor de Potencia 0,8
 Clase de Aislación F (155 °C)
 Entrehierro 45 mm
 Peso del estator 59 t
 Peso del rotor 18,5 t
 Resistencia estática a 20° C 0,0065 W / fase
 Resistencia rotórica a 20° C 0,128 W
 Longitud total 7570 mm
 Ancho total 3600 mm
 Altura total 3735 mm

Tabla 3. Datos técnicos – Alternador BBC

Detalles constructivos

El bloque alternador (ver Anexo III) está compuesto esencialmente por el estator y su respectiva carcasa, el rotor, el dispositivo porta escobillas, el cojinete N° 5 y el cojinete N° 6 con su pedestal.

Estator

La carcasa hace de soporte a los paquetes de chapas magnéticas del arrollamiento estático y a las tapas del generador. Tanto la carcasa como las tapas terminales, sirven de cubierta de cierre para la hermeticidad del aire de refrigeración que circula en su interior (Fig. 19).

Esta estructura rígida dispone de cuatro sectores estratégicamente ubicados donde se encuentran los cajones de los refrigerantes, vinculados a la misma mediante cordón de soldadura. Los refrigerantes son esencialmente intercambiadores de calor de superficie por los cuales se enfría el aire, previamente filtrado, mediante agua de mar. En la parte superior de dichos cajones se consta de acceso para la limpieza periódica de los refrigerantes. El circuito de refrigeración es abierto donde la porción de aire que ha cumplido su función es devuelta nuevamente a la atmósfera.

Se dispone también dos pivotes, uno en cada lateral, a media altura para el izado de la estructura.

En el perímetro interior se encuentran, repartidas uniformemente, cuñas de milano para la sujeción de los paquetes de chapa. En la parte inferior se halla la abertura para las borneras de salida del alternador.

El peso del estator se transmite a la fundación por medio de los pies de apoyos soldados lateralmente a la carcasa. Se fijan a la fundación mediante bulones y espigas. Están prolongados cercanamente a los cojinetes con el fin de transmitir las fuerzas ejercidas sobre estos directamente a la fundación.

Los paquetes de chapas magnéticas del estator son los encargados de conducir el flujo magnético y alojar el arrollamiento estatórico en las ranuras dispuestas en ellas. Se construyen paquetes parciales compuestos por segmentos de chapas apiladas una con otras y aisladas entre sí mediante laca aislante resistente para evitar que entren en cortocircuito. Las mismas están laminadas en frío y poseen bajo coeficiente de pérdidas. En los extremos del estator se construyen paquetes de menor altura con el objeto para que el entrehierro aumente gradualmente y así disminuir las pérdidas adicionales en los casquetes del rotor. El ajuste permanente de todo el conjunto de chapas se logra mediante las denominadas placas de presión colocada en los extremos frontales. Las mismas son de material antimagnético. Los paquetes parciales poseen preajuste, logrado mediante perfiles "L".

El arrollamiento estatórico, encargado de conducir la corriente nominal inducida en el mismo hacia la red a alimentar, esta uniformemente repartido en todo el perímetro del inducido y colocado en las ranuras rectangulares del paquete de chapa estatórico. Se disponen de dos barras, aisladas entre sí, por cada ranura a lo largo de la parte activa del estator. El cierre de las ranuras se lleva a cabo mediante cuñas macizas. Las cabezas de bobinas tienen una inclinación tal que asemejan al perfil de un barril.

Las barras están compuestas por un gran número de conductores elementales macizos, distribuidos uniformemente en la sección de conjunto que forman la misma. La disposición adoptada se denomina "Roebel", por la cual los conductores se trenzan de forma tal que cada uno ocupe, como mínimo una vez, todas las posiciones transversales a lo largo de una misma ranura, compensándose así el efecto reactivo. Los conductores elementales están aislados entre sí mediante seda de vidrio y son embebidos en resina sintética. Para aumentar la resistencia mecánica del conjunto, los conductores son pegados bajo presión y temperatura para formar la barra compacta. Luego se realiza el aislamiento principal según el procedimiento MICADUR que utiliza seda de vidrio, como aislante base y soporte de la mica. El aislamiento se consigue enrollando una cinta continua de este material a lo largo de toda la superficie de la barra, la cual se seca bajo vacío, se impregna con resina sintética y se endurece mediante proceso térmico en molde de forma. Por último se las recubre con una laca conductora de fuerte poder adhesivo con el fin de conferir protección contra efluvios, lo mismo se hace en las ranuras estatóricas.

Mediante uniones en las cabezas de bobina se realizan las conexiones correspondientes a las tres fases y al centro de estrella. Se dispone de soporte, para las cabezas de bobinas, los cuales se encargan de mantenerlas fijas para garantizar rigidez del conjunto ante la posibilidad de sobre-corrientes debidas a cortocircuitos en bornes de salida o bien a condiciones desfavorables de funcionamiento. Dichas bobinas se fijan al mediante un vendaje de cordón formando un conjunto compacto. Este es fijado a la placa de presión mediante bulones de material antimagnético.



Figura 19. Interior del alternador

Rotor

El rotor es de dos polos construido con acero magnético forjado de alta calidad. Posee un agujero central donde se aloja el arrollamiento de excitación vinculado a los anillos rozantes. Dispone de asientos (gorrones), en ambos extremos, para cojinetes y ventiladores. El extremo de accionamiento esta provisto de una brida de acoplamiento, por donde se transmite el momento de giro de la turbina. Dado que la frecuencia normalizada del sistema eléctrico es de 50 Hz y el número de polos del generador es de dos, resulta como velocidad de rotación 3000 r.p.m., tanto del rotor de alternador como el de la turbina por estar acoplado directamente. La velocidad de giro responde a la siguiente expresión:

$$V[r.p.m.] = \frac{120 \times 50 [Hz.]}{\text{Número de polos}} = 3000 r.p.m$$

El cuerpo está fresado en toda su longitud activa, con ranuras de perfil rectangular en las que se colocan los arrollamientos de excitación y de amortiguación. Se realizan también muescas transversales para compensar la desigualdad del eje neutro con el polar del rotor, y con esto reducir las vibraciones mecánicas que esta desigualdad causaría. Posee agujeros, concentrados en la zona central, para que el aire de refrigeración pueda ser evacuado al entrehierro en sentido radial.

El arrollamiento rotórico es el encargado de conducir la corriente necesaria para la excitación del generador, el mismo está ubicado en las ranuras realizadas en el rotor. Los conductores son aislados entre sí, contra las ranuras y el arrollamiento de amortiguación. Los conductores que están fuera de las ranuras, o sea, las cabezas de bobinas, poseen distanciadores para mantener sus posiciones relativas y dar rigidez al conjunto.

El arrollamiento amortiguador está alojado en la parte superior de las ranuras, y se lo aísla del principal. Está compuesto de barras planas. Las cabezas de bobinas de éste, también están aisladas con respecto al de excitación, están dobladas de forma tal que se tocan una con otras formando junto al casquete una configuración similar a una "jaula de ardilla".

En cada polo hay una ranura que no posee arrollamiento amortiguador, que es donde se coloca el dispositivo (chavetas) de sujeción radial de los casquetes.

Las bobinas de excitación son de cobre duro con aleación de plata al igual que las bobinas de amortiguación, pero con diferente grado de aleación y dureza.

El cierre de las ranuras se hace mayormente por medio de cuñas macizas y otras tantas con agujeros huecos roscados. Estas últimas están distribuidas estratégicamente y sirven para fines de balanceo.

Los casquetes del rotor, comúnmente llamados "Calotas" son los encargados de soportar las fuerzas centrífugas producidas en la cabeza del arrollamiento. También absorben el empuje producido por los efectos de dilatación del mismo. Están compuestos por anillos y placas circulares vinculados mediante técnicas de zunchado. La sujeción es del tipo bayoneta, de perfil similar al de una senoide. Están construidas de material antimagnético de alta resistencia y tenacidad. Se fijan en voladizo a los bloques extremos del rotor, se aseguran axialmente por de cierre tipo bayoneta y radialmente por medio de chavetas. El grado restante de libertad, por el cual la calota podría ejecutar movimientos de "cabeceo", se restringe mediante placa de cierre con interferencia en su diámetro interior y zapatas del rotor.

En el extremo del lado excitatriz se hayan montados sobre el eje los anillos rozantes, debidamente aislados entre sí y del mismo con capas de mica. Estos conducen la corriente de excitación que atraviesa a las escobillas ubicadas en su periferia. Están compuestos cada uno por dos anillos concéntricos zunchados a presión (interferencia). El anillo interior asienta sobre el eje y soporta al exterior. La superficie exterior de los anillos rozantes esta provista de ranuras para evitar zonas de calentamiento y lograr una buena transmisión eléctrica. El calor producido es evacuado mediante aire provisto por un ventilador radial.

Los conductores de los anillos rozantes tienen la misión de transmitir la corriente de excitación suministrada a través de las escobillas. Dichos conductores consisten dos barras, de sección transversal semicircular, de cobre que se adaptan a la perforación central del árbol. Están aislados entre sí y contra el árbol. La conexión entre estas barras y los anillos rozantes se hacen por medio de bulones de toma corriente roscados.

Dispositivo porta escobillas

Tiene por objeto transmitir a los anillos rozantes en rotación la corriente de excitación precedente de la máquina de corriente continua denominada excitatriz. Se compone de puentes de escobillas, porta escobillas y las escobillas mismas (Fig. 20). Está montado sobre la misma base metálica del bloque excitatriz.

Los puentes están aislados de la cubierta a la cual están fijados y entre sí. Por ellos circula la corriente proveniente de la llave de campo, a través de barras. A ellos se les acoplan los porta-escobillas, los cuales están dispuestos radialmente y distanciados unos e otros. Los porta-escobillas están distanciados radialmente de los anillos entre 1,5 a 2 mm.

Las escobillas se alojan en las cavidades de los porta escobillas y mediante resorte se las mantiene en contacto con la superficie de los anillos para así lograr una presión determinada.



Figura 20. Dispositivo porta escobillas

Cojinetes N° 5 y 6

Estos cojinetes son de deslizamiento del tipo radial, ambos funcionan en servicio mediante el principio de lubricación hidrodinámica. También poseen accesos para lubricación hidrostática utilizada en fase de arranque.

El cojinete N° 5 esta montado sobre base de cola y el cojinete N ° 6 sobre pedestal montado en placa base del bloque excitatriz.

Excitatriz

El bloque excitatriz (ver Anexo IV) es el encargado de proveer la corriente de excitación (I_{ex}) al arrollamiento rotórico del alternador. Este bloque está compuesto esencialmente por dos máquinas de corriente continua denominadas excitatriz principal y excitatriz piloto, cada una cumple una función y poseen distintas características (Tabla 4).

Excitatriz Principal	Piloto	Potencia	193/405
KW	4,34	KVA	Tensión 180/260 V
VC	Corriente 1070/1560 A	6,6	ANº rev. 3000
			r.p.m.

Tabla 4. Datos característicos

Este bloque responde a una secuencia de generación (Fig. 21) por la cual se cumple el objeto primordial.

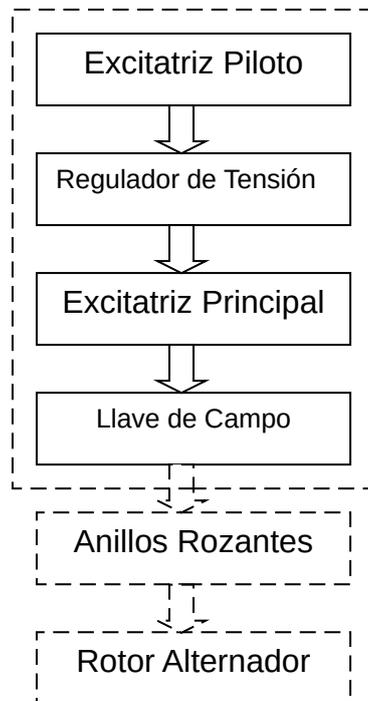


Figura 21. Secuencia de generación

El estator de la excitatriz piloto hace las veces de inductor, es del tipo imán permanente y está bobinado para su magnetización externa cuando sea necesario cumpliendo lo establecido por el ciclo de histéresis. Dicha magnetización se lleva a cabo mediante banco de baterías que proveen una tensión continua de 110 V. El campo remanente enlaza al rotor bobinado. Éste campo, en combinación con el momento de giro que impone el eje de la turbina al rotor, da origen a una tensión trifásica alterna de 380 V. Mediante tres anillos rozantes y juegos de escobillas se alimenta al regulador de tensión ubicado en tablero de comando.

El regulador de tensión es el encargado de proveer la corriente de magnetización, de cierto valor medio (I_M) al estator de la excitatriz principal. El valor de I_M es directamente proporcional a la I_{ex} requerida y para cuantificarlo actúa un sistema electrónico, compuesto por diodos, tiristores y otros elementos de estado sólido, que transforman la onda sinusoidal de valor medio cero en una onda de valor no nulo. En base al tiempo de actuación empleado por los

tiristores se consiguen los distintos valores que debe tomar I_M . Al ser esta corriente ajustable se consigue inducir al rotor de la excitatriz principal, acoplado a la turbina, el campo magnético requerido para generar la I_{ex} . Este rotor alimenta, a través de las escobillas de conmutación, a dos barras conductoras que se conectan a la entrada de la llave de campo (seccionador) ubicada en tablero externo a la máquina. Y la salida de esta llave se conecta, también mediante barras, a los anillos rozantes del alternador mediante sistema de escobillas.

Detalles constructivos

El bloque excitatriz (Fig. 22) está compuesto, además de sendas máquinas de excitación y sus accesorios, por base metálica y cojinetes N° 7 y 8 con sus respectivos pedestales. El peso total del grupo es de 3,3 toneladas, incluyendo a la placa base.



Figura 22. Bloque Excitatriz

Base metálica

Esta base se encuentra montada sobre una placa base metálica que a su vez está solidaria a la fundación. Ambas poseen cavidades y accesos para el aire de refrigeración. Además en la base metálica se dispone de filtro de aire para el flujo de ingreso al conmutador de la excitatriz principal.

Dispone de cuatro pivotes, dos frontales y dos laterales, para colocar eslingas y ejecutar maniobras de izado.

Sobre lateral se haya bornera de barras y cables que vincula al bloque con llave de mando y regulador de tensión respectivamente.

Excitatriz principal

Se encuentra montada directamente a la base metálica. Cuenta con cobertura metálica asociada a la carcasa estatórica. Tiene dos tapas de inspección, en el extremo correspondiente al sistema conmutador, sobre los laterales del mismo. Estas son de utilidad al momento de hacer cambios de escobillas, como también para inspecciones visuales de su estado. En el extremo opuesto se haya el cajón de aire.

En su interior se dispone de ventilador axial, propulsado directamente por el eje de turbina, para favorecer la circulación del flujo refrigerante. Por encima del conmutador, la cobertura tiene zona de rejillas para la evacuación del dicho flujo. El ventilador esta ajustado con interferencia al eje y posee chaveta para restricción del grado de libertad radial.

El dispositivo porta escobilla del conmutador, montado en el interior de la cobertura, está ajustado a la base metálica, conectado a tierra y totalmente aislado de los porta escobillas como así también de las barras de alimentación de la llave de mando. Dichas barras están conectadas a los cables de las escobillas.

El eje de giro cuenta con asientos para el ventilador y ambos cojinetes. El extremo que se acopla al eje de la excitatriz piloto es cónico y posee agujero roscado coincidente con el eje de simetría.

Excitatriz piloto

Está emplazada sobre pedestal montado a la base metálica, para compensar la diferencia de tamaño con la excitatriz principal. Con ésto se logra que los ejes de ambas estén a la misma altura.

El eje de giro presenta cavidad para el encastre con el eje de la otra excitatriz. También es hueco en el otro extremo, por donde se dispone del perno para el acople de dicho eje con el de la excitatriz principal. En el extremo final se coloca un tapón de cierre.

Los anillos rozantes son montados sobre asientos de eje con interferencia y están aislados del mismo.

La ventilación en este caso es natural, para este fin se dispone de rejillas en la carcasa. El dispositivo porta escobillas está sujetado por la misma carcasa.

Cojinetes N° 7 y 8

Estos cojinetes son de deslizamiento del tipo radial, ambos funcionan en servicio mediante el principio de lubricación hidrodinámica. No poseen accesos para lubricación hidrostática. Ambos están montados sobre pedestales vinculados a la base metálica.

Cabe aclarar que los mismos no son similares entre sí.

Cojinetes

Constructivamente los cojinetes (Fig. 23) están compuestos por dos mitades, vinculadas entre sí mediante dos bulones y dos espigas distribuidos diagonalmente. La mitad inferior consta de orificios para ingreso de aceite. La misma posee dos suplementos exteriores o “panes” laterales para la alineación horizontal y uno en la parte inferior para la vertical. Estos suplementos son desmontables y se les interponen láminas delgadas para la corrección de la alineación. La mitad superior está provista de una franja central que sirve de asiento para el puente de sujeción, por el cual se ajusta al conjunto y se lo traba axialmente. Cabe destacar que el diseño interior del conjunto es del tipo “limón”, donde el diámetro horizontal es mayor al vertical favoreciéndose así el mecanismo de lubricación hidrodinámica. Este mecanismo también se ve favorecido por lo que se denomina “bolsa o bolsillo de aceite” que no es más que un rebaje suave, que se va suprimiendo gradualmente desde la horizontal hasta un octavo del diámetro interior, del material antifricción. Se dispone del mismo solo en un lado por mitad de cojinete.



Figura 23. Cojinete Nº 3

El diámetro interior del cojinete está ligado al diámetro del eje con el que interactúa. El diámetro vertical es tal que dicho huelgo sea de 0,15 % del diámetro del eje y el horizontal sea de 0,4 % del mismo (Fig. 24). Por ser un redondo, dichos porcentajes permiten apreciar el carácter de “limón” que poseen los cojinetes.

Para ejemplificar esta situación tomamos como referencia al cojinete Nº 3. El diámetro del eje es de 200 mm, por ende resulta:

Con respecto al bolsillo de aceite, la profundidad inicial del mismo es del orden del milímetro.

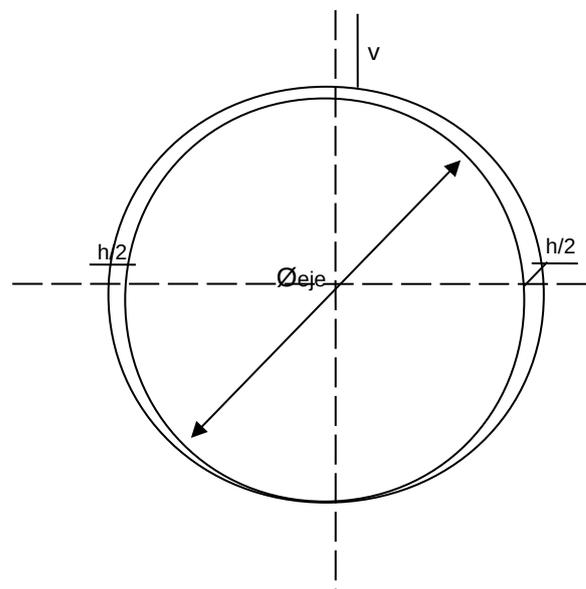


Figura 24. Diámetro de cojinete

Los materiales empleados en la construcción de los cojinetes son de hierro fundido de alta calidad y están recubiertos, interiormente, con metal blanco antifricción. Este consiste en una aleación estaño, plomo y antimonio.

En cada extremo se colocan sellos de bronce con diámetro interior levemente superior al eje. Estos sirven para que el aceite que ya cumplió su función sea vertido al correspondiente depósito, tanto el grueso del fluido como el que tendería a viajar por el eje si estos sellos no estarían.

Los ocho cojinetes distribuidos en la turbina trabajan bajo el principio de cuña hidrodinámica, por el cual la distribución de presión da origen al poder de sustentación de la carga en servicio, o sea el eje. Este fenómeno es promovido por las condiciones geométricas y el movimiento relativo entre las superficies involucradas, derivando en la auto-sustentación del sistema. Otro de los fenómenos que se presenta, es el de lubricación hidrostática que consiste en la introducción presurizada (110 Kg./cm²) del aceite mediante una bomba, la cual es la denominada "levanta eje". Los cojinetes Nº 1 al 6 son los preparados para este tipo de lubricación mediante orificio de entrada practicado en la mitad inferior de los mismos. Este mecanismo se utiliza sólo en fase de arranque o regimenes de baja velocidad (eje virando).

Sistema de aceite

El sistema de aceite consta de dos subsistemas principales, ellos son:

- el subsistema de lubricación de los cojinetes
- el subsistema de regulación

Circuito de lubricación de los cojinetes

El aceite (YPF 32) es aspirado del depósito por la bomba principal de aceite (mecánica), la cual es una bomba helicoidal marca IMO. Consta de un tornillo motriz y dos tornillos laterales. Ésta impulsa al aceite hacia los sistemas de regulación y de lubricación de los cojinetes, el sistema regulación presenta dos válvulas de desbordamiento de paso recto que regulan la presión del aceite a 10 Kg./cm², y el sistema de lubricación presenta dos válvulas de desbordamiento de paso doblado que regulan la presión de aceite a 1,5 Kg./cm². En estas válvulas se trabaja con el sobrante que desbordo en las dos primeras válvulas y el sobrante de ellas vuelve al depósito.

A una presión de aceite de 1,5 Kg./cm², éste se dirige hacia los cojinetes Nº 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8, previo paso por los refrigerantes de aceite (son 3 intercambiadores de calor de superficie de casco y tubos dispuestos verticalmente cuyo fluido de refrigeración es agua de mar) y luego por el filtro de aceite de los cojinetes (Fig. 25).



dispositivo

Figura 25. Filtros y refrigerantes de aceite.

Como un
de

seguridad, si la diferencia de presión a la entrada y la salida fuera superior a 1,5 Kg./cm², el sistema cuenta con una válvula de desbordamiento de paso recto que abre y hace circular al aceite hacia los filtros de aceite de los cojinetes (sin pasar por los refrigeradores de aceite).

Luego de lubricar los cojinetes retorna al depósito de aceite, el cual está destinado a eliminar la espuma del aceite que retorna del sistema de regulación y de los cojinetes, a desgasificarlo, a la decantación del lodo y de las impurezas que contenga y que arrastró en el trayecto, para ello la máquina cuenta con un exhaustor de los vapores de aceite (motor de CA) y con una bomba centrífuga de aceite (motor de CA) cuya función es la de separar el agua del aceite. Una vez en el depósito de aceite, el mismo comienza el circuito nuevamente.

Circuito de regulación

Como se ha dicho, el aceite es aspirado del depósito por la bomba principal antes mencionada, éste se encuentra gobernado por dos válvulas de desbordamiento de paso recto que regulan la presión del aceite a 10 Kg./cm² para regular el caudal de admisión de vapor en la turbina.

De esta manera, luego del pasaje por el sistema de regulación, el aceite retorna al depósito de para comenzar el ciclo nuevamente.

Por seguridad, en el caso en que la bomba principal de aceite llegara a fallar o le faltara presión, el sistema cuenta con tres bombas auxiliares: una bomba auxiliar de aceite de CA de 10 Kg./cm², para regulación y lubricación una bomba auxiliar para aceite de lubricación de CA de 1,5 Kg./cm² de CA, a su vez de caerse la línea o si no hay servicio interno, también cuenta con una bomba de aceite de emergencia de CC de 1,5 Kg./cm², ya que sólo haría falta la lubricación de los cojinetes.

En el arranque de la máquina, el sistema cuenta con una bomba levanta eje de 110 Kg./cm², la cual tiene la función de generar la cuña de aceite (estado hidrostático), cuando la turbina entra en régimen, la misma corta su funcionamiento.

Del mismo modo, el sistema de lubricación de los cojinetes cuenta con una válvula antes del virador que abre en el momento de virar para lubricar los elementos de máquina de éste.

Ciclo termodinámico

El ciclo termodinámico al cual obedecen las dos turbinas de vapor instaladas en la Central, es el ciclo de Rankine como base, correctamente denominado ciclo de Hirn por ser de carácter regenerativo; está conformado por cuatro extracciones. El fluido de trabajo es agua destilada, la cual es producida en planta.

Circuito cerrado de agua

Se hará una descripción cualitativa del circuito cerrado del fluido de trabajo (Fig. 26), teniendo en cuenta todos los equipos involucrados en forma directa e indirecta.

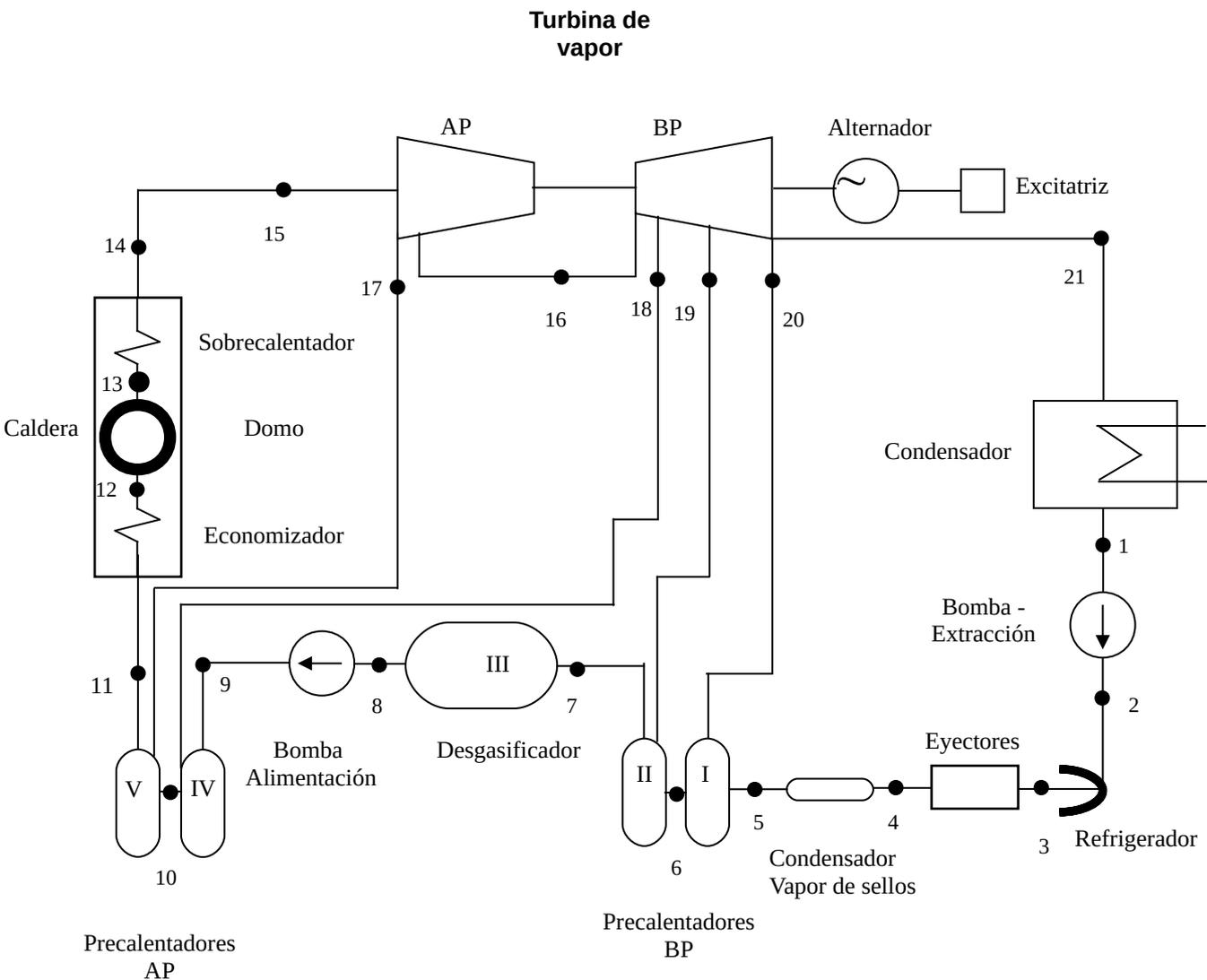


Figura 26. Esquema del circuito cerrado del fluido de trabajo

Como punto de partida tomamos el condensado a la salida del condensador. El fluido en estado líquido ingresa (1) a la bomba de extracción (Fig. 27), la cual tiene la misión de elevar la presión. El mismo egresa (2) para iniciar el trayecto hacia la caldera. A lo largo de este recorrido pasa por diversos equipos auxiliares que restituyen las características y elevan la presión y temperatura del mismo.

De la bomba de extracción pasa por un horizontal de superficie (3) el cual posee un y se lo denominado refrigerador. Este tiene enfriar el condensado, proveniente del de BP I, que tiene como destino el Esta energía liberada es aprovechada para caudal de agua provisto por la bomba antes



intercambiador doble propósito como objeto precalentador condensador. calentar el mencionada.

Figura 27. Bomba de extracción

Del refrigerador pasa por dos eyectores de servicio (Fig. 28), dispuestos en paralelo. Dichos eyectores tienen como función extraer los gases no condensables albergados en el interior del condensador, contribuyendo de esta forma con el vacío. Básicamente es un sistema de toberas convergentes – divergentes por donde circula vapor vivo, proveniente del colector, a gran velocidad. Como consecuencia de esto se genera una zona de depresión a la salida de la tobera derivando en el arrastre de dichos gases. El fluido de arrastre es recirculado al condensador. Previamente se aprovecha su energía calórica para ceder calor al condensado mediante dos intercambiadores (4) asociados a cada eyector.



Figura 28. Eyectores de servicio y arranque

El recorrido continúa condensador de vapor de sellos (29), en el cual se condensa el egressa de los sellos la turbina; y se aprovecha el para elevar la temperatura al Este equipo es un de calor horizontal de aislamiento térmico.



por el sellos (5) (Fig. vapor que laberínticos de calor cedido agua del ciclo. intercambiador superficie, con

Figura 29. Condensador de vapor de sellos

Luego se dirige hacia los precalentadores de baja presión (Fig. 30), pasando primero por el precalentador BP I (6) y luego por el BP II (7). Estos intercambiadores verticales de superficie intercambian, con el agua del ciclo, el calor proveniente de la cuarta (20) y la tercer extracción (19) respectivamente, las cuales surgen de las gradas 17 y 15 del cuerpo BP.



Figura 30. Precalentadores BP y AP

Posteriormente el desgasificador (Fig. 31) un intercambiador de propósito principal es gases no condensables, oxígeno presente en el Para esto se utiliza una química denominada que reacciona con el liberando el exceso oxígeno éste. El condensado es hacia su interior por medio llamada Stork. Allí se parte del vapor vivo del la segunda extracción la grada 12 (18) del cuerpo



circula hacia (8), el cual es mezcla. El extraer los sobretodo el condensado. sustancia hidracina la condensado presente en atomizado de una válvula mezcla con proveniente que surgen de BP.

Figura 31. Desgasificador

Siguiendo el recorrido, el condensado ingresa a las bombas de alimentación (Fig. 32) (9). Por las mismas se confiere una muy alta presión al condensado, característica esencial para el ingreso del mismo a la caldera.



Figura 32. Bombas de alimentación

A continuación pasa por los precalentadores de alta presión, del tipo vertical de superficie, pasando primero por el AP IV (10) y luego por el AP V (11). Éstos intercambian el calor proveniente de la segunda (18) y primer extracción (17) respectivamente, las cuales surgen de las gradas 12 del cuerpo BP y la grada 10 del cuerpo AP.

Posteriormente ingresa a la caldera (Fig. 33), la cual tiene una capacidad de producción de vapor de 130 toneladas por hora, donde circula hacia el domo pasando previamente por el economizador (12). En éste se eleva la temperatura del condensado mediante la utilización de los gases de escape. Una vez en el domo, desciende por tubos denominados portadores y regresa al mismo en estado de vapor húmedo por los tubos hervidores (13). Dichos tubos reciben el calor de los gases producidos en la combustión. El vapor húmedo egresa del domo, pasando a través de un sistema ciclónico, para así dirigirse a los sobrecalentadores primario y secundario (14). En estos se transforma en vapor sobrecalentado llegando a la temperatura de 500 ° C, para dirigirse hacia la turbina.



Figura 33. Cuerpo superior de caldera

El mismo es transportado a través de cañerías aisladas térmicamente hacia la turbina (15), ingresando a ésta a través de las válvulas de admisión, con una presión de 80 Kg./cm² a 495 ° C. La expansión se lleva a cabo primero en la etapa de alta presión (16) resultando al final de la misma 24 Kg./cm² y 366 ° C . Luego se efectúa la expansión en la etapa de baja presión (21). El resultado es la energía cinética de rotación del eje móvil de la turbina.

Últimamente el fluido continúa su recorrido por el condensador (Fig. 34), que es un intercambiador horizontal de superficie en donde ingresa a la carcasa del mismo, como vapor húmedo y pasa a estado líquido. El agente refrigerante es agua de mar impulsada por las bombas de circulación que toman el caudal del canal de entrada. La misma atraviesa, en dos números de pasos, una cantidad de 3650 tubos para finalizar nuevamente en el mar circulando por el canal de salida. La carcasa del condensador está sometida a presión negativa. Esta situación de vacío se logra mediante el eyector de arranque, durante esa etapa. Durante el régimen normal de funcionamiento el vacío se logra por la acción conjunta de los eyectores de servicio que extraen los gases no condensables, y por la brusca reducción del volumen específico propio de la condensación del vapor húmedo.



Figura 34. Condensador

Análisis de la influencia de las extracciones

Para el análisis propuesto, se comenzará por realizar la descripción del ciclo termodinámico de Carnot para el vapor de agua, el cual está compuesto de cuatro procesos (reversibles o irreversibles):

- Compresión adiabática 1 – 2
- Expansión isotérmica 2 – 3
- Expansión adiabática 3 – 4
- Compresión isotérmica 4 – 1

Dicho ciclo se representa en el plano T – S (ciclo 1-2-3-4-1), junto a un ciclo de Rankine simple (ciclo a-2-3-4-a), operando entre las mismas temperaturas extremas (Fig. 35).

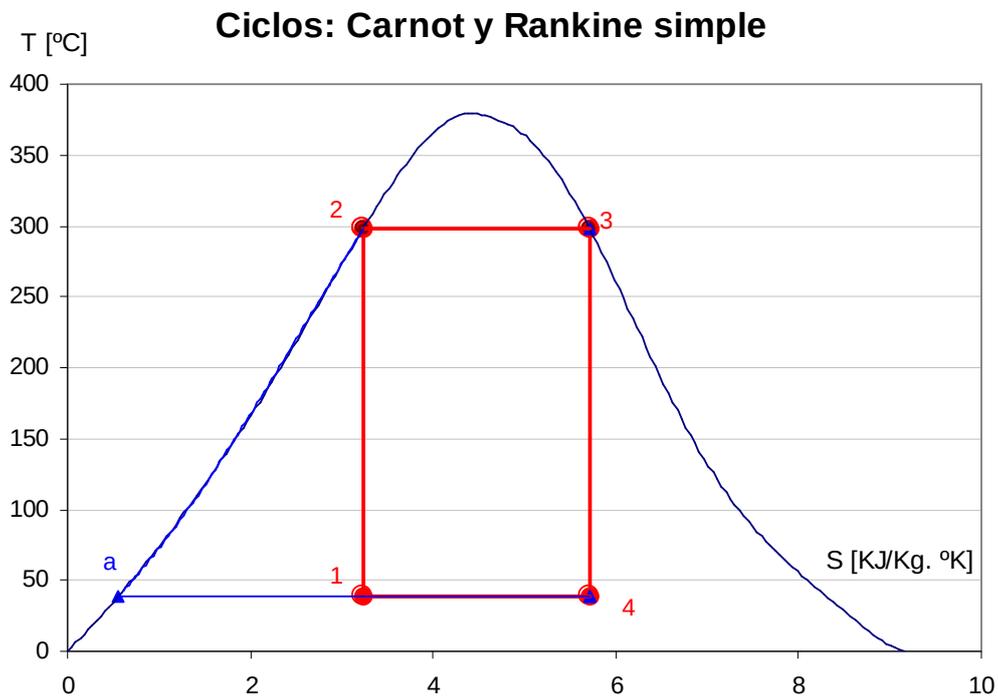


Figura 35. Ciclo de Carnot reversible y de Rankine simple para vapor de agua.

El ciclo de Carnot ha sido presentado ya que es necesario para la demostración del aumento de rendimiento térmico del ciclo de Rankine regenerativo respecto al simple. El ciclo de Hirn de cuatro extracciones con el que se opera en la Central 9 de Julio se puede descomponer en ciclos elementales de Carnot (reversibles o irreversibles), trazando una serie de adiabáticas próximas y cerrando dichos ciclos elementales con isotermas trazadas por el punto medio del segmento de curva del ciclo inicial, representado en el plano P - V (Fig. 36).

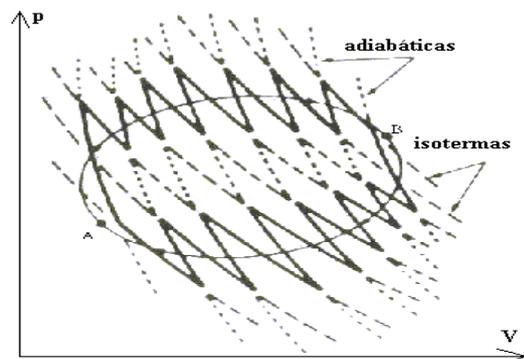


Figura 36. Descomposición de un ciclo en ciclos elementales de Carnot

Para dicho ciclo irreversible, se verifica la siguiente desigualdad:

$$\oint \frac{dQ}{T} \leq 0$$

Esta es conocida como *Desigualdad de Clausius*, correspondiendo la igualdad a todo ciclo reversible y la desigualdad propuesta a todo irreversible.

Demostración

Por lo expuesto anteriormente conocemos la existencia de una diferencia entre los rendimientos correspondientes entre los ciclos de Rankine simple y regenerativo, la cual se demostrara. Para ello se aproximan sendos ciclos de Rankine al ciclo de Carnot, obteniéndose la diferencia de rendimiento entre un ciclo de Carnot único para el ciclo de Rankine simple y la suma de los ciclos de Carnot aproximados de cada extracción para el ciclo de Rankine regenerativo.

Se hará el cálculo para el lado izquierdo del diagrama entrópico (circulación hacia caldera), ya que sobre éste se visualiza en mayor grado la diferencia de rendimientos, pero cabe aclarar que de igual forma ocurre sobre la expansión del vapor en la turbina.

Los dos ciclos a estudiar se proyectan en diagrama T – S (Fig. 37), donde la superficie proporcional al trabajo queda establecida de acuerdo a la siguiente identificación:

Ciclo aproximado de Carnot del ciclo Rankine simple:

- ciclo 1-a-a'-2-1

Ciclo aproximado de Carnot del ciclo Rankine con cuatro extracciones:

- ciclo V-i-j-2-V → primer extracción
- ciclo V-g-h-V-IV → segunda extracción
- ciclo II-e-f-IV-II → tercer extracción
- ciclo I-c-d-II-I → cuarta extracción
- ciclo 1-a-b-l-1 → condensador

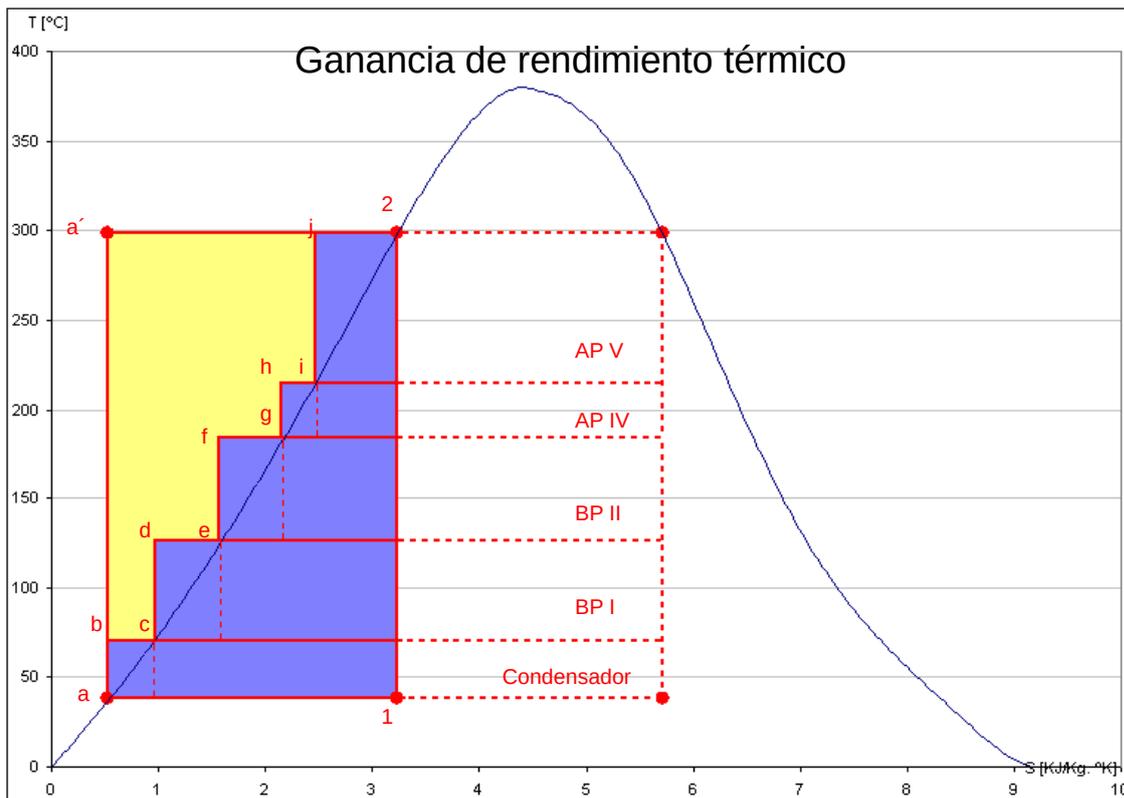


Figura 37. Ganancia de rendimiento térmico debida a la regeneración.

El trabajo útil perdido es proporcional al área que queda a la izquierda de la curva de líquido saturado. Se aprecia rápidamente que dicho área es mayor en el caso del ciclo simple que la del regenerativo, la cual esta compuesta por la suma de las correspondientes a cada uno de los sub-ciclos que lo componen.

Esta apreciación será respaldada cuantitativamente. Para ello se calcularán los trabajos netos y los rendimientos de ambos ciclos aproximados de Carnot, de acuerdo con los parámetros medidos en planta, comenzando por el ciclo de Rankine simple siguiendo por el regenerativo.

El trabajo útil se define como la diferencia entre en calor de entrada y el de salida según la siguiente expresión:

$$\tau = Q_e - Q_s$$

Rankine sin extracciones

- Calor de entrada

$$Q_e = T_H \times \Delta S^{1-a} = 571,76^\circ K \times \left(0,7743 \frac{Kcal}{Kg.\circ K} - 0,1315 \frac{Kcal}{Kg.\circ K} \right)$$

$$Q_e = 571,76^\circ K \times 0,6428 \frac{Kcal}{Kg.\circ K} = 367,53 \frac{Kcal}{Kg.}$$

- Calor de salida

$$Q_s = T_{C_o} \times \Delta S^{1-a} = 311,55^\circ K \times 0,6428 \frac{Kcal}{Kg.\circ K}$$

$$Q_s = 200,26 \frac{Kcal}{Kg.}$$

- Trabajo útil

$$\tau = 367,53 \frac{Kcal}{Kg.} - 200,26 \frac{Kcal}{Kg.} = 167,266 \frac{Kcal}{Kg.\circ K}$$

- Rendimiento

$$\eta = \frac{\tau}{Q_e} = \frac{167,266 Kcal/ Kg.}{367,53 Kcal/ Kg.} = 0,455$$

$$\boxed{\eta_{\%} = 45,50\%}$$

Rankine con extracciones

Extracción AP V → ciclo V-i-j-2-V

- Calor de entrada

$$Q_e^{APV} = T_H \times \Delta S^{1-i} = 571,76^\circ K \times \left(0,7743 \frac{Kcal}{Kg.\circ K} - 0,61 \frac{Kcal}{Kg.\circ K} \right)$$

$$Q_e^{APV} = 571,76^\circ K \times 0,1643 \frac{Kcal}{Kg.\circ K} = 93,94 \frac{Kcal}{Kg.}$$

- Calor de salida

$$Q_s^{APV} = T_{APV} \times \Delta S^{1-i} = 496,05^\circ K \times 0,1643 \frac{Kcal}{Kg.\circ K}$$

$$Q_s^{APV} = 81,5 \frac{Kcal}{Kg.}$$

- Trabajo útil

$$\tau^{APV} = 93,94 \frac{Kcal}{Kg.} - 81,5 \frac{Kcal}{Kg.} = 12,44 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}K}$$

- Rendimiento del ciclo - AP V

$$\eta^{APV} = \frac{\tau}{Q_e} = \frac{12,44 \text{ Kcal/ Kg.}}{93,94 \text{ Kcal/ Kg.}} = 0,1324$$

$$\eta_{\%}^{APV} = 13,24\%$$

Extracción AP IV → ciclo IV-g-h-V-IV

- Calor de entrada

$$Q_e^{APIV} = T_{APV} \times \Delta S^{1-g} = 496,05^{\circ}K \times \left(0,7743 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}K} - 0,52 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}K} \right)$$

$$Q_e^{APIV} = 496,05^{\circ}K \times 0,2543 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}K} = 126,1455 \frac{Kcal}{Kg.}$$

- Calor de salida

$$Q_s^{APIV} = T_{APIV} \times \Delta S^{1-g} = 456,75^{\circ}K \times 0,2543 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}K} = 116,15 \frac{Kcal}{Kg.}$$

- Trabajo útil

$$\tau = 126,1455 \frac{Kcal}{Kg.} - 116,15 \frac{Kcal}{Kg.} = 6,994 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}K}$$

- Rendimiento del ciclo - AP IV

$$\eta^{APIV} = \frac{\tau^{APIV}}{Q_e^{APIV}} = \frac{6,994 \text{ Kcal/ Kg.}}{126,1455 \text{ Kcal/ Kg.}} = 0,055$$

$$\eta_{\%}^{APIV} = 5,5\%$$

Extracción BP II → ciclo II-e-f-IV-II

- Calor de entrada

$$Q_e^{BP^{II}} = T_{AP^{IV}} \times \Delta S^{1-e} = 456,75^\circ K \times \left(0,7743 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ} K} - 0,388 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ} K} \right)$$

$$Q_e^{BP^{II}} = 456,75^\circ K \times 0,3863 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ} K} = 176,4425 \frac{Kcal}{Kg.}$$

- Calor de salida

$$Q_s^{BP^{II}} = T_{BP^{II}} \times \Delta S^{1-e} = 402,24^\circ K \times 0,3863 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ} K} = 155,3853 \frac{Kcal}{Kg.}$$

- Trabajo útil

$$\tau^{BP^{II}} = 176,4425 \frac{Kcal}{Kg.} - 155,3853 \frac{Kcal}{Kg.} = 21,0572 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ} K}$$

- Rendimiento del ciclo - BP II

$$\eta^{BP^{II}} = \frac{\tau^{BP^{II}}}{Q_e^{BP^{II}}} = \frac{21,0572 \text{ Kcal/ Kg.}}{176,4425 \text{ Kcal/ Kg.}} = 0,1193$$

$$\eta_{\%}^{BP^{II}} = 11,93\%$$

Extracción BP I → I-c-d-II-I

- Calor de entrada

$$Q_e^{BP^I} = T_{BP^{II}} \times \Delta S^{1-c} = 402,24^\circ K \times \left(0,7743 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ} K} - 0,2365 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ} K} \right)$$

$$Q_e^{BP^I} = 496,05^\circ K \times 0,5378 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ} K} = 216,3247 \frac{Kcal}{Kg.}$$

- Calor de salida

$$Q_s^{BP^I} = T_{BP^I} \times \Delta S^{1-c} = 346,05^\circ K \times 0,5378 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ} K} = 186,1057 \frac{Kcal}{Kg.}$$

- Trabajo útil

$$\tau^{BP^I} = 216,3247 \frac{Kcal}{Kg.} - 186,1057 \frac{Kcal}{Kg.} = 30,219 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ} K}$$

- Rendimiento del ciclo - BP I

$$\eta^{BP^I} = \frac{\tau^{BP^I}}{Q_e^{BP^I}} = \frac{30,219 \text{ Kcal/ Kg.}}{216,3247 \text{ Kcal/ Kg.}} = 0,1397$$

$$\eta_{\%}^{BP^I} = 13,97\%$$

Condensador → ciclo 1-a-b-I-1

- Calor de entrada

$$Q_e^{C_o} = T_{BP^I} \times \Delta S^{1-a} = 346,05^\circ K \times \left(0,7743 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}K} - 0,1315 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}K} \right)$$

$$Q_e^{C_o} = 346,05^\circ K \times 0,6428 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}K} = 222,441 \frac{Kcal}{Kg.}$$

- Calor de salida

$$Q_s^{C_o} = T_{C_o} \times \Delta S^{1-a} = 311,55^\circ K \times 0,6428 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}K} = 200,26 \frac{Kcal}{Kg.}$$

- Trabajo útil

$$\tau^{C_o} = 222,441 \frac{Kcal}{Kg.} - 200,26 \frac{Kcal}{Kg.} = 22,176 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}K}$$

- Rendimiento del ciclo - condensador

$$\eta^{C_o} = \frac{\tau^{BP^I}}{Q_e^{BP^I}} = \frac{22,176 \text{ Kcal/ Kg.}}{222,441 \text{ Kcal/ Kg.}} = 0,099 \quad \boxed{\eta_{\%}^{C_o} = 9,9\%}$$

El trabajo útil total es la suma de los trabajos hechos en cada una de las extracciones, por lo tanto se obtiene:

$$\tau^T = \sum_{i=1}^5 \tau^i = \tau^{AP^V} + \tau^{AP^{IV}} + \tau^{BP^{II}} + \tau^{BP^I} + \tau^{C_o}$$

$$\tau^T = 12,44 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}K} + 6,994 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}K} + 21,0572 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}K} + 30,219 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}K} + 22,176 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}K}$$

$$\tau^T = 92,8862 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}K}$$

El rendimiento total resulta:

$$\eta^T = \sum_{i=1}^5 \eta^i = 0,1324 + 0,055 + 0,1193 + 0,1397 + 0,099 = 0,5454 \quad \boxed{\eta_{\%}^T = 54,54\%}$$

Entonces, la diferencia de trabajo neto entre ambos ciclos es:

$$\Delta \tau = \tau^{s/e} - \tau^{c/e} = 167,266 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}K} - 92,8862 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}K}$$

$$\Delta \tau = 74,38 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}K}$$

La reducción porcentual del trabajo perdido al utilizar las extracciones es:

$$\tau_{p\%} = \frac{(\tau^{s/e} - \tau^{c/e}) \times 100}{\tau^{s/e}} = \frac{\left[74,38 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}K} \times 100 \right]}{167,266 \frac{Kcal}{Kg.^{\circ}K}} = 44,47\%$$

La diferencia de rendimiento entre los ciclos es:

$$\Delta\eta = \eta^{c/e} - \eta^{s/e} = 0,5454 - 0,455 = 0,0904$$

$$\Delta\eta_{\%} = 9,04\%$$

El aumento de rendimiento en el ciclo regenerativo es de:

$$\eta_{g\%} = \frac{(\eta^{c/e} - \eta^{s/e}) \times 100}{\eta^{s/e}} = \frac{[0,0904 \times 100]}{0,455} = 19,87\%$$

Conclusiones

- La suma de los ciclos aproximados de Carnot del ciclo Rankine regenerativo presenta una disminución del trabajo perdido respecto al ciclo de Carnot (ciclo 1aa'21) del 44,47%.
- El rendimiento total del ciclo regenerativo es mayor que el rendimiento del ciclo de Carnot en un 19,87 %.
- De los valores obtenidos se verifica la disminución de irreversibilidad en el ciclo con extracciones.

Cabe aclarar que la cantidad de vapor a extraer presenta un valor límite, gobernado por el trabajo de la turbina. Si se quisiera disminuir al máximo la irreversibilidad de ciclo resultaría nulo el trabajo de expansión.

Régimen de servicio

Una vez reconocido el ciclo termodinámico en forma cualitativa se procede a la recolección de los datos característicos (presión y temperatura), indicados en el instrumental instalado tanto en la planta como en el tablero de mando y los propuestos por el fabricante.

Valores de Planta

Para este fin se recabaron los datos registrados el día 17 de Mayo del 2007 a las 14:00 hs, funcionando el turbogruppo con una carga aproximada de 24,250 MW en bornes del alternador, funcionando la caldera a Fuel-oil y con una temperatura de agua de refrigeración de 14 ° C. Los puntos registrados son homólogos a los designados en el esquema del circuito cerrado del fluido de trabajo. En función de las presiones y temperaturas, se obtienen los valores de entropía y entalpía de cada punto. Los mismos se encuadran en planilla de cálculo (Tabla 5) para con estos trazar el diagrama entrópico del ciclo.

Cabe destacar que las presiones en tabla son absolutas P_a , puesto que así lo requiere dicho diagrama, para esto se corrigieron las presiones manométricas P_r (relativas a la presión atmosférica) según la siguiente fórmula:

$$P_a = P_r + P_{atm} \rightarrow P_{atm} = 1 \text{ Kg./cm}^2$$

La tabla se confecciona según los siguientes campos:

- **Punto** que es el que corresponde al lugar donde se registra la medición.
- **Temperatura** en ° C.
- **Presión absoluta** en Kg./ cm²
- **Entropía** en Kcal./Kg. ° K
- **Entalpía** en Kcal. /Kg.
- **Titulo** según estado.
- **Detalle** del punto en cuestión.

PUNTO	T [°C]	P [Kg./cm ²]	S [Kcal/Kg. °K]	h [Kcal/Kg]	Titulo	DETALLE
1400	1550	136740	1000	Liquido	Ingreso a Bomba	
240	130	136540	2700	Liquido	Egreso de Bomba Extracción	3s/ds/d
				Liquido	Egreso de Refrigerador	4s/ds/d
				Liquido	Egreso de Eyectores	5s/ds/d
				Liquido	Egreso Condensador Vapor de Sellos	61327,50,3953132,5900
				Liquido	Egreso BP I y BP II	71474,90,4325147,9700
				Liquido	Desgasificador	81495,40,4374149,9700
				Liquido	Ingreso Bomba Alimentación	91491140,4347151,5600
				Liquido	Egreso Bomba Alimentación	10185s/d
				Liquido	Egreso Precalentador AP IV	112151120,5866220,6000
				Liquido	Egreso AP V - Ingreso Caldera	1227386,60,7155286,5100
				Liquido	Ingreso Domo	13 i298,6185,90,7743319,40000
				Hervidores	- Inicio evaporación	13 f298,6185,91,3660657,70001
				Hervidores	- Fin evaporación	14502821,6074812,8500
				Vapor	Egreso Caldera - Sobrecalentador secun.	15499791,6100811,9200
				Vapor	Ingreso a Turbina	16366251,6509756,0800
				Vapor	By Pass AP - BP	17366251,6509756,0800
				Vapor	Extracción Vapor - AP V	1829311,11,6854724,8500
				Vapor	Extracción Vapor - AP IV - Desgasificador	192312,61,7961700,0400
				Vapor	Extracción Vapor - BP II	20930,361,8685637,9300
				Vapor	Extracción Vapor - BP I	21410,06901,9832615,3700
				Vapor	Egreso de turbina	22 i38,400,06901,9797614,21001
				Condensador	- Inicio Condensación	22 f38,400,06900,131538,39000
				Condensador	- Fin Condensación	

Tabla 5. Datos de campo

NOTA: los ítems del campo **Punto** son coincidentes tanto al “Esquema del circuito cerrado del fluido de trabajo” como a los detallados en la descripción cualitativa.

Para un mejor entendimiento se define:

Entropía: Es la magnitud física que mide la parte de la energía que no puede utilizarse para producir trabajo. Se la interpreta como la medida de la irreversibilidad de la energía de un sistema y es una función de estado.

Entalpía: Es la cantidad de energía de un sistema termodinámico que este puede intercambiar con su entorno. También es función de estado.

Vapor saturado: Vapor en equilibrio con su líquido.

Líquido saturado: Líquido en equilibrio con su vapor.

Vapor húmedo: Mezcla líquido / vapor saturado.

Título: Es la cantidad de vapor saturado por kilogramo de vapor húmedo, y suele expresarse como porcentaje o fracción decimal. Da una idea de la calidad del vapor húmedo.

Valores de Fábrica

Se construye planilla (Tabla. 6) con los valores característicos propuestos por el fabricante, ESCHER WYSS, para una potencia de 24 MW, funcionando la caldera a gas y con 14 ° C de temperatura de refrigeración. Dicha información se extrae de los manuales (ver Anexo V) y planos del equipo.

En la tabla se incluye un nuevo campo: **Caudal** [Kg. /h].

PUNTOT	[°C]	P	[Kg./cm ² S]	S	[Kcal/Kg. °K]	h	[Kcal/Kg]	Caudal	[kg/h]	Título	DETALLE																																																																
125,20,0930,0883025,230078110	Líquido	Ingreso a Bomba Extracción	225,2130,0882425,500078110	Líquido	Egreso de Bomba Extracción	332,7s/d	78110	Líquido	Egreso de Refrigerador	434,3s/d	78110	Líquido	Egreso de Eyectores	535,4s/d	78110	Líquido	Egreso Condensador Vapor de Sellos	6117,7s/d	78110	Líquido	Egreso BP I y BP II	7147,25,50,433148,120091000	Líquido	Desgasificador	8149,9s/d	91000	Líquido	Ingreso Bomba Alimentación	9149,91140,4368152,480091000	Líquido	Egreso Bomba Alimentación	10169,9s/d	91000	Líquido	Egreso Precalentador AP IV	11199,31090,554204,700091000	Líquido	Egreso AP V - Ingreso Caldera	12s/d87	91000	Líquido	Ingreso Domo	13i298,68860,7745319,5100910000	Hervidores - Inicio evaporación	13	f298,68861,3658657,6700910001	Hervidores - Fin evaporación	14500801,6091812,230091000	Vapor	Egreso Caldera - Sobrecalentador secun.	15495791,607809,400091000	Vapor	Ingreso a Turbina	16321,2317,281,6574735,970085510	Vapor	By Pass AP - BP	17321,2317,281,6574735,970085510	Vapor	Extracción Vapor - AP V	18244,5491,664701,100078110	Vapor	Extracción Vapor - AP IV - Desgasificador	19147,72,21,7271659,800072300	Vapor	Extracción Vapor - BP II	2084,140,571,7305606,5000662400,95160	Extracción Vapor - BP I	2125,370,0331,7891532,9400662400,87032	Egreso de turbina	22	i25,370,0331,7891532,9400662400,87032	Condensador - Inicio Condensación	22	f25,370,0330,088925,3900781100	Condensador - Fin Condensación.

Ç

Dado que los equipos Turbovapor son el tipo caudal variable, este dato es de gran relevancia, para el análisis del funcionamiento en servicio. Esto motiva al cálculo del porcentaje del vapor (Tabla 7) que es extraído en cada extracción.

Caudal requerido para generar 24 MW - Fabricante Caudal [Kg/h] % del total Fracción de expansión
 91000 - Total 10015490 - 1º
 ext. 6,030,9407400 - 2º ext. 8,130,8585810 - 3º ext. 6,380,7956060 - 4º
 ext. 6,660,728

Tabla 7. Caudal de vapor

Nota: se anexan todas las planillas de cálculos (ver Anexo VI)

Diagrama Entrópico

Con los datos obtenidos se construye el diagrama entrópico (Fig. 38) correspondiente a la situación actual y a la propuesta por el fabricante. Destacamos que en el manual se propone el balance térmico para distintos estados de carga, pero se elige el de 24 MW para que el estudio funcionamiento sea del carácter comparable.

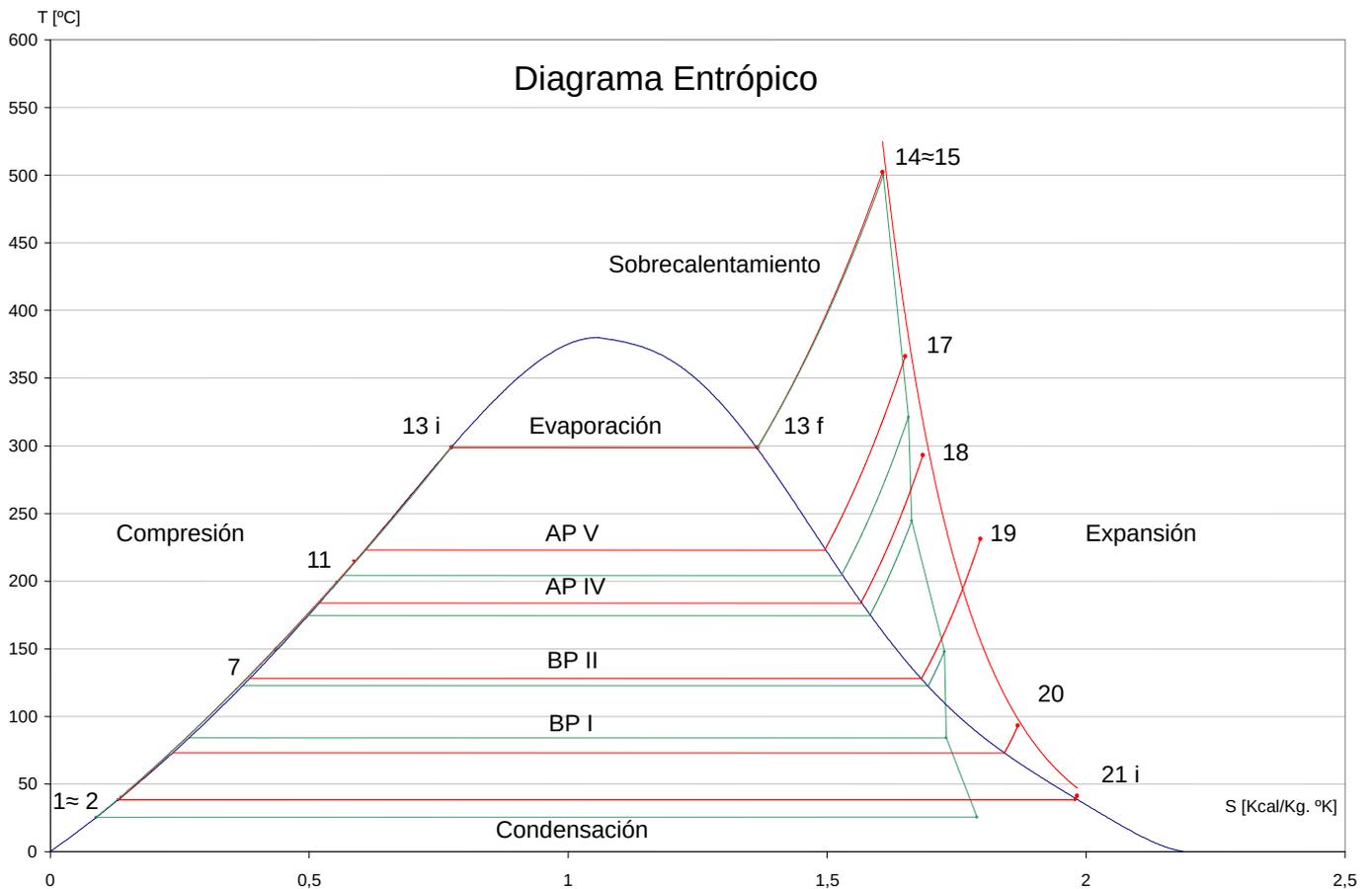


Figura 38. Diagrama entrópico

Cálculos termodinámicos

Se enuncia al rendimiento térmico del ciclo de Rankine como el cociente entre el trabajo neto desarrollado y el calor cedido. El mismo queda cuantificado según la siguiente expresión:

$$\eta_{ter} = \frac{L_N}{Q_c} = \frac{L_T - L_B}{Q_c} = \frac{\text{Trabajo neto desarrollado}}{\text{Calor cedido}}$$

$$L_T = h_e - h_s \rightarrow \text{trabajo desarrollado en la turbina}$$

$$L_b = - \int_e^s v \times dp = v_s \times (p_e - p_s) \rightarrow \text{trabajo de bombeo}$$

$$Q_c = h_s - h_e \rightarrow \text{calor cedido al agua}$$

Referencia:

- e: entrada
- s: salida

En el trabajo de bombeo se simplifica la integral dado que se considera al fluido incompresible, situación teórica aceptable.

Análisis del balance térmico de origen

Calculo del rendimiento térmico

Se procede por calcular el trabajo desarrollado por la turbina y el calor cedido al fluido. Como primera aproximación se desprecia el trabajo de bombeo, puesto que es de influencia relativamente baja. Tampoco se tienen en cuenta las extracciones de vapor.

Resultados:

- $L_T = h_{15} - h_{21} = 809,4 \text{Kcal / Kg} - 532,94 \text{Kcal / Kg} = 276,46 \text{Kcal / Kg}$
- $L_b = 0$
- $Q_c = h_{14} - h_2 = 812,23 \text{Kcal / Kg} - 25,50 \text{Kcal / Kg} = 786,73 \text{Kcal / Kg}$

Con estos se deriva en el rendimiento térmico sin extracciones.

$$\eta_{ter\ s/e\ \%} = \frac{L_T}{Q_c} = \frac{276,46 \text{Kcal / Kg}}{786,73 \text{Kcal / Kg}} \times 100 = 35,14\%$$

De la misma forma pero teniendo en cuentas las extracciones de vapor resulta:

- $L_T = (h_{15} - h_{17}) + (h_{17} - h_{18}) \times X_{1^{\circ}ex} + (h_{18} - h_{19}) \times X_{2^{\circ}ex} + (h_{19} - h_{20}) \times X_{3^{\circ}ex} + (h_{20} - h_{21}) \times X_{4^{\circ}ex} =$
 $= (809,4 - 735,9) \text{Kcal / Kg} + (735,97 - 701,1) \text{Kcal / Kg} \times 0,94 + (701,1 - 659,80) \text{Kcal / Kg} \times 0,858 +$
 $+ (659,8 - 606,5) \text{Kcal / Kg} \times 0,795 + (606,5 - 532,94) \text{Kcal / Kg} \times 0,728 =$
 $= 237,54 \text{Kcal / Kg}$
- $L_b = 0$
- $Q_c = h_{14} - h_{11} = 812,23 \text{Kcal / Kg} - 204,7 \text{Kcal / Kg} = 607,53 \text{Kcal / Kg}$

Como producto final se obtiene el rendimiento térmico con extracciones de vapor.

$$\eta_{ter\ c/e\ \%} = \frac{237,54 \text{Kcal / Kg}}{607,53 \text{Kcal / Kg}} \times 100 = 39,10\%$$

Si comparamos ambos rendimientos se aprecia que el rendimiento del ciclo con las pertinentes extracciones de vapor es mayor que sin ellas.

$$\text{Incremento} = \eta_{\text{ter c/e \%}} - \eta_{\text{ter s/e \%}} = 3,96\%$$

Este incremento representa un ganancia en el ciclo a nivel porcentual deriva en el siguiente valor.

$$\text{Porcentaje del aumento} = \frac{\eta_{\text{ter c/e \%}} - \eta_{\text{ter s/e \%}}}{\eta_{\text{ter s/e \%}}} \times 100 = 11,27\%$$

Con el fin de lograr resultados con mayor precisión se calculan la potencia desarrollada en turbina, la de bombeo y la aportada por la caldera. Por el mismo motivo se tiene en cuenta las extracciones de vapor. Aquí entra en juego la variable caudal. Se utiliza el factor de conversión calorías-watt hora.

$$N_T [KW] = \dot{m}_v [Kg / h] \times L_T [Kcal / Kg] = \frac{91.000 Kg / h \times 237,54 Kcal / Kg}{860 Kcal / KWh} = 25134,9 KW \cong 25,14 MW$$

$$N_B [KW] = 1395,1 KW$$

$$Q_c [KW] = \dot{m}_v [Kg / h] \times Q_c [Kcal / Kg] = \frac{91.000 Kg / h \times 607,53 Kcal / Kg}{860 Kcal / KWh} = 64285,2 KW \cong 64,3 MW$$

De éstos se desprende el rendimiento térmico el propuesto por el fabricante:

$$\eta_{\text{ter \%}} = \frac{N_T - N_B}{Q_c} \times 100 = \frac{25,14 MW - 1,39 MW}{64,3 MW} = 36,92\%$$

También se calcula la relación potencia eléctrica generada en función de la mecánica desarrollada por la turbina, que representa el rendimiento del alternador.

$$\eta_{\text{alt \%}} = \frac{N_E}{N_T} \times 100 = \frac{24,15 MW}{25,14 MW} = 96,08\%$$

Rendimiento de la instalación

$$\eta_{\text{inst \%}} = \eta_{\text{ter}} \times \eta_{\text{alt}} \times 100 = 0,3692 \times 0,9608 \times 100 = 35,48\%$$

Análisis del balance térmico actual

Como punto de partida de procede de similar manera que lo antes expuesto, resultando:

- $L_T = h_{15} - h_{21} = 811,92 Kcal / Kg - 615,37 Kcal / Kg = 196,55 Kcal / Kg$
- $L_b = 0$
- $Q_c = h_{14} - h_2 = 812,85 Kcal / Kg - 40,27 Kcal / Kg = 772,58 Kcal / Kg$

Se desprende el siguiente rendimiento térmico:

$$\eta_{ter\ s/e\ \%} = \frac{L_T}{Q_c} = \frac{196,55\text{Kcal / Kg}}{772,58\text{Kcal / Kg}} \times 100 = 25,44\%$$

Teniendo en cuenta las extracciones resulta:

- $$L_T = (h_{15} - h_{17}) + (h_{17} - h_{18}) \times X_{1^{ex}} + (h_{18} - h_{19}) \times X_{2^{ex}} + (h_{19} - h_{20}) \times X_{3^{ex}} + (h_{20} - h_{21}) \times X_{4^{ex}} =$$

$$= (811,92 - 756,08)\text{Kcal / Kg} + (756,08 - 724,85)\text{Kcal / Kg} \times 0,94 + (724,85 - 700,04)\text{Kcal / Kg} \times 0,8$$

$$+ (700,04 - 637,93)\text{Kcal / Kg} \times 0,795 + (637,93 - 615,37)\text{Kcal / Kg} \times 0,728 =$$

$$= 172,25\text{Kcal / Kg}$$
- $L_b = 0$
- $Q_c = h_{14} - h_{11} = 812,85\text{Kcal / Kg} - 220,6\text{Kcal / Kg} = 592,25\text{Kcal / Kg}$

Como producto final se obtiene el rendimiento térmico con extracciones de vapor.

$$\eta_{ter\ c/e\ \%} = \frac{172,25\text{Kcal / Kg}}{592,25\text{Kcal / Kg}} \times 100 = 29,08\%$$

Ganancias en el rendimiento

Si comparamos los rendimientos se aprecia que el rendimiento del ciclo con las pertinentes extracciones de vapor es mayor que sin ellas.

$$\text{Incremento} = \eta_{ter\ c/e\ \%} - \eta_{ter\ s/e\ \%} = 3,64\%$$

Este incremento representa un ganancia en el ciclo a nivel porcentual deriva en el siguiente valor.

$$\text{Porcentaje del aumento} = \frac{\eta_{ter\ c/e\ \%} - \eta_{ter\ s/e\ \%}}{\eta_{ter\ s/e\ \%}} \times 100 = 14,32\%$$

Para el cálculo de las potencias desarrolladas se deben tener en cuenta ciertas hipótesis. La causa fundamental de esto radica en que los caudalímetros instalados en planta arrojan valores sólo referenciales de los cuales no resulta conveniente fiarse para ejecutar los cálculos.

Hipótesis utilizadas:

1. *Disminución relativamente pequeña del rendimiento eléctrico.*
2. *Igualdad de porcentaje de extracción de vapor, en función del caudal total que ingresa a caldera, con respecto a las propuestas por el fabricante.*
3. *Potencia de bombeo correspondiente al consumo interno*
4. *Igualdad entre caudal generado en caldera y caudal de trabajo en turbina.*

El rendimiento de los turbogeneradores de pequeña y mediana potencia se encuentra entre 94 % y 98 %. Para máquinas de 225 MW y superiores, pueden alcanzarse rendimientos de hasta 99 %. Encuadrando al alternador dentro del grupo perteneciente a pequeñas potencias aceptamos un valor de rendimiento del 95 % levemente inferior al propuesto por el fabricante. Se desprende así que la turbina de vapor debe desarrollar la siguiente potencia mecánica.

$$N_T = \frac{N_E}{\eta_{elec}} = \frac{24250KW}{0,95} = 25526,3KW$$

De acuerdo a la segunda hipótesis se obtiene el caudal de vapor, y el correspondiente a cada extracción (Tabla 8), necesario para desarrollar dicho valor de potencia mecánica.

$$\dot{m}_v = \frac{N_T}{L_T} = \frac{25526,3KW \times 860Kcal / KWh}{172,25Kcal / Kg} = 127446Kg / h$$

Caudal requerido para
generar 24,250 MW -
ActualCaudal%127446 -
Total100,0007689- 1º
ext.6,03310364- 2º
ext.8,1328137- 3º
ext.6,3858487- 4º ext.6,659

Tabla 8. Caudal de vapor

Con respecto a la potencia de bombeo, se debe aclarar que ésta engloba no solo el consumo eléctrico de las bombas en si mismas, sino que también se debe tener en cuenta que una fracción de lo que se genera también es utilizada por motores varios, iluminación, válvulas y otros. Para cuantificar esta potencia, se toma como base un consumo promedio de servicios interno cercano al 5,5 % de la potencia bruta generada. Dicho valor se desprende de medidor interno.

$$N_B = fraccion\ decimal \times N_T = 0,055 \times 24250KW = 1333,75KW$$

La potencia desarrollada por la caldera resulta:

$$Q_C [KW] = \dot{m}_v \times Q_c [Kcal / Kg] = \frac{127446Kg / h \times 592,25Kcal / Kg}{860Kcal / KWh} = 88767,53KW$$

A partir de los valores calculados se obtiene el siguiente rendimiento térmico:

$$\eta_{ter\%} = \frac{N_T - N_B}{Q_C} \times 100 = \frac{25526,3Kw - 1333,75KW}{88767,53KW} = 27,56\%$$

Rendimiento de la instalación

$$\eta_{inst\%} = \eta_{ter} \times \eta_{alt} \times 100 = 0,2756 \times 0,95 \times 100 = 26,19\%$$

Relación de rendimiento original-actual

$$Porcentaje\ de\ reduccion = \frac{\eta_{inst\%} - \eta_{insto\%}}{\eta_{insto\%}} \times 100 = \frac{26,19\% - 35,48\%}{35,48\%} \times 100 = -26,2\%$$

Debemos destacar nuevamente que para generar cierta potencia eléctrica el generador debe recibir un determinado valor de potencia mecánica. Esta relación permanece prácticamente invariante, a través del tiempo, en situaciones normales de funcionamiento. El hecho de que el rendimiento térmico de la instalación sea menor que el planteado por el fabricante trae aparejado como consecuencia que se requiera mayor caudal de vapor para dicha potencia mecánica.

$$\text{Porcentaje del aumento} = \frac{\dot{m}_v - \dot{m}_{v0}}{\dot{m}_{v0}} \times 100 = \frac{127446 \text{Kg/h} - 91000 \text{Kg/h}}{91000 \text{Kg/h}} \times 100 = 40,05\%$$

Planillas de Partes diarios

En estas planillas se reúne toda la información diaria de generación energética, consumos auxiliares y de combustible, de cada una de las máquinas emplazadas en planta. Con esta información se puede calcular el rendimiento de la instalación (Fig. 39) con mayor precisión que lo antes expuesto, dado que al ser menor la cantidad de variables utilizadas para el cálculo se reducen las cantidades de incertidumbres a procesar.

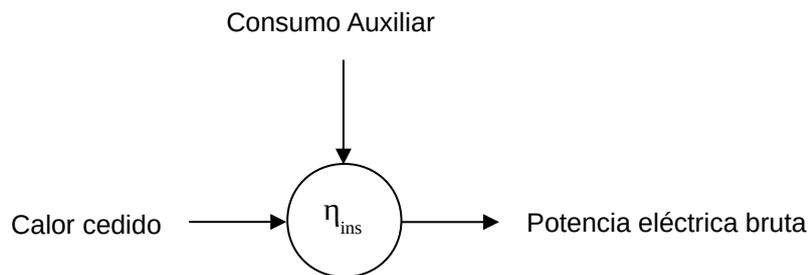


Figura 39. Diagrama en bloque del rendimiento de la instalación.

Con el objeto de hacer el análisis comparable se reúne la información correspondiente al día 17/5.

- $N_E = 24,250 \text{MW}$
- $N_{Aux} = 1,367 \text{MW}$

Poder calorífico del fuel-oil → 9800Kcal/Kg.

- $Q_c [\text{MW}] = P_c [\text{Kcal/Kg}] \times \dot{m}_c [\text{Kg/h}] = \frac{9800 \text{Kcal/Kg} \times 7760 \text{Kg/h}}{860000 \text{Kcal/MWh}} = 88,428 \text{MW}$

Rendimiento de la instalación

$$\eta_{inspd\%} = \frac{24,250 \text{M} - 1,367 \text{MW}}{88,428 \text{MW}} \times 100 = 25,88\%$$

Análisis de errores

$$\text{error}_{\%} = \frac{\eta_{ins\%} - \eta_{instpd\%}}{\eta_{inspd\%}} \times 100 = 1,19\% \rightarrow \text{error en exceso}$$

Comportamiento en función del combustible

Otra de las utilidades que brindan los partes diario es la posibilidad de calcular los rendimientos de la instalación en función del tipo de combustible utilizado, sea gas natural o fuel oil.

Para poder hacer una comparación del rendimiento de la instalación, tenemos en cuenta dos días en los cuales se generó la misma energía bruta pero con distinto combustible.

Funcionamiento a Fuel-oil - 18/05

- $N_E = 24,167 MW$
- $N_{Aux} = 1,371 MW$

Poder calorífico del fuel-oil → 9800Kcal/Kg.

$$Q_c [MW] = P_c [Kcal / Kg] \times \dot{m}_c [Kg / h] = \frac{9800 Kcal / Kg \times 7733,3 Kg / h}{860000 Kcal / MWh} = 88,124 MW$$

Resulta como rendimiento de la instalación:

$$\eta_{insfo\%} = \frac{24,167 M - 1,371 MW}{88,124 MW} \times 100 = 25,87\%$$

Funcionamiento a gas natural – 06/04

- $N_E = 24,167 MW$
- $N_{Aux} = 1,354 MW$

Poder calorífico del gas natural → 8300 Kcal. /m³

$$Q_c [MW] = P_c [Kcal / m^3] \times \dot{m}_c [m^3 / h] = \frac{8300 [Kcal / m^3] \times 8700 [m^3 / h]}{860000 Kcal / MWh} = 83,965 MW$$

Resulta como rendimiento de la instalación:

$$\eta_{ins\%} = \frac{24,167 M - 1,354 MW}{83,965 MW} \times 100 = 27,17\%$$

Análisis de resultados

Se aprecia que el rendimiento de la instalación para la generación, de una cierta cantidad de energía, es mayor cuando la misma se encuentra funcionando a gas que cuando lo hace a fuel-oil. Esto es netamente cierto y se justifica principalmente por el hecho de que cuando se trabaja con fuel oil se destina parte del vapor generado para la atomización del combustible a la caldera y para su calefacción en tanque de estiba. Esta ventaja del funcionamiento a gas se ve limitada por cuestiones de disponibilidad del mismo, dado que en épocas invernales los consumidores primordiales son las instalaciones domiciliarias.

A continuación se detalla el aumento del rendimiento y su respectivo porcentaje cuando el combustible utilizado es gas natural.

$$Aumento = \eta_{gas\%} - \eta_{fuel-oil\%} = 1,3\%$$

$$Porcentaje\ del\ aumento = \frac{\eta_{gas\%} - \eta_{fuel-oil\%}}{\eta_{fuel-oil\%}} \times 100 = 5,03\%$$

Como se dijo con antelación se requiere menor caudal de vapor cuando se trabajó con gas, lo cual queda cuantificado a través de las siguientes ecuaciones:

$$\Delta Q = Q_{gas} - Q_{fuel-oil} = 4,159 MW$$

$$Variación\ porcentual = \frac{Q_{gas\%} - Q_{fuel-oil\%}}{Q_{fuel-oil\%}} \times 100 = -4,719\%$$

El valor de la diferencia de potencia desarrollado por la caldera, en funcionamiento a fuel oil, se traduce en el siguiente caudal de vapor.

$$\dot{m}_v = \frac{\Delta Q [MW]}{Q_c [Kcal / Kg]} = \frac{4,159 MW \times 860000 Kcal / MWh}{172,25 Kcal / Kg} = 6039,1 Kg / h$$

De este se destina aproximadamente 326 Kg./h para atomización, una fracción para calefacción y la diferencia restante puede ser justificada como error propio del cálculo.

Análisis técnico-económico

Hasta aquí todo lo expuesto está basado en rendimientos térmicos de la instalación. Otra de las diferencias fundamentales entre la utilización de los distintos combustibles propuestos radica en los costos de generación.

Para este análisis tomamos como precio del combustible a los valores vigentes a la fecha de confección del informe.

$$Gas = 0,21 \$ / m^3$$

$$Fuel - oil = 1,205 \$ / Kg.$$

La comparación se hace para los parámetros de los días 18/5/07 (Fuel oil) y 06/04/07 (Gas natural) de igual generación de energía.

$$Costo_{gas} [\$ / MWh] = \frac{0,21 \$ / m^3 \times 8700 m^3 / h}{24,167 MW} = 75,6 \$ / MWh$$

$$Costo_{fueloil} [\$ / MWh] = \frac{1,205 \$ / m^3 \times 7733,3 m^3 / h}{24,167 MW} = 385,6 \$ / MWh$$

Podemos apreciar una vez más la conveniencia de la utilización de gas natural como combustible del turbogruppo, al margen del rendimiento térmico. Los costos de generación con el combustible líquidos se quintuplican con respecto al gaseoso. Destacamos nuevamente que la no utilización de este último esta fuertemente ligada a cuestiones de disponibilidad.

Los costos calculados se corresponden a los valores establecidos por CAMME S.A. a la fecha de cálculo.

Discusión

Se reconoce técnicamente que el rendimiento térmico, de grupos de vapor similares a los emplazados en planta, varía entre 30 a 35 %.

De acuerdo a los datos aportados por el fabricante se obtuvo que dicho rendimiento es levemente superior al 35 %. Esto nos da indicios de que el cálculo obtenido es una buena aproximación ya que podemos contemplar al turbogruppo dentro del rango reconocido.

Pero actualmente el TV N° 8, el cual fue estudiado, posee un rendimiento aproximado del 27 % lo cual no puede atribuirse a una perdida de rendimiento por cuestiones de antigüedad.

Esto motivo al análisis de posibles fallas y el dato más representativo es el bajo vacío, prácticamente el doble de lo deseados que es de poco más de una pulgada. Esto indicaría una posible falla en la fuente fría, o sea el condensador. Puede ser que haya una entrada de aire en algún sector que opere con presión menor que la atmosférica. Esta es la teoría más fuerte, respaldada por experiencia, que justifica la gran disminución del rendimiento por lo que se estudiará inundar con agua el condensador en la próxima parada.

Otras de las teorías analizadas fueron la de maniobras incorrectas y la de baja calidad del fluido de trabajo, pero quedaron descartadas rápidamente. La primera debido a que se opera de la misma forma que cuando la maquina funcionaba correctamente y la segundo por los análisis químicos que se hacen para detectar la calidad del agua.

También fueron revisados los eyectores, los cuales son otras de las posibles fuentes d error, pero se comprobó su correcto funcionamiento y estado de las juntas calibradas.

Programación y seguimiento

Introducción teórica

Mediante la técnica de programación (planificación) se trata de ordenar las actividades, de un proyecto, de forma tal que se puedan apreciar las relaciones temporales lógicas entre ellas. Por lo tanto la programación consiste en fijar de modo aproximado, los instantes de inicio y terminación de cada actividad. Algunas pueden tener holguras y otras ser críticas.

La técnica de seguimiento es utilizada para verificar temporalmente el modo en que se están ejecutando las actividades, previamente programadas. Es de gran utilidad para toma de decisiones durante la ejecución del proyecto o bien al finalizar el mismo para hacer una comparación entre la situación estimada y la real.

Ambas técnicas se pueden plasmar en el software Microsoft® Project. Para esto se debe tener noción general de diagramas de Gantt, precedencia y de Red, Camino crítico e hitos.

La programación de un proyecto puede ser tan extensa como se quiera, pero su extensión va de la mano de la cantidad de controladores disponibles para realizar el seguimiento de la misma.

Diagrama de Gantt

Diagrama en el cual se permite visualizar la distribución temporal del proyecto, detallando las fechas de inicio y fin de las actividades que lo componen. Físicamente es un diagrama de barras bidimensional, donde las abscisas obedecen a tiempos y el eje vertical a las actividades.

Hito

Es un evento claramente verificable, el cual no posee duración en el tiempo sino que indica un instante en el mismo. Por ejemplo, instante de inicio de las actividades de mantenimiento.

Diagrama de Red

Red es la herramienta con que se vinculan actividades e hitos con el fin de reflejar sus dependencias.

Diagrama de Precedencias

Por naturaleza hay actividades que deben realizarse antes que otras, o sea, cada actividad condiciona el orden lógico de la secuencia a ejecutarse. Esto engloba el significado de precedencia. Por ejemplo, no se puede retirar el rotor de baja presión sin que se haya retirado la correspondiente tapa.

Camino Crítico

Es la sucesión de actividades (críticas) que da el máximo tiempo acumulativo y el más corto que se puede tardar en realizar el proyecto, si se dispone de todos los recursos.

Diagrama de tiempos con interdependencias.

De la conjunción de estos cinco conceptos se construyen diagramas de tiempos con interdependencias mediante la asistencia de software antes mencionado. Siendo el camino crítico el elemento de presión para la ejecución a tiempo del proyecto, sin descuidar los caminos con holguras puesto que pueden transformarse en críticos retrasando el proyecto más de lo pensado.

Los pasos básicos para la construcción del diagrama son los siguientes:

- 1- Listar todas las tareas.
- 2- Estimar duración de cada tarea y secuencia lógica.
- 3- Indicar hitos

Por último el software se encarga de graficar y realizar cálculos pertinentes.

Cálculo de camino crítico

A pesar que el cálculo lo realiza el programa de computadora, es de utilidad conocer sus cimientos.

Actividades	Duración
A	5 días
B	4 días
C	3 días
D	4 días
E	2 días
F	2 días
G	1 días

Proyecto compuesto por ocho actividades hipotéticas (Tabla 9). Llegado al paso 3, o sea finalizadas las actividades A y B se puede proceder con el inicio de las C y D. Dado que D es de duración mayor a C, se presenta holgura entre finalización de C y comienzo de F que es posterior a la secuencia D-E. En este ejemplo se aprecia que el camino crítico (Fig. 40) esta dado por la secuencia A-B-D-E-F-G, pues que no presenta holgura. La duración estimada de este proyecto es de 18 días.

Tabla 9. Actividades hipotéticas

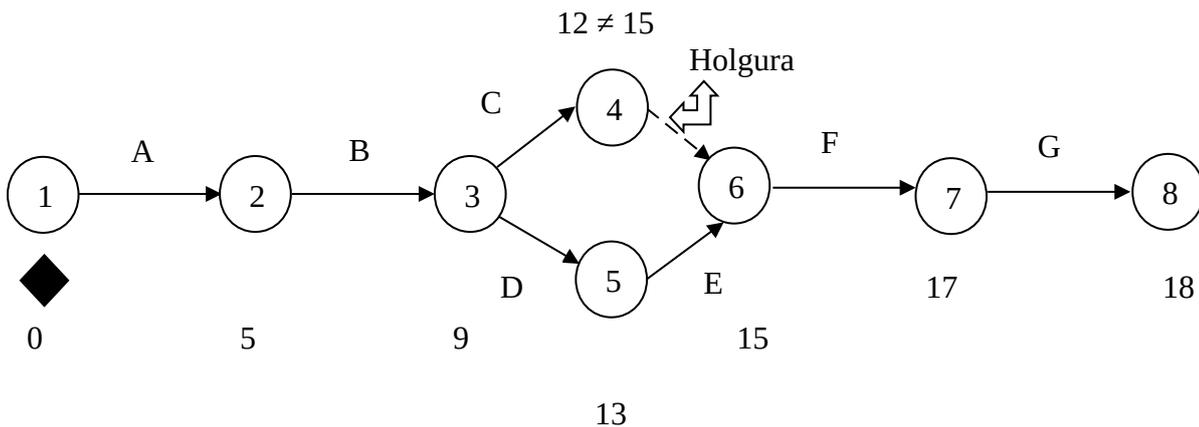


Figura 40. Cálculo de camino crítico

Recursos

Para realizar un proyecto se necesitan recursos los cuales consideramos totalmente disponibles. Esto no implica que puedan ser usados todos al mismo tiempo, puesto que todo proyecto tiene una secuencia lógica a respetar.

Un proyecto puede ser encarado de dos formas: con o sin superposición de tareas. Sin superposición de tareas implica que hasta que no termine una, no se comienza con la siguiente y así sucesivamente hasta concluir el proyecto. En el otro caso se superponen tareas, donde la naturaleza de las mismas lo permita, aumentándose la población que trabaja simultáneamente pero reduciéndose el tiempo de finalización del proyecto.

Como antes se menciona, el hecho de que aumente la población hace que disminuya el tiempo de finalización, pero la cantidad de horas hombres requeridas, en principio, se mantienen invariantes. La cuestión de incrementar la cantidad de personas para terminar rápidamente, tiene otro tope aparte de la secuencia lógica. Este otro lo determina la improductividad que causa la súper-población, donde parte de los ejecutantes tiene que ceder espacio a otros, quedando al margen de la actividad. El principal efecto de esto es la disminución de rendimiento y esto conlleva a que se requiera más cantidad de horas hombres sin ganancia en el tiempo de finalización.

Aunque en teoría la diferencia entre ambos caso es clara, en la práctica se debe analizar todas la variantes posibles y las condiciones impuestas para la selección del criterio de ejecución del proyecto.

Para apreciar esta situación se puede analizar, a modo de ejemplo, un proyecto compuesto por cuatro actividades (Tabla 10) que suman un total de 6000 Hh. Cada una de las actividades se subdivide a su vez en etapas. Por cada 1000 Hh se requieren 20 operarios.

Etapas	Hh	Operarios	Actividad
12	1000	20	Actividad 1
24	2000	40	Actividad 2
32	3000	60	Actividad 3
44	4000	80	Actividad 4
Total		6000	120

Tabla 10. Recursos requeridos por actividades

Si tomamos al proyecto sin superposición, este concluirá al cabo de doce etapas. Pero si lo queremos concluir al término de nueve etapas aparecerá aquel fenómeno. En las siguientes graficas (Fig. 41) se visualiza la situación planteada.

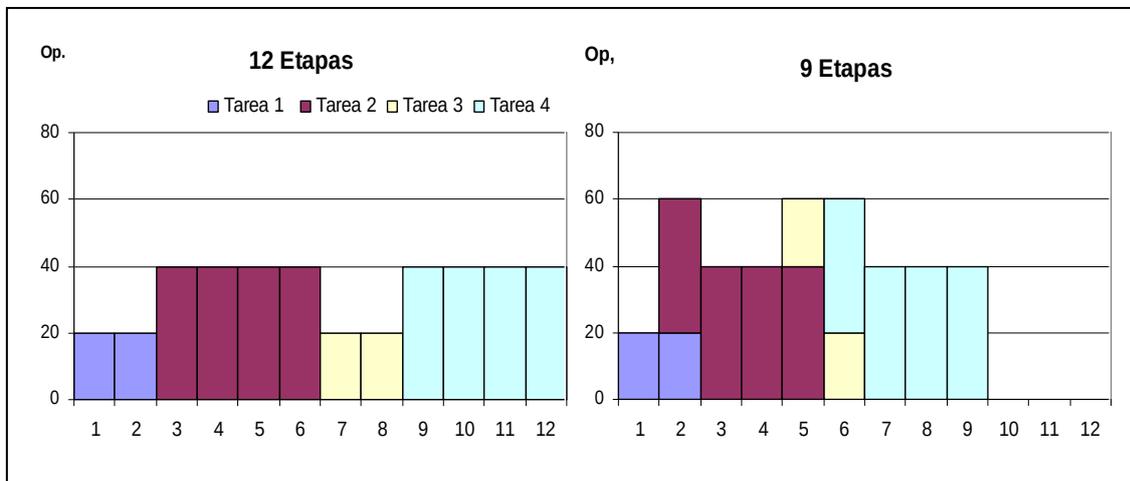


Figura 41. Comparación de proyectos según distribución de actividades

Donde hay superposición de tareas se aprecia que el período de finalización es menor con picos mayores pero el área por debajo de la curva, que representa la cantidad de Hh requeridas, se conserva invariante.

¿Qué es el Software Microsoft® Project?

Es Software Microsoft® Project es una de las herramientas incluidas en el paquete de Microsoft® Office el cual ofrece innovadoras características que facilitan sustancialmente la planificación, administración y comunicación de cada una de las fases de cualquier tipo de proyecto.

Establecido un proyecto se puede comparar la situación real con la original estimada, lo que sería llevar a cabo el seguimiento del mismo. Esto es de gran utilidad para el gerenciamiento de cambios con eficacia o bien futuras planificaciones.

Los informes se pueden personalizar en Calendarios, Diagramas de Gantt y de Pert. Consta de un poderoso administrador de recursos. También posee una gran variedad de herramientas que hacen a la fácil comprensión del proyecto como a la estética del mismo.

Mantenimiento programado

El mantenimiento que se hace sobre las turbinas de vapor es esencialmente preventivo, comúnmente denominado programado. No obstante presenta características de mantenimiento predictivo. La combinación forma parte de lo que se da a llamar "mantenimiento Científico". Los citados se definen de la siguiente manera:

- *Mantenimiento preventivo*: Son las inspecciones y trabajos de mantenimiento realizados periódicamente, obedeciendo a un programa cíclico, o según necesidad verificada por tales inspecciones a fin de evitar la materialización inesperada de fallas, averías o defectos operativos mediante acciones programadas de detección precoz y corrección oportuna, mientras las anomalías detectadas se encuentran todavía en estado de incubación comprobable. Las acciones típicas de este sistema son:

- Limpieza
- Ajustes
- Reaprietes
- Regulaciones
- Lubricación
- Cambio de elementos utilizando el concepto de vida útil indicada por el fabricante
- Reparaciones propias pero programadas

- *Mantenimiento predictivo*: Son los trabajos de mantenimiento cuya necesidad de realización se puede prever y programar en función del seguimiento (inspecciones) de parámetros de performance o mecánicos cuya tendencia de deterioro constituye un indicio que permite predecir la oportunidad en que los respectivos trabajos de corrección serán convenientemente necesarios desde el punto de vista técnico-económico. Las inspecciones pueden ser de dos tipos:

- 1) Monitoreo discreto: en el cual las inspecciones se realizan con cierta periodicidad, en forma programada
- 2) Monitoreo continuo: se ejerce en forma constante, con aparatos montados sobre las máquinas. Este tiene la ventaja de indicar la ejecución de la acción correctora, lo más cerca posible al fin de su vida útil.

Por medio del mantenimiento se supone asegurar que todo activo, en este caso el Turbogruppo, continúe desempeñando las funciones deseadas y la competitividad de la empresa por medio de:

- Asegurar la disponibilidad y confiabilidad planeadas de la función deseada
- Cumpliendo con todos los requisitos del sistema de calidad de la empresa
- Cumpliendo con todas las normas de seguridad y medio ambiente
- Al máximo beneficio global

Para un mejor estudio del mantenimiento de la turbina es necesario contar con los siguientes elementos indispensables:

- 1) Datos del fabricante del objeto y precedentes de mejoras en series posteriores
- 2) Manuales
- 3) Planos
- 4) Estándares de tasa de fabricación o servicio
- 5) Experiencia acumulada ya sea escrita o bien transmitida oralmente por el personal
- 6) Sugerencias de mejoras aportadas por los mismos, anotadas y estudiadas detenidamente

La periodicidad del "Mantenimiento Programado", también conocido como "Barrida completa", se mide en horas de funcionamiento de la turbina y equivale a 35.000 horas.

Considerando un funcionamiento de servicio continuo aquel valor se traduce en 4 años. Pero en la práctica dicha cantidad de horas se cumple en un plazo de 5 años, esto se debe a que se realizan paradas programadas para ejecución de tareas de mantenimiento en auxiliares o bien ensayos sobre la turbina misma.

Originalmente se programaban las tareas cada 50.000 horas de acuerdo a lo establecido por el fabricante. Con el tiempo se fue modificando este patrón hasta llegar al que se utiliza hoy en día. Una de las causas obvias es que con el transcurso del tiempo el desgaste se manifiesta con mayor intensidad por lo que la máquina requiere mayor atención; pero fundamentalmente la periodicidad se redujo por la dificultad del desmontaje de las partes que están sometidas a altas temperaturas. De esto último se desprende que si hipotéticamente pudiéramos predecir que la máquina no necesitara ajuste alguno igualmente se ejecuta el "Mantenimiento Programado".

El periodo conveniente, para la ejecución de este mantenimiento, indica una fecha de comienzo correspondiente al fin de la temporada veraniega (mediados de marzo) y una de finalización previa al inicio de la misma. Esto se debe a que en la temporada estival se registran los mayores valores de consumos energéticos y el compromiso es abastecerlo por lo que sería una decisión errónea que se planifiquen tareas para esa época.

Con respecto a la extensión del "Mantenimiento Programado" podemos afirmar que promedia los cinco a seis meses de trabajo con jornadas con horas extras. Este dato está basado en la experiencia obtenida a raíz del tiempo. No tiene en cuenta imprevistos mayores en la máquina o de recursos humanos.

Además del personal que aporta la mano de obra existe un punto fundamental que es la persona que liderará el proyecto, o sea el Jefe de Mantenimiento. El éxito o fracaso del proyecto le corresponde a todo el personal involucrado en forma directa o indirecta y no solo a dicho líder. Otra de las cuestiones a destacar es que no todo el personal de los distintos sectores se dedica exclusivamente a las tareas propias sobre la turbina, sino que también a trabajos sobre los distintos auxiliares y a las tareas periódicas del otro grupo (en servicio). En caso de que surja una escasez de personal se pueden utilizar recursos de otros sectores de mantenimiento como el correspondiente a Caldera y a Turbogas.

Previamente a la ejecución del mantenimiento se deben realizar una cantidad de tareas con el fin de evitar inesperados, durante su transcurso del mismo, que lleven a la dilatación de la finalización del mismo. A continuación se enumeran las más relevantes:

1. Verificar la disponibilidad de repuestos
2. Verificar la disponibilidad y correcto funcionamiento de equipos involucrados
3. Asegurar la disponibilidad del personal
4. Iniciar gestiones de los trabajos a contratar
5. Iniciar gestiones de compra de repuestos, herramientas y otras faltantes.
6. Sistematizar el mantenimiento mediante software
7. Delegar responsabilidades y confeccionar grupos de trabajo
8. Hacer análisis de costos del mantenimiento
9. Estudiar los resultados de las inspecciones de los parámetros de performance
10. Estudiar la realización de las tareas que poseen menor frecuencia de ejecución que el "Mantenimiento Programado"

Destacamos que todas las decisiones y acciones tomadas (y/o a tomar) deben ser aprobadas por gerencia de planta; para asegurar la ejecución del mantenimiento sin objeciones posteriores.

Para la sistematización del mantenimiento se debe tener en cuenta que las tareas están ligadas temporalmente por los trabajos sobre los cuerpos de AP y BP de turbina y el regulador. Se debe diagramar en paralelo las acciones sobre el alternador y la excitatriz, poniendo riguroso énfasis en el tiempo de utilización del puente grúa, puesto que al ser único es uno de los elementos críticos presentes. El proceso posee un punto de inflexión que es el correspondiente a la alineación de los ejes rotóricos de AP, BP y alternador. Una vez concluida esta actividad el personal eléctrico dispone del alternador en su totalidad para los trabajos predeterminados. A partir de este punto se trabaja en paralelo sobre todos los bloques de la máquina coordinado los grupos de trabajos y el puente grúa de forma tal de no cometer errores de superposición de estos recursos que conlleven la imposibilidad de la ejecución de las tareas.

Planificación del Mantenimiento Programado

Programación

Para la planificación fue elegida la versión 4.0, del ya citado software Microsoft ® Project. No corresponde a la versión más reciente pero posee las herramientas deseadas para este fin.

Se planificó teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Jornadas laborales de 10 horas netas de trabajo; en el entorno del programa 1 hora equivale a " 0,1 día"
- La unidad temporal elegida es el día puesto que la mayoría de los trabajos son de éste orden de duración
- El calendario utilizado corresponde a semanas de trabajo de lunes a viernes
- No se tiene en cuenta una fecha de iniciación ya que es un plan general del cual interesa su extensión estimada
- No se contemplan feriados dado que solo influyen en su extensión de acuerdo a cuantos sean tomados como no laborales durante el mantenimiento
- El entorno utilizado es el correspondiente a diagramas de Gantt
- Por cada tarea se abre una voz (fila)
- Se programa de acuerdo a la secuencia lógica (predecesoras), focalizándose en la asignación de recursos humanos y por sobretodo en el de la grúa
- Se programa también evitando superposición de tareas sobre un mismo sector de la máquina
- Para la asignación de recursos se eligieron las letras M, E y G correspondientes al personal mecánico, eléctrico y al operador de la grúa respectivamente
- No se hizo una subdivisión de cada recurso según categoría (montador, ayudante, etc.)
- En primera instancia se programó teniendo en cuenta los recursos sin utilizar las herramientas de gestión de los mismos
- Las herramientas de gestión de recursos se usaron al finalizar el proyecto para la corrección de posibles inconvenientes como sobreasignación

Además debemos resaltar que el proyecto en cuestión representa la situación general y estimada del mantenimiento que se realiza sobre las turbinas de vapor. Se desea que los resultados de un futuro seguimiento avalen en un ciento por ciento lo planificado. Por diversos motivos, programables o no, esta situación teórica no se va a cumplir en su totalidad. Pero esto no desmerece la planificación confeccionada puesto que es una buena aproximación de lo real que puede ser modificada durante el transcurso del mantenimiento. Esto se ve favorecido al gran dinamismo que posee el programa Project. Igualmente se debe tener cuidado al gestionar cambios dado que tareas no críticas pueden pasar a serlo; o se puede producir superposición de tareas que conlleven a inconvenientes como falta de personal y/o equipos; o bien problemas de improductividad.

Para una mejor comprensión detallaremos fragmentos del programa confeccionado.

La ventana de trabajo esta comprendida por dos secciones. Una izquierda (Fig. X) la cual posee columnas y filas, como las que contiene el conocido programa Excel, destinadas para la información del proyecto; y una derecha (Fig. 42) donde se visualiza el diagrama de Gantt

correspondiente, el cual se construye automáticamente a partir de la información ingresada. Generalmente el programador lo acondiciona de acuerdo a la información, escala temporal y colores que desee visualizar en el diagrama.

Cada fila representa una tarea y a esta se le asignan columnas de acuerdo a la información de conveniencia elegida por el programador. Para ejemplificar dicha situación tomamos la tarea de la fila N° 44: “Aflojar bridas de cañerías (x4) – entrada vapor”. Esta tiene una “Duración” de 2 días (20 horas), debe ser llevada a cabo por dos integrantes del personal mecánico, según se aprecia en la columna “Nombres de los recursos”, lo que se traduce en un costo equivalente a 40 horas-hombres.

En la columna “predecesoras” se ingresa el/los número/s de las tareas que deben concluir para poder comenzar con la tarea en cuestión. Esto significa que no se pueden aflojar las bridas hasta que no se retiren los restos de aislamiento de los cuerpos de AP y BP como lo establece la tarea (fila) N° 10.

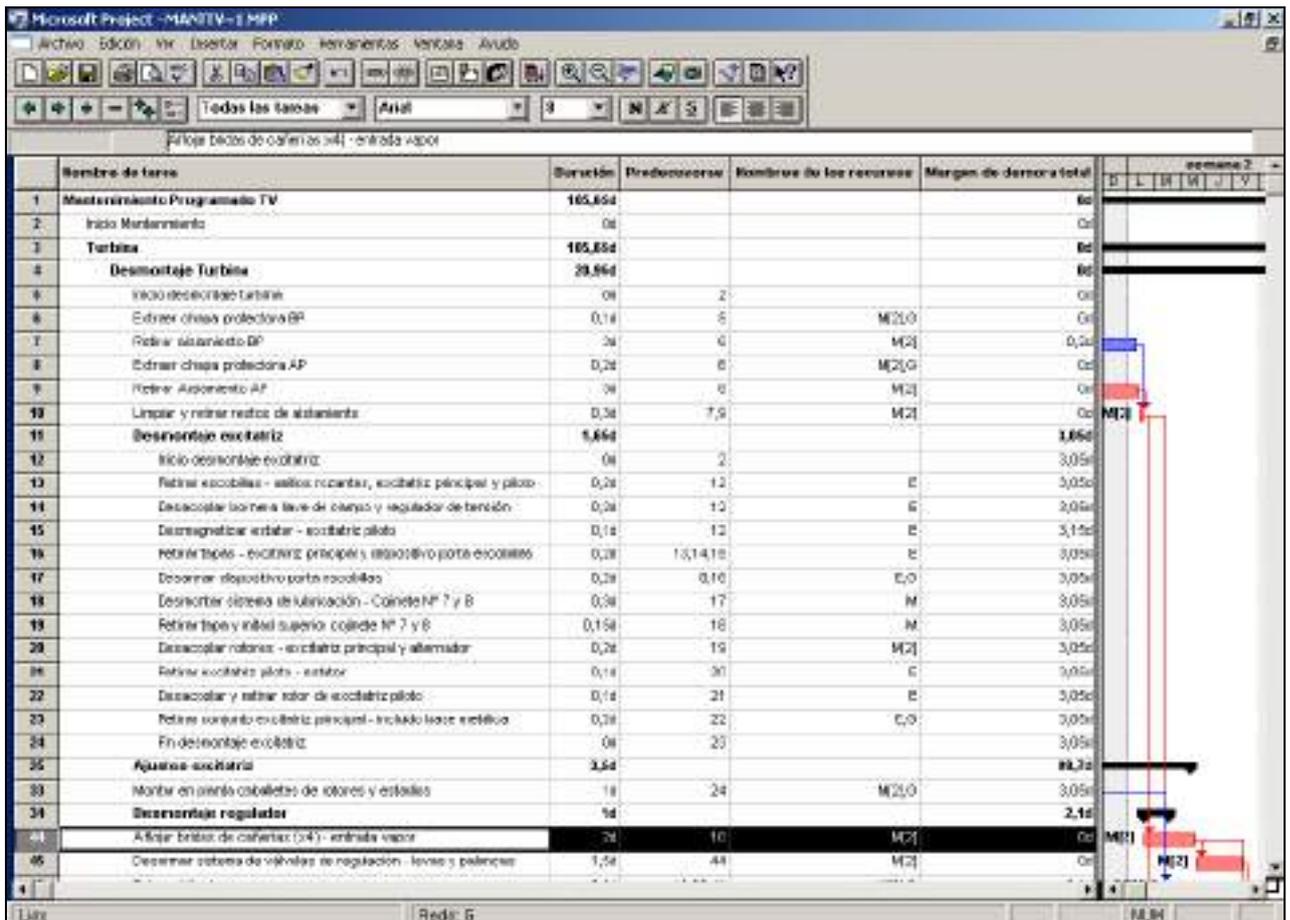


Figura 42. Área de Trabajo – Detalle ingreso de tareas.

La última columna elegida es la de “Margen de demora total”. Dicha demora es calculada por el programa y se expresa en días. Expresa la cantidad de días que se puede demorar el comienzo de la ejecución de la tarea en cuestión. La certeza en el cálculo depende de la correcta vinculación de todas tareas. En el caso de la tarea N° 44 dicho margen es nulo por lo tanto es de carácter crítico. Se entiende que si el tiempo estipulado de duración es excedido, durante su ejecución, se va a reflejar en una dilatación del proyecto de ese lapso.

Hay tareas que conglomeran un grupo de tareas, por ejemplo: “Desmontaje excitatriz” correspondiente a la fila N° 11 (Fig. 42). Esto se hace ante la necesidad de hacer una descripción más minuciosa de dicha actividad. Hay que tomar el recaudo de colocar hitos de inicio y fin para poder vincular a la misma con el resto del proyecto. Esto se debe a que este tipo de tareas (resaltadas en negro) no necesitan el ingreso de la información correspondiente al resto de las columnas utilizadas, ya que el programa se encarga de colocarla automáticamente, por ende deben estar correctamente “Linkeadas” (unión entre tareas) a fin de evitar errores.

Retomando a la sección destinada al área destinada para el trazado del diagrama de Gantt (Fig. 43) de nuestro proyecto se eligió la escala temporal en semanas de trabajo sin destacar fechas por ser el proyecto de carácter general. Se optó discriminar las tareas de acuerdo a su criticidad, en azul barras de tareas con holguras y en rojo tareas críticas. A la izquierda de cada barra se dispuso el tipo y cantidad de recursos de cada tarea. Los hitos se identificaron con rombos negros. Y las tareas que agrupan a otras se caracterizaron con barras negras.

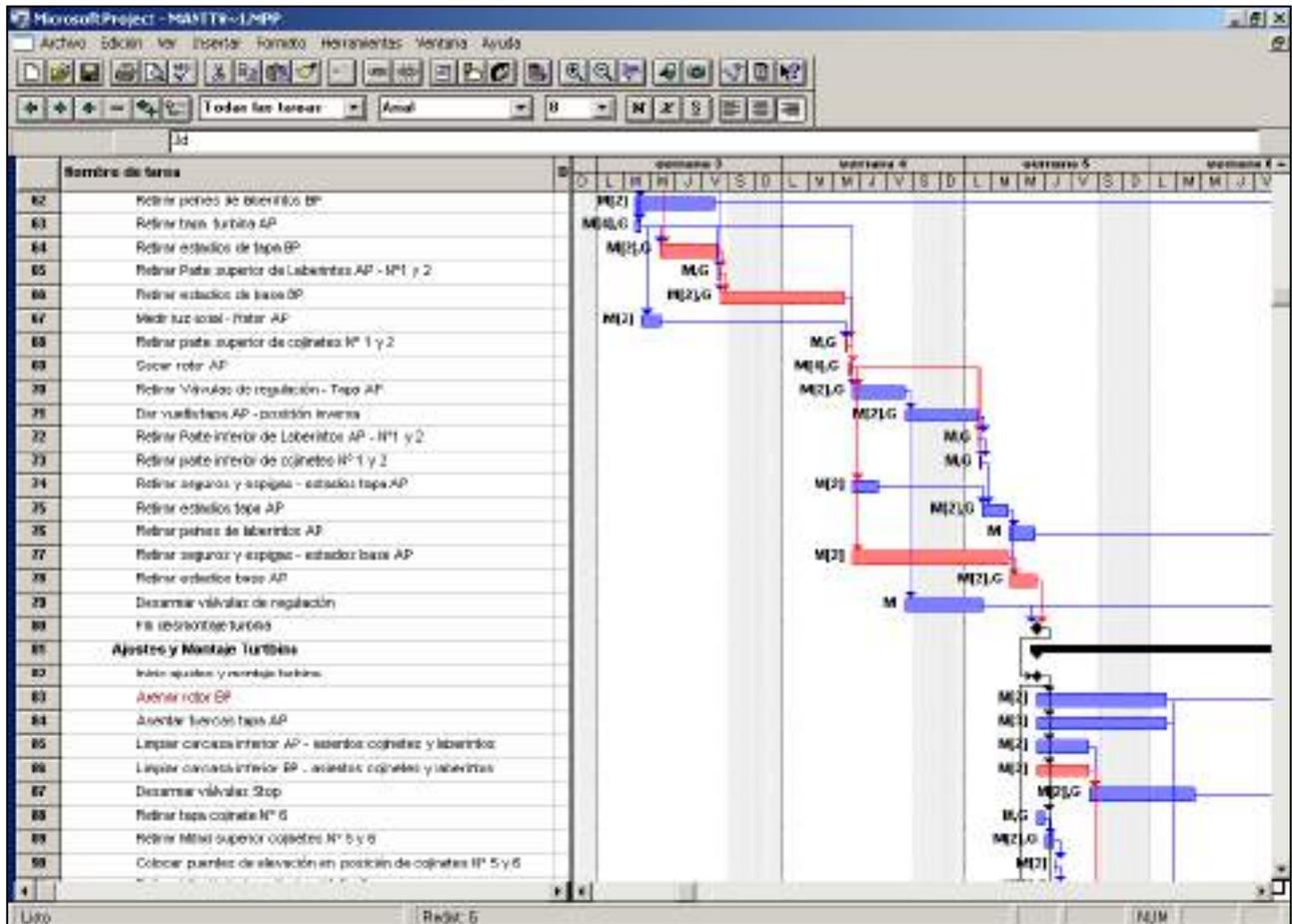


Figura 43. Área de Trabajo – Diagrama de Gantt

Existen varias columnas de gran utilidad que por no ser necesario o no aplicar en este proyecto se ha descartado su uso. Igualmente citamos algunas de ellas: *Comienzo* y *Fin* de cada tarea; *Tareas Críticas* indica la condición de criticidad de cada tarea; Columnas varias de *Costos* y *Seguimiento*; y otras tantas.

Otra de las herramientas es la utilizada para la asignación de recursos (Fig. 44). Debe definirse previamente el nombre y la cantidad máxima disponible de los mismos. Una vez hecho esto se debe asignar recursos tarea por tarea colocando la cantidad cada uno en la columna unidad del cuadro de asignación.

Para la gestión de los recursos existen tres ventanas de gran utilidad: gráfico de recursos, hoja de recursos y uso de recursos.

La ventana “gráfico de recursos” (Fig. 45) otorga información por defecto de la cantidad de cada recurso utilizada por día y los discrimina según estado de asignación (asignado y sobreasignado). Dicha cantidad corresponde a la máxima que se utilizará al mismo tiempo durante

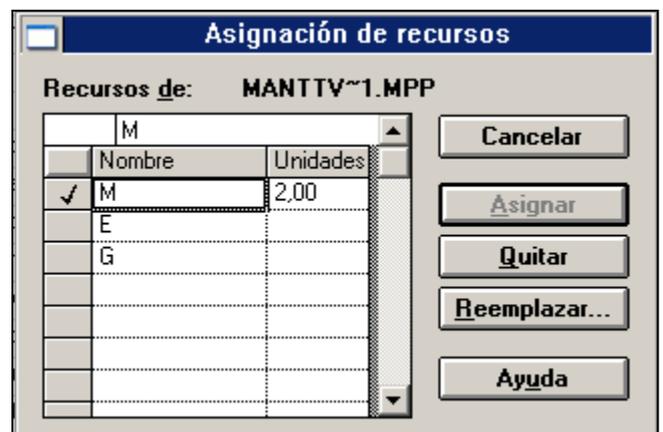
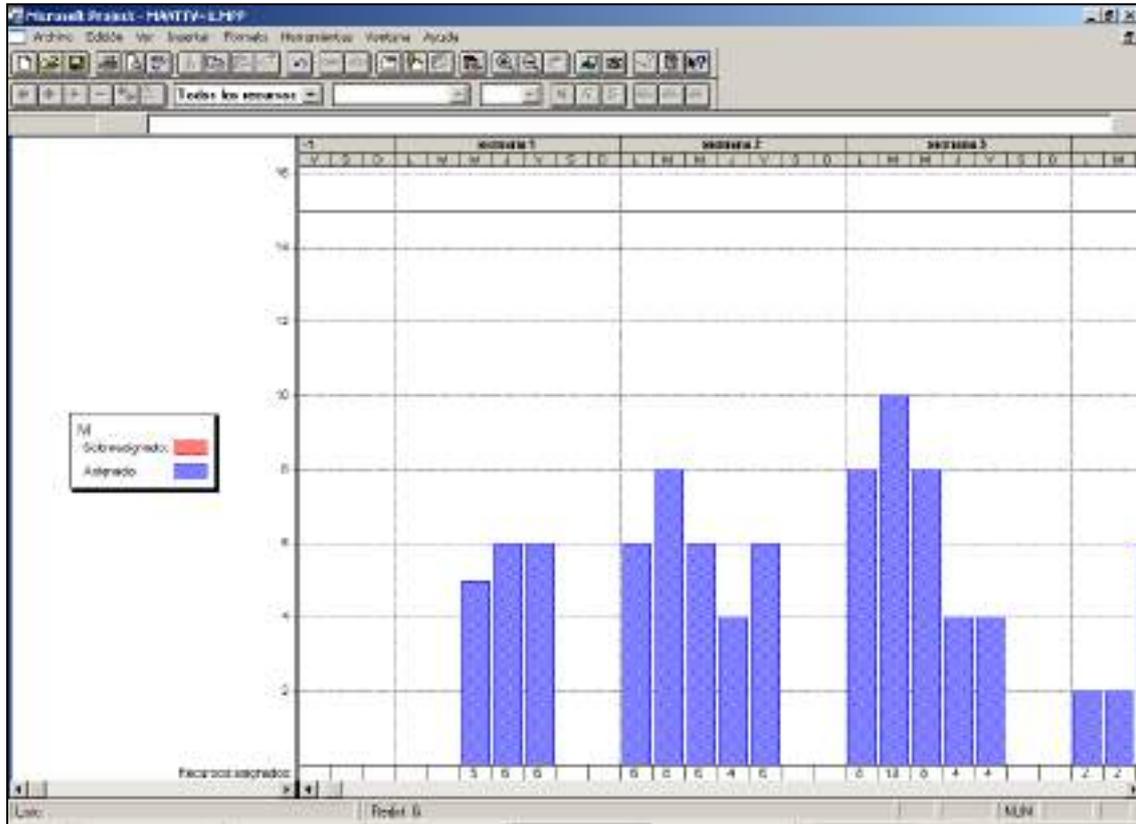


Figura 44. Asignación de recursos.

el día. Por ejemplo, el primer día de trabajo se requerirán cinco integrantes del grupo conformado por los mecánicos. Puede ser que solo requiera de estos durante una sola hora y el resto del día se precise menos, pero de antemano se sabe que en algún momento se necesitarán cinco. Esto no quita que ante la disponibilidad se destinen más recursos pero siempre poniendo énfasis en la improductividad. También puede graficarse variantes como costos, trabajo acumulado entre otros.



La ventana “uso de recursos” (Fig. 46) brinda la información del total de horas que sumaran los recursos durante el día; lo que es conocido como Horas/Hombre. Siguiendo el ejemplo anterior en el primer día dicho valor asciende a las 42 horas (4,2 días). De este valor se deduce que las cinco personas, que se precisarán ese día, no estarán abocadas exclusivamente al mantenimiento de la turbina dado que en este caso el valor sería de 50 horas. Pueden detallarse en este tipo de tablas las mismas variantes que en la ventana “gráfico de recursos”.

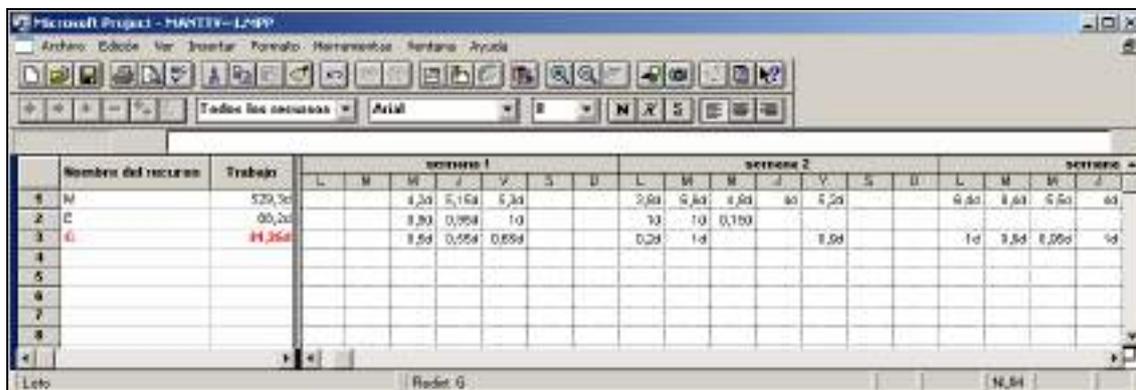


Figura 46. Uso de recursos

La ventana “Hoja de recursos” no fue tenida en cuenta para este proyecto. Posee un formato similar a la de “Uso de recursos” pero difiere en su funcionalidad. La misma se utiliza básicamente para el cálculo de costos.

Discusión

Terminado el proyecto, a pesar de que se programó haciendo hincapié en los recursos, cuando se recurrió a la utilización de las herramientas de gestión de estos y se encontró el mencionado problema de sobre-asignación (Fig. 47).

El inconveniente se presentó en el personal mecánico y la grúa. Mediante una redistribución manual corrigió esto. La consecuencia principal es el aumento de la duración total del proyecto.

Los recursos humanos no presentan mayores problemas de redistribución, en cambio, como se consta de una sola grúa se hace más dificultosa la coordinación requerida para su uso. El proyecto final quedo con algunos días con sobre-asignación del recurso grúa pero se decidió dejarlo así. Esto se justifica por el hecho de que hay tareas que precisan la grúa en un porcentaje de su duración total y como no se programo aisladamente en función a los movimientos de la grúa el programa no tiene la posibilidad de discernir en que porcentaje de cada tarea se utiliza la misma. Por este motivo no se utiliza la herramienta de redistribución automática brinda el programa. Ésta redistribuye de forma tal que elimina la sobreasignación pero extiende el proyecto más de lo estimado. Destacamos que no es un error propio del programa sino es una opción de programación elegida concientemente dado que si se aislaran las tareas correspondientes a los movimientos de la grúa aumentarían significativamente la cantidad de voces extendiéndose el proyecto con información que excede los propósitos buscados.

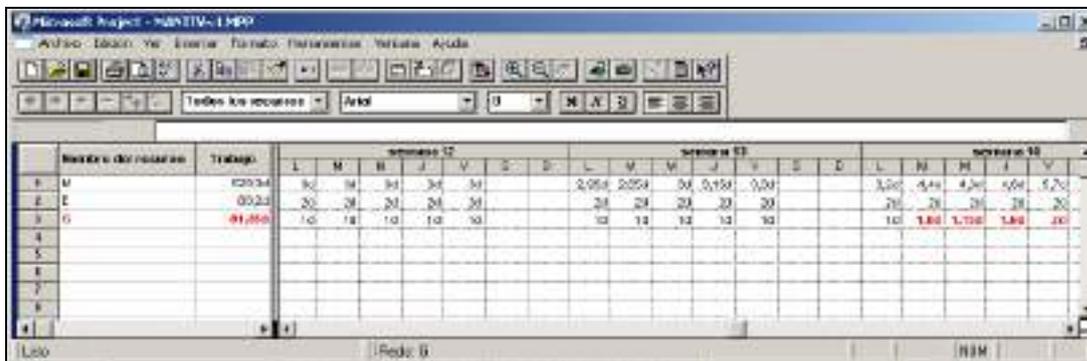


Figura 47. Uso de recursos – Sobreasignación de grúa

Como ejemplo citamos la tarea que involucra “Montar definitivamente mitad superior cojinetes N° 3 y 4” la cual dura dos horas y media de duración. En este caso la grúa se precisa la disponibilidad de la grúa durante 30 minutos. Si quisiéramos se podría dividir la tarea en varias voces ya que el montaje implica limpieza, apriete y traslado en grúa pero se prefiere aunar todas en una sola tarea dado que se entiende lo que implica dicho montaje.

Resultado final

El proyecto del “Mantenimiento Programado” resultante posee las siguientes características:

- Duración equivalente a 106 días (1060 horas) hábiles de trabajo
- Período equivalente a 21 semanas consecutivas de trabajo
- Desmontaje turbina 21 días
- Su descripción consta 287 voces
- 5269 horas neta de recursos mecánicos – asignación máxima → 15 M
- 882 horas neta de recursos eléctricos – asignación máxima → 4 E
- 801 horas neta de utilización de grúa
- Extensión física equivalente a 66 (11 x 6) hojas A4 → escala temporal al 200 %

Nota: Se anexaran fragmentos del proyecto al final del informe. La extensión total se entrega en formato digital por cuestiones de comodidad de manipulación.

Descripción de tareas

Se describirán algunas de las tareas, realizadas durante el “Mantenimiento Programado” sobre las turbinas de vapor. Cabe aclarar que las elegidas no todas corresponden a las de mayor duración ni las más complejas ni críticas sino las que a nuestro criterio son las más relevantes para el presente informe. Así, dicho capítulo no pretende citar la totalidad de las tareas que se efectúan durante dicho mantenimiento. La descripción es de carácter cualitativa asumiendo que los tiempos de duración y los recursos necesarios están establecidos en el entorno del Project.

Se discernirán los trabajos correspondientes a cada uno de los cuatro bloques componentes del grupo, es decir: Turbina, Regulador, Alternador y Excitatriz.

Turbina

Dispuesta la máquina para la ejecución del mantenimiento se comienza las tareas pertinentes en forma secuencial, agrupando al mismo en cuatro grandes grupos: desmontaje, ensayos, ajuste y montaje.

Se comienza por el desmontaje de las tapas protectoras de los cuerpos de AP y BP para luego retirar todo el aislamiento térmico de los mismos. Finalizada esta tarea, nunca antes, se procede al desarme completo de sendos cuerpos y del bloque de maniobras. Este proceso implica el desmontaje de sistema virador; tapa de cola y base media; sistema de levas; válvulas de regulación; válvulas "Stop"; tapa de AP y BP junto a los respectivos estadios; rotores de AP y BP previamente desacoplados; cojinetes N° 1, 2, 3 y 4; cajas de sellos laberínticos; estadios de bases BP y AP.

A medida que se va desarmando la turbina se lleva a cabo la limpieza y arenado de los elementos disponibles de acuerdo a la prioridad. En primera instancia se debe limpiar asientos de cojinetes para poder realizar el ajuste con apriete a los mismos y se debe arenar rotores de BP y AP. Esto está motivado en que se debe alinear, lo antes posible, los ejes de AP, BP y alternador para que quede disponible este último a efectos de proceder a su desmontaje.

Al mismo tiempo se prosigue con el arenado de estadios, tapas y laberintos. Este es uno de los requerimientos para poder hacer los ensayos no destructivos (END). Finalizados estos los rotores quedan disponibles para ser balanceados, tarea que no es posible obviar dado que en ellos se manifiesta mayoritariamente el desgaste propio de las horas de funcionamiento.

En paralelo se realizan controles dimensionales de los estadios para cuando sean montados poder interpretar correctamente la lectura de los comparadores. Esta etapa de alineación corresponde a la que se ejecuta sin los ejes correspondientes. Para esto se utiliza un sistema de eje postizo elevadamente ingenioso. El mismo se centra a los cojinetes, ya alineados, para con esto poder centrar carcasa de AP y todos los estadios.

Lograda la alineación final se procede al montaje definitivo de los cuerpos de AP y BP, base media y de cola; y bloque de maniobras. Este último paso no se ve afectado por las tareas que se estén ejecutando sobre el alternador y el bloque excitatriz.

Las tareas no tenidas en cuenta, en el presente informe, para una descripción detallada, se nombraron sólo a efecto del seguimiento secuencial de las tareas que se efectúan, para así arribar a la descripción detallada de las tareas seleccionadas. De esta manera se pondrá énfasis en la descripción de las siguientes tareas:

- Medición de diámetro de cojinetes
- Ajustes cojinetes
- Alineación de Rotores
- Medición diafragmas de AP y BP
- Alineación de "eje postizo"
- Apriete espárragos de tapa AP y BP
- Balanceo de rotores
- Ensayos no destructivos (ENDs)

Cabe aclarar que ha medida que se extiende el "Mantenimiento Programado" de la turbina, se realizan en forma progresiva los ensayos no destructivos sobre cada uno de los componentes principales que requieren la verificación de su vida útil y/o reparación o reposición.

Medición de diámetro de cojinetes

La medición se realiza con micrómetro para interiores (Fig. 48). El diámetro vertical se mide en forma directa; y el horizontal se realiza tomando dos mediciones cruzadas y simétricas respecto de la superficie de contacto, para luego calcular dicho diámetro a través del promedio de éstas. Esto está motivado en el hecho de que si se midiera horizontalmente, el instrumento apoyaría sobre la superficie de encastre de las dos mitades del cojinete y en consecuencia sería difícil tomar una medida correcta.

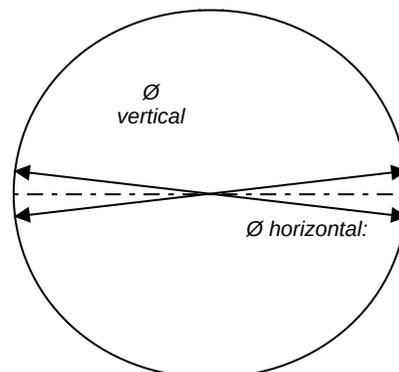


Figura 48. Medición diámetro de cojinetes

Se debe tener en cuenta el carácter de “limón” que poseen los cojinetes, sabiendo que el huelgo vertical existente entre el cojinete y el gorrón es 0,15 % del diámetro de éste último, y el horizontal sea de 0,4 %, como se explicó con antelación.

Ajustes cojinetes

Previamente a la primera etapa de alineación se deben hacer ensayos no destructivos sobre los cojinetes N° 1 al 6 como tarea prioritaria. Lo mismo debe hacerse sobre los dos restantes pero puede dejarse para cuando se hagan los ensayos sobre rotores, estadios y demás. Se destacan los siguientes ensayos:

- Tintas penetrantes: se efectúa sobre la superficie del material antifricción para analizar posibles fisuras.
- Ultrasonido: el objetivo es detectar discontinuidades en el volumen del material antifricción y verificar la correcta adherencia de este con el material del cuerpo del cojinete.

De encontrarse desvíos se puede remetalar (renovación del material antifricción) el cojinete o bien reemplazar por uno de reversa dispuesta en almacén. El proceso de remetalado demanda alrededor de una semana de trabajo por lo que puede resultar conveniente elegir esta opción debido a cuestiones de asentamiento del cuerpo del cojinete. La consecuencia directa es la reprogramación de las tareas de mantenimiento teniendo en cuenta los recaudos ya conocidos.

Sobre los cojinetes se hacen también dos tipos de ajustes relacionados con el apoyo:

1. Ajuste de asientos de cojinetes – anterior a alineación
2. Ajustes de apoyo de ejes sobre cojinetes – posterior a alineación

El primero esta relacionado con el apoyo de los “panes” sobre su respectivo asiento en los cuerpos de las turbina o pedestales según sea el caso. Para esto, una vez retirado el cojinete se hace la limpieza del mismo, de su asiento con tela esmeril y solvente Stodard. Se pintan el asiento con tinta “Azul de Prusia” y se monta nuevamente el cojinete con el apriete correspondiente. Luego es retirado para verificar la huella inscripta sobre los “panes”. De acuerdo a esto se debe colocar, quitar o dejar los suplementos según corresponda.

Para el segundo se debe tener montado con apriete los cojinetes y el respectivo rotor. Los gorriones deben ser pintados previamente con azul de prusia. Se gira el eje una vuelta aproximadamente, en seco (sin lubricación), para marcar el metal antifricción de cada uno de los cojinetes. Un buen apoyo corresponde a una fina línea recta con un espesor de unos 40 mm que abarque por lo menos un 70 % de la longitud del cojinete (Fig. 49) marcada en la parte inferior del metal blanco.

Puede suceder que el apoyo tenga una longitud menor a la mínima o haya diferencias en el ancho. Esto se corrige con el uso de rasqueta trabajando sobre la zona marcada.

Otro caso que puede presentarse corresponde a un apoyo de ancho y largo correcto pero con remoción excesiva del metal blanco. Esto se lee como un apoyo tal que el gorrón se hunde en el cojinetes acarreado un aumento del diámetro vertical (Fig. 50). Si este no esta fuera de medida se puede trabajar con rasqueta.

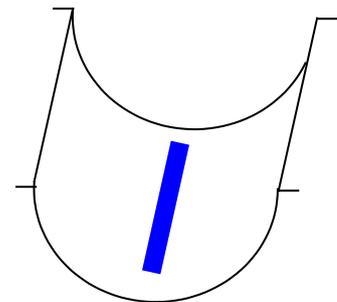


Figura 49. Apoyo aceptable

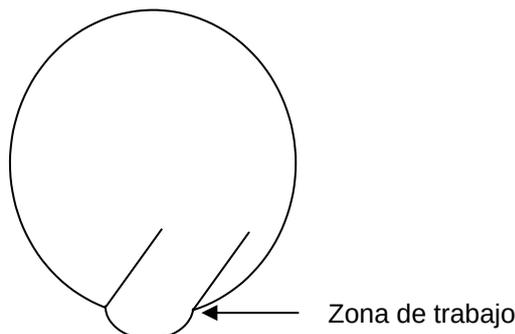


Figura 50. Perfil de apoyo incorrecto

Alineación de Rotores

Para la alineación de los ejes AP, BP y del alternador se procede de la siguiente manera:

1. Se considera al eje AP como el eje de referencia debido a las restricciones radiales y axiales impuestas por el engranaje de la bomba mecánica de aceite (IMO).
2. Desacoplados los respectivos ejes, con sus cojinetes montados y debidamente apretados, se colocan topes en eje BP y del alternador para evitar el desplazamiento axial producto de los giros realizados durante el proceso de alineación. Hay que recordad que estos dos ejes no poseen cojinetes de empuje axial, a diferencia del eje de AP. El apriete de los cojinetes es tal que al hacer esto el eje baje una centésima de milímetro registrada por medio de comparador (Fig. 51).



Figura 51. Comparador.

A partir de este ítem solo tendremos en cuenta la alineación que se realiza entre los ejes de AP y BP, dejando de lado el rotor del alternador debido a que el procedimiento es idéntico.

3. Se colocan tres comparadores: dos axiales y uno radial; las respectivas bases magnéticas se apoyan, por conveniencia, sobre la brida del eje que se van a modificar los suplementos de los cojinetes y el vástago móvil del instrumento se apoya sobre la brida del otro eje (Fig. 52). Los comparadores axiales se ubican separados entre si a 180° mientras que el radial a 90° de aquellos.

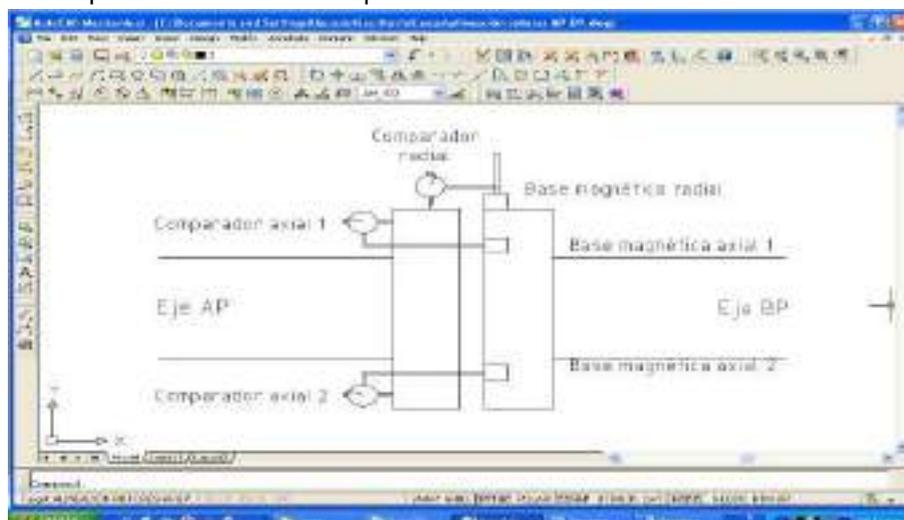


Figura 52. Posición de comparadores sobre brida de acople eje AP

4. Se giran los ejes, desacoplados, hasta que coincida el punto de referencia inscripto en cada una de las bridas de acoplamiento. Este punto indica la correcta posición relativa de acople de ambos ejes. Todo movimiento de giro debe ser realizado con la asistencia de la bomba principal de aceite y de la levanta eje.
5. Se acoplan con guía y se cargan los comparadores una cierta cantidad de vueltas, o sea milímetros (generalmente 3 mm) y se coloca la aguja de la escala centesimal en cero. Se gira de a un cuarto de vuelta y se registran los valores obtenidos en los instrumentos (Fig. 53). Al mismo tiempo se verifica el libre desplazamiento de dicha guía.

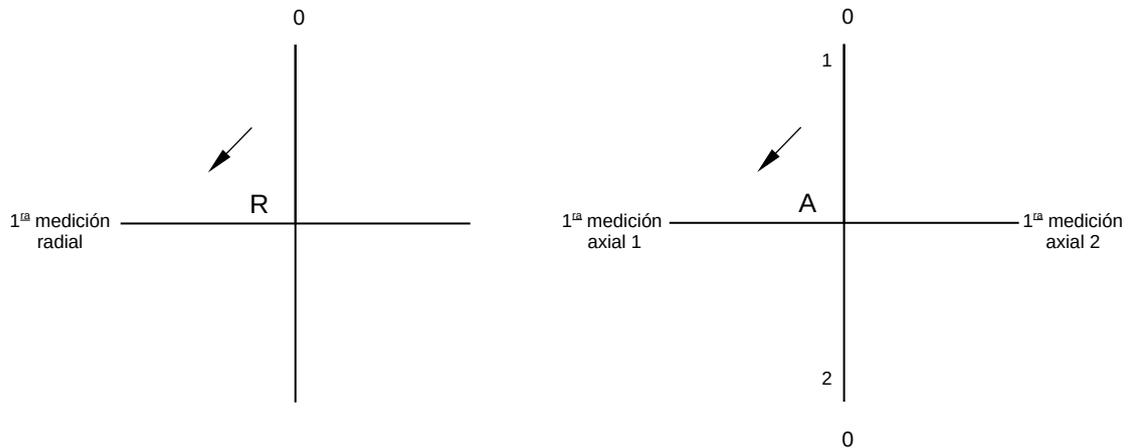


Figura 53. Valores medidos en el primer giro cuarto de vuelta

6. Se giran los ejes otro cuarto de vuelta y se registran nuevamente los valores en los comparadores.
7. Se repite este procedimiento hasta completar una vuelta completa, es decir dos cuartos de vuelta más. Al finalizar, en el comparador radial se debe leer la misma lectura de la cual se inicio el procedimiento. Caso contrario se deben repetir las mediciones puesto que esto da lugar a sospechar que se movió el comparador o se incurrió en algún otro error. Con respecto a los comparadores axiales es posible que no retomen el valor de inicio y esa diferencia se justifica en el posible corrimiento del eje.
8. Se obtienen finalmente los valores del giro completo (Fig. 54)

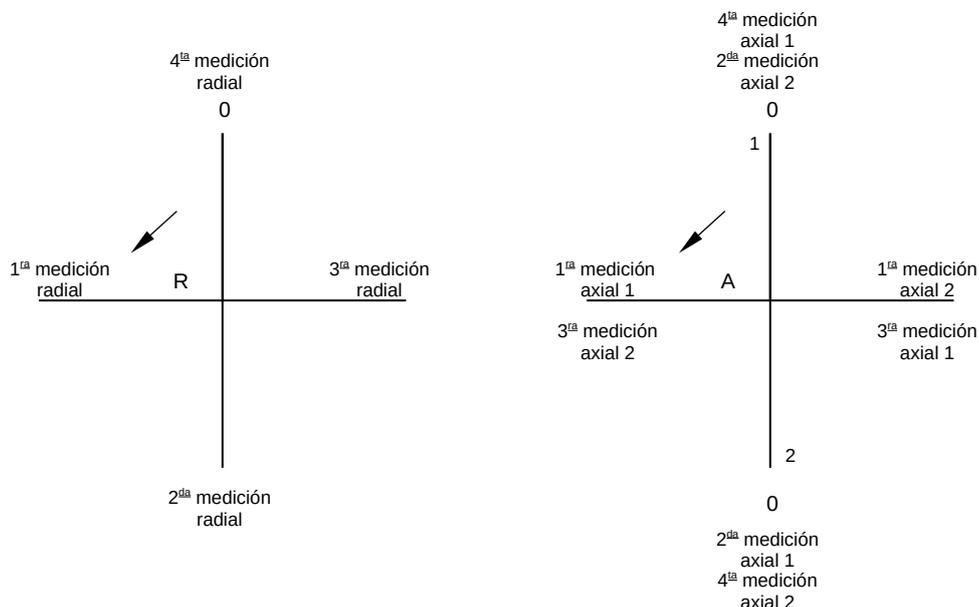


Figura 54. Valores medidos por los comparadores en una vuelta completa

9. Se realizan los promedios de las mediciones axiales. Esto está motivado en que al girar los rotores se verifica un desplazamiento axial a pesar de la existencia de los topes. Promediando dichos valores se elimina la fuente de error que presentaría la medición con un único comparador en posición axial.
10. Entre los puntos opuestos, se toma como el cero de referencia el menor (con su signo) y se hace la diferencia entre su opuesto y el mismo, obteniéndose la desalineación radial y axial del eje. De esta forma se logra trabajar con valores positivos, para omitir el signo negativo que puede dificultar la interpretación de los valores registrados.
11. Se analizan los datos conociendo la tolerancia de desalineación: 0,05 mm en el radial y 0,01 mm en el axial. En este ultimo caso se busca que la desalineación sea lo menor posible o casi nula.
12. Para la corrección de la alineación se realizan cálculos trigonométricos. Con estos se obtienen las modificaciones requeridas a efectuar sobre suplementes de cada uno de los panes de los cojinetes. En el horizontal no se agregan ni se quitan suplementos sino que se intercambia la posición de los mismos entre cada "pan", para no alterar el apoyo de estos a sus respectivos asientos. En el vertical el trabajo es distinto ya que se agregan o quitan suplementos según requerimiento.

Cálculos trigonométricos

Los cálculos utilizados para la alineación de los ejes tienen sus bases matemáticas en la trigonometría. Sólo tienen validez para pequeños ángulos, lo que equivale a decir que:

$$\text{tg } \alpha \approx \alpha$$

Se considera al eje a corregir compuesto por tres líneas rectas (1 eje + 2 bridas) el cual puede "pivotar" en dos puntos correspondientes a sus respectivos cojinetes. Debido a las hipótesis adoptadas, este cálculo es una aproximación de la realidad, aunque presenta una elevada precisión, obteniendo resultados satisfactorios, avalados en el tiempo.

Como guía se cuenta con un esquema de los parámetros involucrados: distancias, radios de bridas, desalineación axial y radial. El mismo se utiliza para correcciones en el plano horizontal y el vertical. En esta oportunidad detallamos el esquema correspondiente al rotor BP (Fig. 55) tomando como "pivote" al cojinete N° 3.

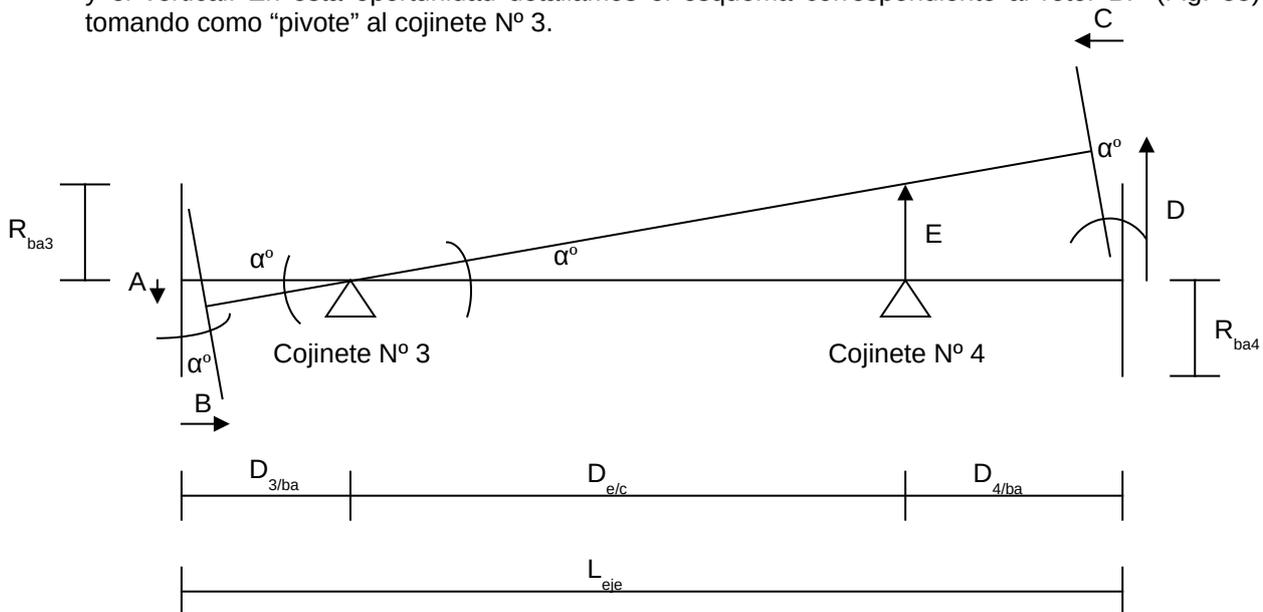


Figura 55. Cálculos trigonométricos para alineación

De aquél deriva la siguiente expresión matemática:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{E}{D_{e/c}} = \frac{D}{D_{e/c} + D_{4/ba}} = \frac{A}{D_{3/ba}} = \frac{B}{R_{ba3}} = \frac{C}{R_{ba4}}$$

Donde:

- | Variables de alineación | Dimensiones necesarias - Rotor BP |
|---------------------------------|---|
| • A → diferencia radial brida 3 | • $D_{e/c}$ = 3260 mm → distancia entre cojinetes |
| • B → diferencia axial brida 3 | • $D_{3/ba}$ = 675 → distancia cojinete N° 3 a brida |
| • C → diferencia axial brida 4 | • $D_{4/ba}$ = 870 mm → distancia cojinete N° 4 a brida |
| • D → diferencia radial brida 4 | • R_{3ba} = 200 mm → radio brida acoplamiento 3 |
| • E → modificación cojinete | • $R_{4/ba}$ = 240 mm → radio brida acoplamiento 4 |
| • α → ángulo de desvío | • L_{eje} = 3935 mm → longitud eje BP |

La utilización de la expresión implica establecer en cuanto se desea corregir la desalineación, o sea manipulando las variables A, B, C y D, las cuales fueron obtenidas por medio de los comparadores. Con esto se calcula el valor E, o sea, en cuanto se deben modificar los suplementos de los cojinetes. Es muy probable que este último número no corresponda a un espesor de suplemento estandarizado. Por este motivo se debe seleccionar una chapa de espesor conocido y cercano a dicho valor - E - para luego calcular los efectos que produce la utilización de ésta sobre las primeras variables. La alineación no sólo implica modificaciones sobre un sólo cojinete, por lo que se debe repetir el procedimiento usando como pivote el otro cojinete. Los movimientos son lineales, por lo que utilizando el principio de superposición se puede trabajar sobre sendos cojinetes por separado, para después verificar el efecto final óptimo sobre en el posicionamiento del eje. A esta condición se llega a partir de sucesivas iteraciones realizadas para encontrar la mejor combinación de suplementos a fin de cumplir con las tolerancias establecidas.

Las variantes se analizan a través de planilla de cálculo (Excel) diseñada por el Jefe de Mantenimiento" la cual posee los parámetros dimensionales de cada uno de los ejes.

Por último destacamos dos cuestiones: la conveniencia de fijar, en principio, valores nulos de desalineación axial y luego analizar el efecto sobre los parámetros radiales. Esto se justifica por el hecho de que las diferencias axiales se manifiestan con mayor intensidad de vibraciones en régimen de funcionamiento.

EJEMPLO: Alineación Rotor BP de Turbina de Vapor N° 7 correspondiente al 15/06/2007

1. Se comenzó presentando los tres comparadores sobre la brida de acople de los ejes AP – BP con la base magnética apoyada en este último. Se realizó una precarga de 3 vueltas (3 milímetros) sobre los mismos.

Nota: El lenguaje utilizado se traduce en centésimas de milímetro.

2. Siguiendo el procedimiento explicado se obtuvieron, luego de una vuelta completa, todas las mediciones necesarias (Fig. 56) para verificación del grado de desalineación. Claramente queda apreciado que el comparador radial y el axial N° 1 retornaron a su valor inicial, mientras que el axial N° 2 sufrió una variación de una centésima de milímetro.

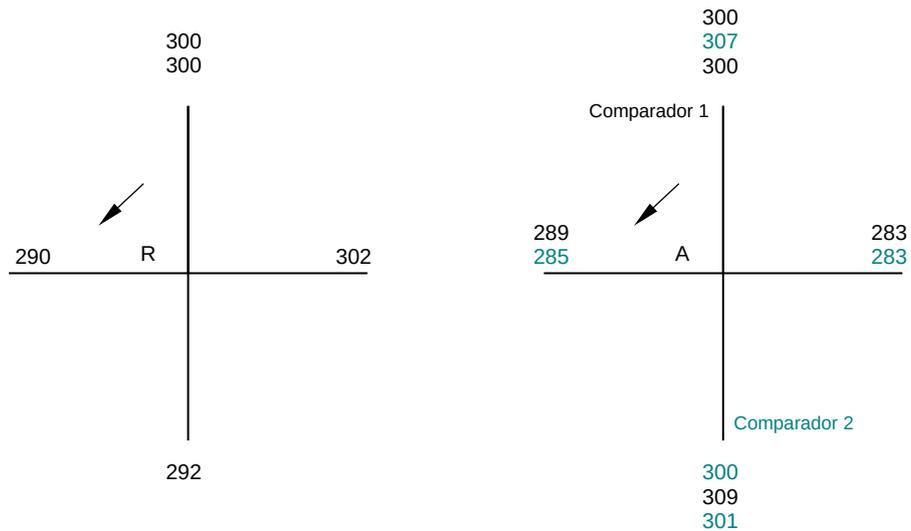


Figura 56. Valores medidos por los comparadores en una vuelta completa

- Se realizaron los promedios de los valores obtenidos, por cada comparador axial, correspondiente a los extremos de la cruz (Fig. 57).

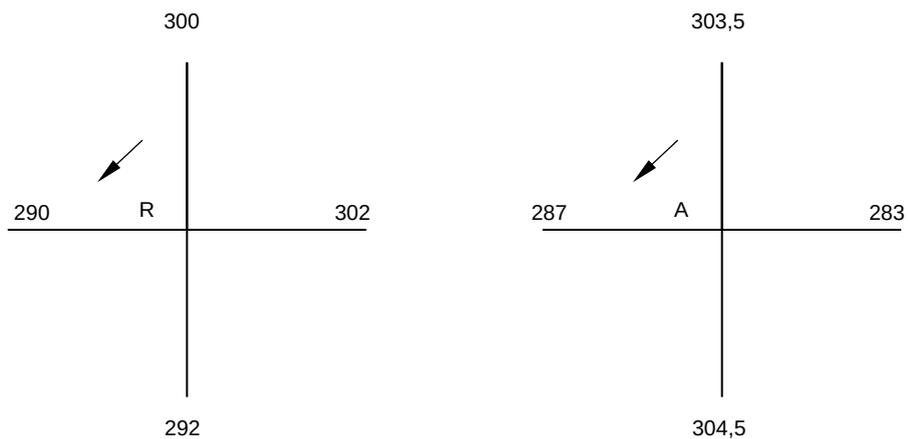


Figura 57. Promedios obtenidos

- Se tomó como referencia el menor de los dos valores y se calculó la diferencia entre su opuesto y aquél (Fig. 58), con lo cual se llegó a la desalineación final relativa entre los ejes.

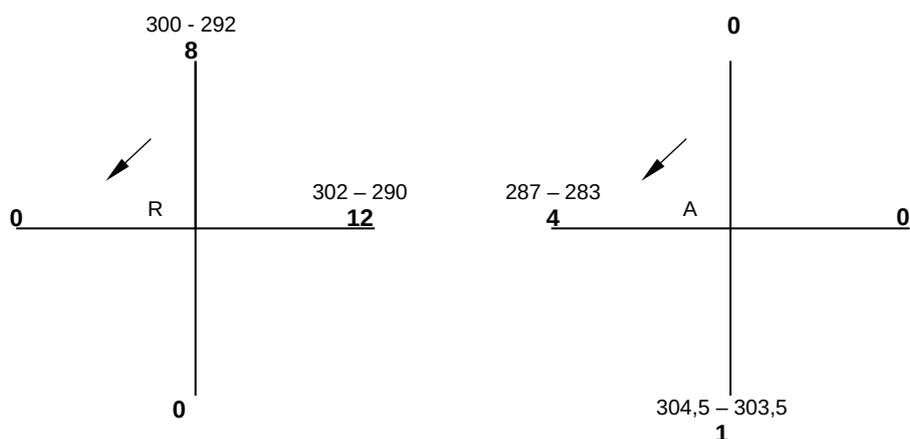


Figura 58. Posición final relativa de los ejes

Una vez que se obtuvieron dichos valores finales se procedió a la interpretación de los resultados obtenidos. Para ellos se tuvo en cuenta el extremo sobre el cual se apoyaron los vástagos móviles de cada comparador, de manera de conocer la condición de carga o descarga de los mismos según el lado sobre el cual se encontraba apoyado, y así deducir la orientación relativa de los ejes.

5. Conociendo éstas variables, se interpretaron los valores obtenidos de la siguiente manera

Alineación radial

En el vertical se observó una carga neta de 0,08 mm sobre el extremo superior del eje AP, lo cual significa que el éste se encontraba más alto que el eje BP.

En el horizontal se observó una carga neta de 0,12 mm sobre el lado derecho visto desde cuerpo AP, lo cual significó que el eje BP se encontraba desplazado radialmente hacia la izquierda.

Alineación axial

En el vertical se obtuvo una carga neta de 0,01 mm sobre el extremo inferior del eje AP, lo que significó que el eje BP estaba abierto en dicho valor sobre el extremo inferior, considerando al eje AP en posición puramente vertical.

En el horizontal, se observó una carga neta de 0,04 mm sobre el lado izquierdo visto desde cuerpo AP, lo que significó que el eje BP estaba abierto en ese valor sobre aquél lado, considerando el eje AP horizontal.

Todos los valores resultantes se reunieron para una mejor interpretación de los resultados (Fig. 59). La lectura se realizó observando los valores desde el cuerpo de AP hacia el BP.

Alineación	Plano vertical	Plano horizontal
RADIAL		
AXIAL		

Figura 59. Posición relativa entre rotores AP - BP

Corrección

Con respecto a la corrección hay que aclarar que los valores medidos y las correspondientes tolerancias indican el grado de desalineación y no las modificaciones que se deben realizar sobre los suplementos.

De esta manera, se hacen las correcciones sabiendo que el valor de desalineación total se considera referido a un cero colocado en uno de los extremos, por lo que el movimiento de corrección corresponde a la mitad del grado de desalineación.

Se dice que: "Para anular un grado de desalineación de 10, debo corregir en 5".

En aquella oportunidad los parámetros fuera de tolerancia fueron los correspondientes al radial horizontal y vertical; y al axial horizontal. Por ende se debió proceder a la corrección pertinente.

6. Se realizó el cálculo de suplementos a colocar y/o extraer en los panes verticales de los cojinetes N° 3 y 4; y el cálculo de la variación de la posición de los suplementos correspondientes a los panes laterales. Para esto se tuvo en cuenta el largo total del eje, distancia entre cojinetes, distancias de los cojinetes a las bridas de acople, y los diámetros éstas.

Por cuestiones geométricas, una corrección radial incide de manera proporcional sobre la alineación axial, siendo ésta última más notoria a medida que es mayor la distancia al punto de corrección.

Luego de que se realizaron las correcciones derivadas de los cálculos, se tomó nuevamente la medición de alineación de los ejes, y se comprobó que los valores finales quedaron por debajo de los valores máximos admisibles.

Medición diafragmas de AP y BP

Al igual que en los cojinetes, los diámetros interiores de los diafragmas de AP y BP son verificados mediante micrómetro para interiores, para así también tener una referencia de la deformación de los mismos (Fig. 60). Todos los valores se registran con el fin de poder reproducir los mismos, en la etapa de alineación de los estadios, con el eje postizo.

Los diafragmas se apoyan sobre pedestales metálicos prefabricados.



Figura 60. Medición vertical diafragma rueda N° 12 - BP

La medición de los diámetros que se realiza mediante el micrómetro para interiores (Fig. 61) responde al mismo procedimiento de medición que se lleva en los cojinetes. Se apoya el instrumento sobre el peine o pan de acuerdo al diseño del sello en cuestión.

Otra de las verificaciones que se hacen, es la del correcto apoyo entre ambas mitades de los diafragmas. Mediante sondas se verifica la inexistencia de luz y en caso de que esta exista se debe eliminar. Para esto se utilizan limas y telas esmeriles. Las posibles diferencias que podrían aparecer son del orden de las centésimas de milímetro.



Figura 61. Posición del micrómetro

Alineación con "eje postizo"

Como se expresó precedentemente, se coloca un "eje postizo" para el centrado de la carcasa de AP y de los diafragmas (estadios en Project) de los cuerpos de AP y BP.

El dispositivo esta compuesto por un caño hueco, en el cual se apoya la base magnética del comparador. El caño o postizo se apoya en sus extremos sobre bases de sujeción. Estas están provistas de rodamientos para facilitar el giro del postizo.

El objetivo es centrar el eje postizo en la misma posición que ocuparía el eje real de AP o BP según sea el caso; mejor dicho en la posición sobre la cual se alinearon los tres ejes característicos de la turbina. Esto esta motivado por la imposibilidad de hacer esta tarea directamente con los ejes reales.

Para cumplir este objetivo se tiene como referencia los cojinetes N° 1 al 4. Se debe reproducir en el postizo las mediciones registradas entre gorriones y cojinetes para asegurar que el postizo este centrado. Hay que recordar que la toma de alineación se hace con el gorrón del eje apoyado sobre su cojinete (Fig. 62), por ende las lecturas que se deben hacer sobre el comparador dispuesto radialmente para asegurar el centrado son las siguientes:

- 0 (cero) → lectura inferior
- Similar valor → lecturas horizontales
- Luz total → lectura vertical

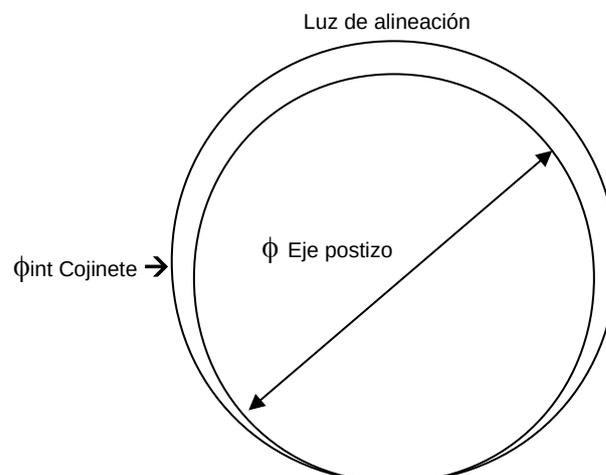


Figura 62. Medición diámetro de cojinetes

Una vez centrado el eje en función de la posición de los cojinetes se hacen los siguientes trabajos:

- Se alinean los estadios a bases.
- Se registran los valores, que otorga el comparador, sobre las bocas de carcasa (Fig. 63);
- con éstos se alinea la carcasa de AP;
- y también se alinea el eje postizo a las tapas de AP y BP para montar los respectivos estadios.
- Otra de la utilidad es para el posicionamiento de las cajas laberínticas (Fig. 64).



Figura 63. Registro de valores sobre boca de AP



Figura 64. Centrado laberintos AP

Para el posicionamiento final de los estadios a sus respectivos cuerpos (Fig. 65) se cuenta con “tetones”, que son salientes de material. Cada estadio posee cuatro de dichos puntos de apoyo a los cuales se les puede cambiar su altura (lima o relleno de soldadura) según sea requerido. En función de los movimientos necesarios para la alineación de los estadios se verifica el correcto apoyo de los tetones mediante tinta “Azul de Prusia”



Figura 65. Centrado diafragmas (base) de AP

Apriete espárragos de cuerpos de AP y BP

El apriete de los espárragos de los cuerpos de AP y BP (parte caliente), debe hacerse en caliente, debido a la condición de hermeticidad que se requiere, a causa de que éstos trabajan a una elevada temperatura. De esta manera, calentando dichos espárragos, se llega al ajuste necesario para cumplir con la compacidad requerida.

Considerando que la unión espárrago y junta debe tener una perfecta hermeticidad, la misma deberá tensarse previamente. Para esto se aprieta el espárrago con una determinada fuerza de apriete o preajuste F_a , dicha fuerza se supone que no excede el rango elástico, provocando una deformación positiva en el espárrago y una deformación negativa (comprimiendo) sobre la junta, dependiendo éstas de los módulos de Young de ambos elementos.

Las mismas se pueden graficar, aplicando la carga F_a , sobre un diagrama Carga en función de la Deformación (Fig. 66).

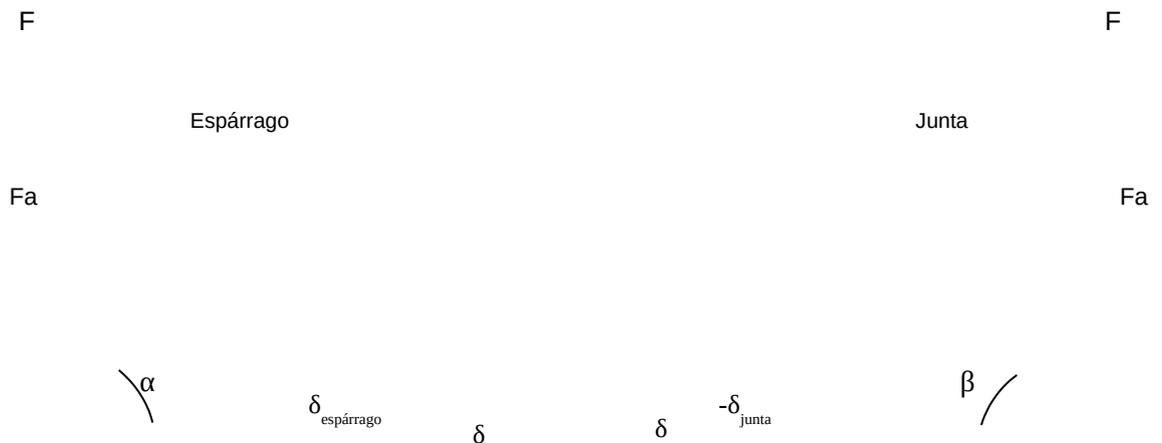


Figura 66. Diagrama Carga – Deformación espárrago y junta

Cuando la turbina entra en servicio, la carga adicional P que reciben los espárragos y la junta son evidenciados produciendo una deformación positiva adicional sobre el espárrago $\Delta\delta_{\text{espárrago}}$ y una deformación positiva $\Delta\delta_{\text{junta}}$ igual a la anterior, es positiva ya que las juntas tienden a separarse debido a dicha carga. Por ello pueden superponer ambas curvas en un mismo gráfico (Fig. 67).

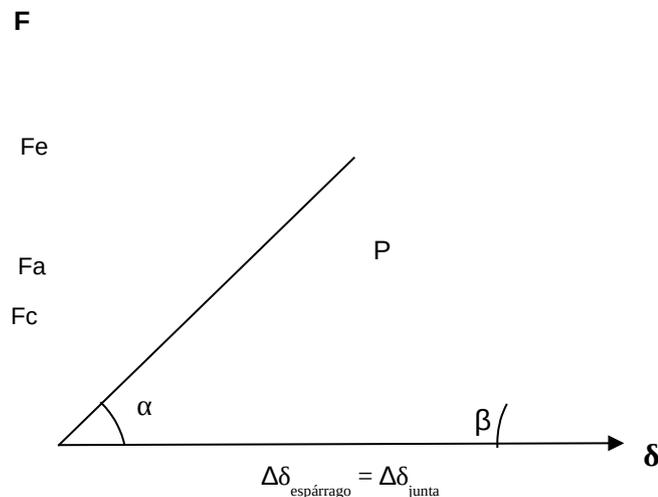


Figura 67. Diagrama Carga – Deformación de espárragos y junta

Como se observa, la fuerza adicional se suma a la fuerza de preajuste, obteniendo la fuerza total F_e . También se observa que la fuerza que subsiste en la unión luego de la deformación es F_c , llamada fuerza permanente.

El hecho de calentar los espárragos, provoca la disminución de la tensión de fluencia del material de los mismos, provocando también el incremento del módulo de elasticidad o módulo de Young, por lo que la deformación será mayor (Fig. 68). Así, se consigue una fuerza de apriete mayor sobre los espárragos ($F_{acaliente} > F_a$), aumentando también la fuerza permanente sobre los mismos luego de aplicada la carga P que tiende a separar a las tapas de sus respectivas bases ($F_{ccaliente} > F_c$).

En el momento de soltarlos, se deben calentar también debido a dicho ajuste.

F

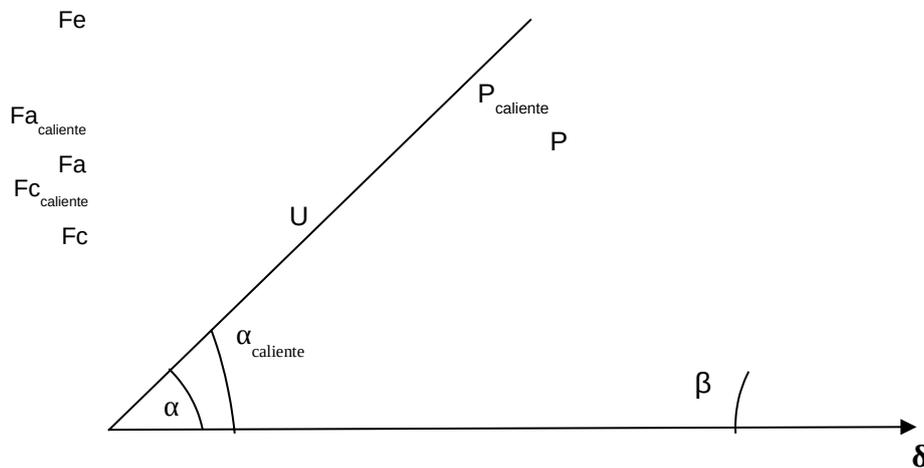


Figura 68. Variación del módulo de Young del espárrago. Aumento de F_a y F_c

El apriete de tornillos bajo carga puede ocasionar en ciertos aceros la corrosión de la rosca. También, en un perno requerido por la tracción, se puede traspasar el límite de fluencia a causa de las importantes tensiones de torsión, que se superponen al efectuar el apriete. Por estos motivos, todos los tornillos de material resistente al calor (12 % Cr), de más de 30 mm. de diámetro, así como todos aquellos fabricados con aceros de baja aleación, de más de 90 mm. de diámetro, deberán calentarse antes de apretarlos y de soltarlos.

De esta manera, el apriete de los espárragos de los cuerpos de AP y BP (parte caliente), se realiza en función de los siguientes ítems:

1. Un dispositivo de calentamiento
2. Un dispositivo de medición
3. Apriete necesario de los espárragos

1. Dispositivo de calentamiento

Este dispositivo (Fig. 69) se encuentra alimentado con aire comprimido circulando por una serpentina que es calentada mediante autógena. El aire caliente se introduce por medio de una tobera en el orificio de medida del tornillo.

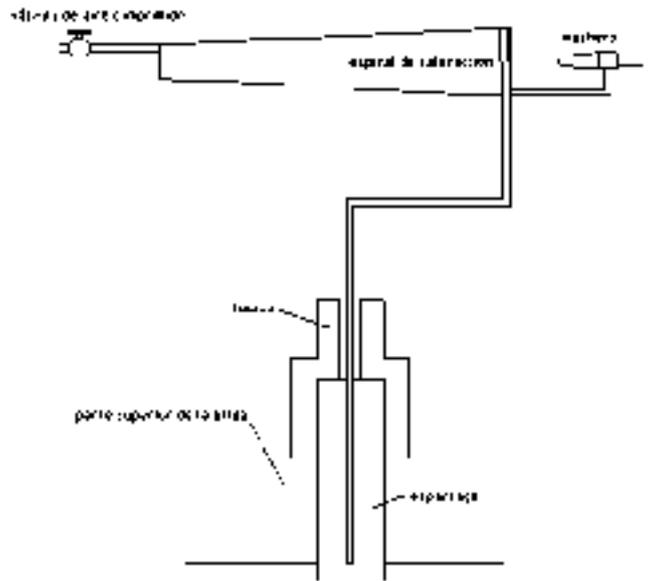


Figura 69. Dispositivo de calentamiento

2. Dispositivo de medición

Este dispositivo (Fig. 70) consta de un comparador fijado a un vástago de medición, así como un casquillo, que se atornilla en el orificio del espárrago.

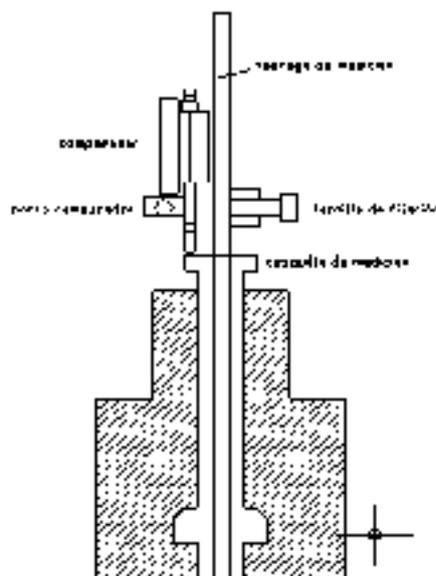


Figura 70. Dispositivo de medición

3. Apriete necesario de los espárragos

Para esto se tiene en cuenta la dilatación de los tornillos expresada por la siguiente fórmula:

$$Dilatación = \frac{l + (d / 2)}{1000}$$

Donde

l = medida teórica para la dilatación (espesor de la brida + arandela)
 d = diámetro exterior de la rosca del espárrago

De acuerdo a la dilatación necesaria por los espárragos, se calcula el paso circunferencial sobre la tuerca que se debe apretar para aquella dilatación necesaria. Entonces se obtiene según las dimensiones de los espárragos y tuercas los pasos circunferenciales a apretar sobre las tuercas de AP (Tabla 11) y de BP.

Nº tuerca	Diámetro [mm]	Largo a estirar [mm]	Radio más largo [mm]	Estiramiento [mm]	Giro sobre la tuerca [mm]
1 a 569,52	224	+35,75	=258,750	264	96
69,52	402	+34,75	=274,750	286	0779,52
45	245	+39,75	=284,750	296	5879,52
92	292	+39,75	=331,750	347	0979,52
95	295	+39,75	=334,750	347	010-11-1299,53
134	1	+49,75	=390,750	399	513-1499,53
173	17	+49,75	=366,750	379	015-1699,53
40	340	+49,75	=389,750	399	51779,52
94	294	+39,75	=333,750	347	0

Tabla 11. Apriete de tuercas tapa AP

Para el ajuste necesario de cada uno de los espárragos se comienza apretando a mano todas las tuercas a sus respectivos espárragos, con la asistencia llave de golpe. Previamente se coloca sobre la rosca de los espárragos grasa resistente a las altas temperaturas. Luego, se aflojan y se vuelven a ajustar pero golpeando con masa la llave de golpe. Terminada esta etapa se sigue el ajuste mediante la llave hidráulica HYTORC, sabiendo el giro necesario que se debe realizar sobre cada espárrago. El mecanismo utilizado para verificar dicho giro es el siguiente:

- Se cuenta con anillos que tienen la función de abrazar circunferencialmente a la tuerca, los cuales cuentan con un brazo que sirve de guía sobre la tuerca contigua
- Sobre dicha tuerca se marca el giro circunferencial necesario a recorrer por la guía, colocando la punta del brazo en el comienzo de la marca realizada
- Se coloca la llave hidráulica HYTORC sobre la tuerca a apretar, para comenzar con el ajuste
- Se observa el giro necesario, verificando que el brazo del anillo recorra el giro señalado en la tuerca contigua

Balanceo de Rotores

Uno de los requerimientos necesarios del "Mantenimiento Programado" de la turbina, es el balanceo de los rotores AP y BP. En estos dos se manifiesta fuertemente el desgaste producto de las horas de funcionamiento. Caso contrario es el del alternador, que sólo requiere de este trabajo bajo ciertas condiciones que luego serán abordadas posteriormente.

Dicho trabajo es tercerizado generalmente a empresas capitalinas. La duración total del trabajo es de dos semanas laborales aproximadamente, incluyendo el transporte de cada uno de los rotores y contemplando trabajos adicionales sobre éstos. Como ejemplo de dichos trabajos citamos la rectificación de las "chapas jotas" de sellos laberínticos.

Se hará una breve introducción del balanceo y luego se explicará el método utilizado, denominado "Método de los dos planos".

Introducción

El desbalanceo puede ser definido como la no coincidencia del eje de rotación y el eje longitudinal principal de inercia del rotor. Este eje, une todos los centros de gravedad de cada una de las infinitas secciones transversales que componen al rotor, que al no coincidir con el eje de rotación podrán inducir cuatro tipos de desbalanceo, en virtud de los cuales habrá que decidir cómo balancear el rotor.

Los tipos de desbalanceo son (Fig. 71):

- Desbalanceo estático
- Desbalanceo par
- Desbalanceo casi estático
- Desbalanceo dinámico

a) Desbalanceo estático

El eje longitudinal principal de inercia del rotor está desplazado paralelamente con respecto al eje de rotación.

b) Desbalanceo par

El eje longitudinal principal de inercia del rotor intercepta al eje de rotación en el centro de masas del propio rotor.

c) Desbalanceo casi estático

El eje longitudinal principal de inercia del rotor intercepta al eje de rotación en un punto arbitrario, o sea, un punto que no coincide con el centro de masas del propio rotor.

d) Desbalanceo dinámico

El eje longitudinal principal de inercia del rotor intercepta al eje de rotación y tampoco es paralelo a éste.

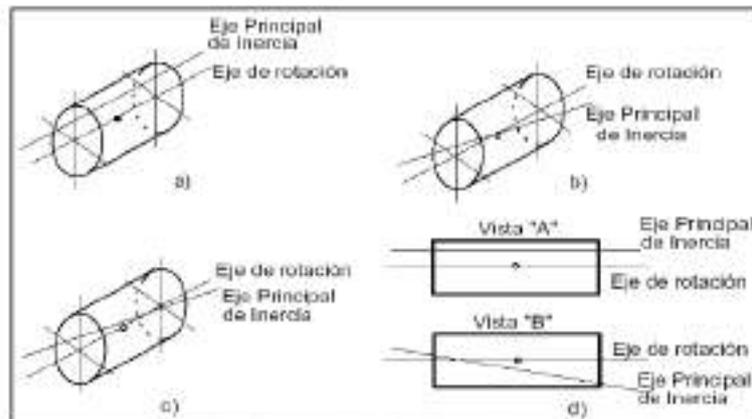


Figura 71. Tipos de Desbalanceo.

El desbalanceo produce vibraciones que aceleran el desgaste en los cojinetes y se transmiten a otras partes del equipo donde también pueden provocar fallas.

El mismo se produce como consecuencia de una distribución desigual en la masa de los elementos rotantes. Se logra agregando o quitando masas en ciertas posiciones angulares sobre el rotor disminuyendo así la carga dinámica sobre los cojinetes y aumentando la vida útil de la máquina, es decir que a través del agregado o extracción de pequeños pesos de corrección, se pueden reducir las fuerzas de inercia y obtener una rotación sin generación de vibraciones excesivas en los cojinetes.

La calidad del balanceo depende de tres factores:

1. capacidad de la máquina balanceadora
2. configuración del rotor
3. diseño de las herramientas

De esta manera, las ventajas al mejorar la calidad del balanceo son:

- reduce el desgaste interno de sellos y cojinetes de la turbina
- reduce la probabilidad de fallas por fatiga en los cojinetes
- reduce la transmisión de vibraciones a fundaciones
- reduce los requerimientos de robustez estructural

Como se ha mencionado anteriormente, los rotores AP, BP, y el del alternador se balancea según el “Método de los dos planos”.

Método de balanceo en dos planos

Como los rotores tienen su masa distribuida longitudinalmente, se debe hablar de balanceo en dos planos, el cual se presenta bajo dos formas:

- a) desbalanceo de rotores rígidos
- b) desbalanceo de rotores flexibles

El rotor puede considerarse como rígido o flexible según sea su velocidad de rotación. Para $\omega \geq 50$ % de la primera velocidad crítica de un rotor, la distribución de masa del mismo es posible que tienda a deformarlo de manera flexible.

En este caso, considerando que la velocidad de rotación de los ejes en régimen es de 3000 RPM y según datos técnicos de la máquina, se tiene que:

Rotor	$\omega_{crítica}$ [RPM]
• Alta Presión →	2483
• Baja Presión →	2319
• Alternador →	1710

Se deduce que se debe balancear de acuerdo al criterio de rotores flexibles.

En este caso la distribución axial de desbalanceo tiende a excitar diferentes formas modales del rotor dependiendo de la velocidad del mismo, y de la forma y rigidez del soporte.

En los talleres donde se envían los rotores a balancear, se balancean en máquinas balanceadoras a $\omega = 300$ RPM, por lo que aquí se estaría por debajo del 50% de la velocidad de rotación crítica, se consideraría al rotor como rígido. Cuando la máquina alcanza la velocidad de régimen se desbalancea, entonces habrá que corregir el balanceo para esta condición.

El procedimiento seguido en el taller es:

1. Se coloca el rotor en la máquina balanceadora, teniendo en cuenta la velocidad de la misma a la cual se balanceará el mismo.
2. Se eligen dos planos de balanceo, planos I y II (Fig. 72)
3. Se mide vibraciones en módulo y fase en ambos planos sin peso de prueba

4. Se coloca un peso de prueba en el plano I y se mide la amplitud de velocidad de vibración y fase en ambos planos.
5. Se coloca el peso de prueba en el plano II y se toma la amplitud de velocidad de vibración y fase en ambos planos.

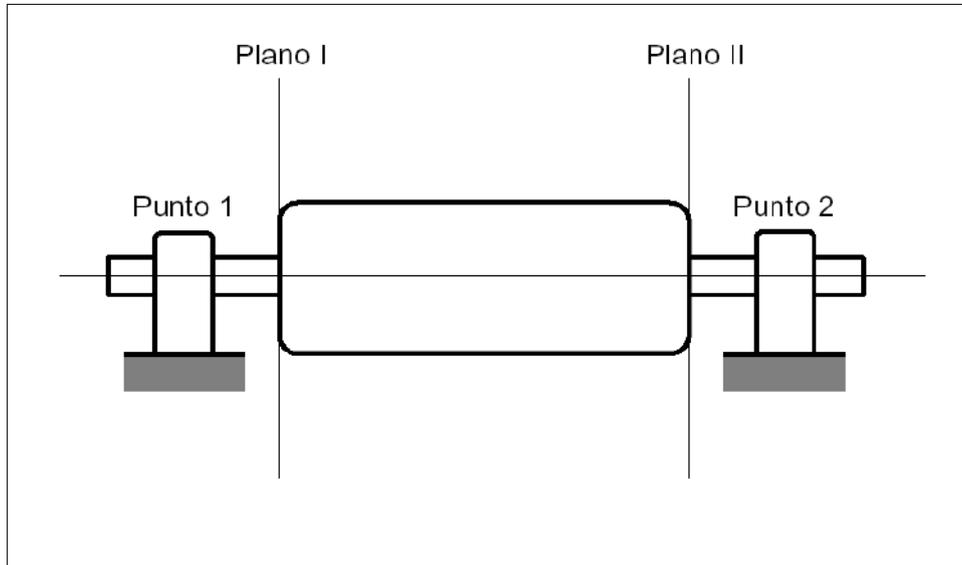


Figura 72. Planos de Balanceo y puntos de medición

Se obtienen seis pares de valores de amplitud y fase de vibración (Tabla 12), tres por cada uno de los planos según masas de pruebas.

MASA DE PRUEBA	PLANO I	PLANO II	INGUNAV	1,0 α	0,1V
2,0 α	0,2	PLANO IV	1,1 α	1,1V	2,1 α
1,2	PLANO IIV	1,2 α	2,1V	2,2 α	2,2

Tabla 12. Pares de valores medidos sobre los planos I y II

Actualmente las empresas dedicadas al balanceo de máquinas rotativas disponen de procesadores DSP (procesador digital de señales) y otros, que procesan automáticamente la señal, la filtran dejando pasar solamente el desbalanceo, hace controles de coherencia de valores, y los almacena automáticamente. Luego de efectuar las seis lecturas mencionadas, muestra el resultado del cálculo automáticamente:

- Peso a colocar
- Ángulo de ubicación de los pesos sobre cada uno de ellos

Una vez obtenidos los valores dados por el programa en cuanto al peso y ángulo a colocar en cada plano se verifica el desbalanceo, para ello se debe inferir si el mismo se encuentra dentro de un nivel aceptable.

Por ello, existen una serie de recomendaciones para aceptar como normales las vibraciones producidas por el rotor con cierto grado de desbalanceo. Los fabricantes de máquinas o los usuarios de éstas generalmente indican los límites permisibles para la condición de desbalanceo, pero en ausencia de estas recomendaciones, se utilizan las llamadas normas de severidad.

Existen tablas para la determinación del grado de calidad del balanceo según el tipo de máquina dadas por las normas ISO 1940/1, VDI 2060, ASME, etc. (tabla 13).

CALIDAD DEL BALANCEO	$(e_{per} \times \omega)$ en [mm/s]	TIPO DE ROTOR
G4000	4000	Cigüeñales de motores (diesel) marítimos de bajas revoluciones, montados sobre soportes rígidos y con un número de cilindros impar.
G1600	1600	Cigüeñales de motores de dos tiempos montados sobre soportes rígidos.
G630	630	Cigüeñales de motores de cuatro tiempos montados sobre soportes rígidos. Cigüeñales de motores (diesel) marítimos montados sobre soportes elásticos.
G250	250	Cigüeñales de motores (diesel) de cuatro cilindros y de alta velocidad, montados sobre soportes rígidos.
G100	100	Cigüeñales de motores (diesel) de seis o más cilindros y de alta velocidad. Cigüeñales de motores de combustión interna (gasolina, diesel) para carros y ferrocarriles.
G40	40	Ruedas y llantas de carros. Cigüeñales de motores de cuatro tiempos de alta velocidad (gasolina, diesel) sobre soportes elásticos y con seis o más cilindros.
G16	16	Ejes de propelas, ejes de transmisiones cardánicas. Elementos de máquinas agrícolas. Componentes individuales de motores (gasolina, diesel) para carros y ferrocarriles. Cigüeñales de motores de seis o más cilindros bajo requerimientos especiales.
G6.3	6.3	Elementos de máquinas procesadoras en general. Engranajes para turbinas de usos marítimo. Rodillos para máquinas papeleras. Ventiladores. Rotores de turbinas para la aviación. Impelentes para bombas. Máquinas herramienta. Rotores de motores eléctricos.
G2.5	2.5	Turbinas de gas y de vapor. Rotores rígidos para turbo generadores. Discos para computadoras. Turbo compresores. Bombas operadas por turbinas.
G1	1	Grabadoras de cinta magnética y tocadiscos convencionales. Máquinas trituradoras.
G0.4	0.4	Discos compactos, brocas, barrenas. Giróscopos.

Tabla 13. Grado de calidad del balanceo según ISO 1940/1

Como la máquina balanceadora gira a una velocidad de 300 RPM, habrá que tener en cuenta la corrección para 3000 RPM, ya que es la velocidad de régimen de la turbina. De esta manera, se ingresa al gráfico de desbalanceo residual admisible vs. Velocidad máxima en RPM, procediendo de la siguiente manera:

1. conociendo la velocidad de régimen de la turbina, se ingresa teniendo en cuenta el grado de calidad según el tipo de máquina. En el caso de una turbina de vapor es G2.5.
2. en el punto donde corta con la recta de grado de calidad, y proyectando sobre el eje de ordenadas, se obtiene el desbalanceo residual admisible por masa del rotor.
3. se verifica que el módulo del vector resultante de desbalanceo se encuentre dentro del valor máximo aceptable de desbalanceo residual admisible.

Esto significa que si el vector resultante de desbalanceo es menor que el vector de desbalanceo residual admisible, el rotor se encuentra balanceado dentro de los valores admisibles y se encuentra balanceado correctamente.

Ejemplo Balanceo Rotor de Baja Presión Turbina de Vapor N° 7

El trabajo fue realizado por una empresa de Capital Federal, correspondiente a una reparación efectuada en rotor BP de TV N° 7, el día 8/06/2007. La misma se encarga se emitir el certificado de balanceo (Fig. 73) a fin de constatar los resultados. Igualmente el trabajo es supervisado por personal de planta.

CERTIFICADO DE BALANCEO				
ROTOR A BALANCEAR : TURBINA DE BAJA PRESION				
DISPOSITIVO : A		EMPRESA : Centrales de la Costa Atlántica S.A		O / R :
BALANCEADORA : SCHENCK – H 60 – UV				
TOLERANCIA DE BALANCEO: ISO / TC 108 (Q. Grado G-2,5) = 2200 grs. pulgada total				
VELOCIDAD DE BALANCEO :				300 R.P.M
DIBUJO DEL CONJUNTO A BALANCEAR				
				
PLANO	DESBALANCEO	PESO AGREGADO	POSICIÓN ÁNGULO	DESBALANCEOS RESIDUALES
# 1	1792 grs. pulg. 179 grados	80 grs.	179 grados	56 grs. pulg. 330 grados
# 2	11677,05 grs. pulg. 155 grados	693 grs.	155 grados	25,27 grs. pulg. 320 grados
REALIZADO POR :			CERTIFICADO POR :	
.....			
FECHA : 8/06/2007.....				

Figura 73. Certificado de balanceo – Rotor BP TV N° 7

Marca: BROWN BOVERI – ESCHER WYSS
 Modelo: VTH 800 + 3018
 Peso aproximado: 7360 Kg.
 Velocidad: 3000 RPM

NOTA: PESOS EXISTENTES EN PLANO # 2: 1332,5 grs. a 117 grados. LOS MISMOS FUERON EXTRAÍDOS. SE MODIFICÓ ÁNGULO Y SE COLOCARON 693 grs. SOLAMENTE A 115 grados.

En base a los pesos a agregar obtenidos se verificará que los desbalanceos residuales sobre los planos # 1 y # 2, sean menores que los admisibles según normas ISO / TC 108, con grado de calidad G 2,5.

Dicha verificación se realiza ingresando en el gráfico dado por la norma ISO / TC 108 (Máxima velocidad de rotación vs. Desbalanceo residual admisible por unidad de masa del rotor).

De esta manera, el desbalanceo (\bar{D}) [$gr.mm./Kg.$]. se obtiene a partir de la velocidad de régimen de la turbina (3000 RPM), interceptando a la recta G 2,5. Proyectando sobre el eje de ordenadas se lee dicho desbalanceo. Según gráfica, para $n = 3000RPM$ y $G = 2,5$ se obtiene (Fig. 73):

$$\bar{D} = 8 \frac{gr.mm}{Kg} = 0.315 \frac{gr.inch}{Kg}$$

Conociendo el peso del rotor de baja presión de 7360 Kg. \Rightarrow el desbalanceo residual admisible es:

$$\bar{D} = 0.315 \frac{gr.inch}{Kg} \times 7360 Kg. \quad \bar{D} = 2318,4 gr.inch$$

En primer instancia, se puede apreciar que la medición del desbalanceo dio valores inadmisibles sobre el plano # 2, superior a \bar{D} .

Entonces, luego de efectuar el balanceo, los resultados superan a los valores resultantes arrojados en el balanceo, por lo tanto se balanceó el rotor dentro de las tolerancias admisibles.

0.000315

3000

Figura 73. Máxima velocidad de rotación vs. Desbalanceo residual admisible

Ensayos no destructivos

Los métodos de Ensayos No Destructivos (END) permiten obtener información de piezas o partes de una estructura metálica o no metálica, sin alterar sus condiciones de utilización o aptitud de servicio; es decir no provocan daños en el material, ni perjudican o interfieren con el uso futuro de las piezas o partes inspeccionadas.

Los métodos de END se aplican en diferentes etapas del proceso productivo, ya sea en el control de materia prima, durante el proceso de fabricación, así como en el ensayo final del producto y control en servicio.

De igual manera se puede decir, que si se aplica un método de END empleando un procedimiento inapropiado, puede generar condiciones que provoque daños en las piezas inspeccionadas.

Los END que se realizan, sobre componentes de las turbinas de vapor, son tres:

- Tintas penetrantes
- Partículas magnetizables
- Ultrasonido

A continuación se explicará brevemente los principios de éstos ensayos. Luego se detallará el tipo de ensayo realizado sobre cada uno de los componentes principales de la turbina de vapor.

Tintas penetrantes

La inspección por tintas penetrantes es utilizada para hacer que los defectos superficiales se vuelvan visibles en el material. Un líquido, el penetrante, es aplicado sobre la superficie de la pieza, dejando que se introduzca en las discontinuidades del material, esto ocurre debido al fenómeno de la capilaridad, que es la propiedad de penetración de un líquido en lugares extremadamente pequeños debido a sus características físico-químicas, tal como la tensión superficial de el líquido mencionado. Una vez removido el exceso, el penetrante atrapado en las discontinuidades es forzado a salir por medio de otra sustancia, el revelador, de esta manera se forma una indicación, que puede ser visualizada bajo luz común, si la tinta utilizada es de color rojo (inspección visible), o bajo luz ultravioleta (luz negra) si el líquido utilizado es fluorescente (inspección fluorescente). El análisis por tintas penetrantes permite distinguir fisuras del orden de 0,03 mm.

Como condición general, las piezas evaluadas y los elementos utilizados deben estar a una temperatura entre los 10 °C y los 38 °C.

La secuencia de ensayo puede dividirse en seis etapas u operaciones.

1- Limpieza y secado previo: es necesaria la limpieza previa de la superficie antes de la aplicación de la tinta, es decir que se encuentre libre de pintura o recubrimientos, y esté limpia, libre de arena, grasa óxido y aceite. Si la superficie de la pieza estuviera conteniendo aceites, grasas u otras suciedades que puedan obstruir la abertura de la fisura, la tinta no conseguirá penetrar en la fisura cuando es aplicada en la superficie.

La norma ASTM E 165 lista los siguientes métodos de limpieza:

- Detergentes
- Solventes
- Vapor
- Decapado (alcalino)
- Ultrasonido

Luego de la limpieza, se debe proceder al secado de la pieza a evaluar, para evitar la presencia de líquido en la fisura que pueda evitar el ingreso del penetrante en la discontinuidad o bien diluirlo.

2- *Aplicación de la tinta penetrante*: puede ser aplicada de varias maneras, es decir:

- Con pincel, para piezas grandes (ensayo total o parcial)
- Pulverización, para piezas grandes (ensayo total o parcial)
- Inmersión de la pieza, se utiliza en piezas pequeñas y normalmente se aplica en procesos de producción en serie.

Como se mencionó precedentemente, los líquidos ingresan en los defectos por capilaridad, por lo tanto necesitan un bajo ángulo de contacto y una adecuada tensión superficial. Las tintas penetrantes son diseñadas para obtener la máxima penetración, con ángulos de contacto próximos a cero.

Debe estar sobre la superficie por un período denominado tiempo de penetración, que es el tiempo necesario para que la tinta penetre en el interior de la fisura. Este tiempo en promedio varía entre 10 y 30 minutos.

3- *Remoción del exceso del penetrante*: luego la tinta debe ser removida de la superficie de inspección en forma completa para reducir el background. El modo como es realizada la remoción también es una forma de clasificación del tipo de tinta penetrante:

- lavable al agua: se remueve el exceso de líquido penetrante de la superficie a través de un lavado con agua. Este tipo de penetrante ya posee en su composición un aditivo emulsionante que facilita su remoción cuando entra en contacto con el agua.
- post emulsificable: el emulsificador tiene la función de tornar el penetrante lavable al agua, para entonces luego remover el mismo con agua de la superficie de inspección. Es el tipo de penetrante más sensible y más utilizado en el sector aeronáutico.
- removible al solvente: con la utilización de paños secos se remueve gran parte del exceso de la tinta, y luego con el mismo tipo de paño humedecido con solvente se remueve el resto del exceso. Este penetrante se torna bastante sensible cuando se aplica en superficies planas.

4- *Revelación*: es la etapa en que se forman las indicaciones sobre la superficie en inspección. La función del revelador es la de absorber hacia la superficie el resto del líquido penetrante que quedo contenido dentro de la discontinuidad (fisura) después de la etapa de remoción del exceso. Se presentan en cuatro formas básicas:

- reveladores en polvos secos
- reveladores acuosos
- reveladores húmedos no acuosos
- reveladores en película líquida

Siendo el más sensible el revelador no acuoso. Cuando el penetrante es del tipo rojo, se utiliza un revelador que forme una película bien blanca y más espesa, pues así el color rojo de la indicación revelada forma un excelente contraste con la película blanca del revelador. Cuando la tinta es del tipo fluorescente, el revelador utilizado (seco o acuoso) forma una película menos espesa, pero altamente absorbente, ya que el contraste visual en el momento de la inspección (realizado bajo luz ultravioleta y en cámara oscura) se debe dar entre la superficie de ensayo (levemente azulada) y el color bajo luz ultravioleta del penetrante que formó la indicación.

5- *Inspección e interpretación final*: la misma puede ser realizada bajo luz blanca o visible cuando la tinta es del tipo rojo, en este caso la incidencia de la luz visible en el punto de la inspección debe tener una intensidad luminosa de no menos de 1000 lux, según la recomendación de la norma ASTM E 1417.

En el caso del uso de tintas fluorescentes, la inspección final debe ser realizada bajo luz ultravioleta (negra) y en cabina oscura exenta de luz visible (luz común). En este caso la intensidad de la luz ultravioleta mínima exigida por la norma ASTM E 1417 es de 1000 uW/cm².

Ante la aparición de una indicación de falla, la misma debe ser clasificada y evaluada (tipo, tamaño, ubicación, orientación) para ser considerable aceptable o no aceptable. La señal aparece y crece, principalmente en ancho. Es posible evaluar con cierta precisión el largo de fisuras, pero es muy difícil evaluar las dimensiones restantes del defecto.

Naturaleza de los defectos: el tipo de defecto influye en su probabilidad de detección. El largo de la fisura se utiliza para definir el tamaño de defecto, sin embargo es el volumen de defecto lo que determina si éste será detectado. Si el volumen es suficientemente grande, la cantidad de penetrante atrapada producirá una indicación suficientemente grande como para hacer detectable o superar el umbral de fluorescencia.

Clasificación de los defectos: los defectos pueden ser clasificados de acuerdo a la norma ASTM E 433. Ésta provee los criterios de clasificación de defectos, los cuales pueden ser utilizados como referencia para criterios de aceptación, especificaciones o la realización de esquemas.

Los defectos son clasificados según tipos y clases de la siguiente manera:

Tipos

- **Tipo I:** en los que ninguna dimensión es mayor a 3 veces la otra
- **Tipo II:** en los que una dimensión es mayor a 3 veces la otra

Clases

- **A:** Simple
- **B:** múltiple desalineado
- **C:** múltiple alineado
- **D:** en intersección de superficies

6- Limpieza final de la superficie: el paso final es la limpieza del componente para eliminar los restos del penetrante y revelador que pudieran afectar procesos posteriores de fabricación o el servicio. Debe prestarse importancia a la posibilidad de corrosión producida por combinación del penetrante con otros elementos. La limpieza puede realizarse mediante enjuague con agua, vapor, solvente, baño ultrasónico, etc.

Partículas magnetizables

La técnica de partículas magnetizables (PM) es un método utilizado para la detección de defectos superficiales y sub-superficiales. La técnica utiliza campos magnéticos y pequeñas partículas magnetizables, comúnmente de hierro, para detectar defectos en elementos de máquina. El único requerimiento para realizar la inspección es que el material del componente sea ferromagnético, tal como hierro, níquel, cobalto y algunos otros.

El magnetismo es la propiedad de los materiales de atraer otras sustancias, tal es el caso de los imanes permanentes, en los cuales se distingue la presencia de un campo magnético que posee un polo norte y un polo sur, desde los cuales emanan las líneas de campo. La misma cantidad de líneas de campo que salen de un polo llegan al otro, y éstas no pueden ser cortadas por ningún medio.

Si una barra magnética se corta en porciones se obtienen tantos imanes pequeños como porciones. Si estos imanes más pequeños son vueltos a unir, los nuevos polos no desaparecen y se produce lo que se denomina "campo de fuga", el cual se origina en que la unión de los polos no es perfecta y, por lo tanto, el área de contacto real es menor que la aparente. La reducción de sección hace que las líneas de campo saturen los puntos de unión y aparezcan campos de fuga, producidos por las líneas de campo que no logran acomodarse en las áreas de contacto.

Una situación similar ocurre cuando un material magnético presenta una disminución de sección parcial producida por la presencia de una fisura. Si se depositan partículas de hierro sobre una superficie que posee un campo de fuga, las partículas serán atraídas hacia los polos generados en torno a las fisuras, esto da origen a la indicación, la cual es mucho más fácil de observar que la fisura misma, siendo ésta la base de la inspección por PM.

En general las piezas evaluadas por PM no son imanes permanentes, por lo tanto, para generar un campo de fuga a partir de las discontinuidades geométricas de una pieza es necesario magnetizarla. Para esto se debe disponer de un campo magnético en cual puede ser permanente (imán) o generado a partir de una bobina.

Detectabilidad de discontinuidades: para una correcta inspección debe considerarse la orientación relativa entre las líneas de campo y el defecto. La base del ensayo consiste en generar un campo de fuga, el cual debe ser puesto en evidencia por las partículas magnéticas.

La mayor distorsión de las líneas de campo o campo de fuga se produce cuando el defecto ocasiona la mayor disminución de sección al paso de las líneas de campo. Cuando la

orientación del mismo es paralela a las líneas de campo, no se producirá campo de fuga y el defecto no será detectado (figura x).

Esta característica hace que durante la inspección por PM la magnetización deba realizarse en diferentes direcciones, al menos dos ortogonales.

Medio revelador: El medio revelador es el elemento que permite observar la presencia de discontinuidades por acción de los campos de fuga. Los reveladores son pequeñas partículas de hierro y óxido de hierro a los cuales se les añaden pigmentos. Un buen medio revelador debe reunir las siguientes características:

- Propiedades magnéticas, alta permeabilidad y baja retentividad.
- Buena movilidad, aportada por una geometría adecuada, mezcla de partículas redondeadas y alargadas.

Las partículas magnéticas están disponibles en mezclas secas o húmedas.

I. Aplicación de las partículas.

- *Método residual:* se coloca la pieza en un campo y se retira. Luego, aprovechando el magnetismo residual se aplica el medio revelador y se observan las indicaciones.

- *Método continuo:* si la inspección se realiza con partículas secas se magnetiza y se coloca el medio revelador simultáneamente.

- II. *Inspección e interpretación:* luego de la magnetización y aplicación de las partículas magnéticas, debe observarse si existen indicaciones de falla. Todas las indicaciones deben ser clasificadas como relevantes o no-relevantes. Las indicaciones relevantes deben ser comparadas con el criterio de aceptación / rechazo empleado.

Las mismas pueden ser registradas por diversos métodos, siendo el más sencillo el escrito, en el cual se realiza con la ayuda de un esquema.

- III. *Limpieza final y desmagnetización:* después de la inspección todas las piezas deben ser limpiadas, desmagnetizadas y protegidas contra la corrosión.

En cuanto a la desmagnetización, existen dos formas, con corriente alterna, donde se aplica un valor de campo mayor al utilizado en la inspección y luego se disminuye hasta cero.

Con corriente continua, se aplica un valor de campo mayor que es utilizado en la inspección y en la misma dirección. Luego se invierte la corriente, reduciendo su valor máximo de manera de cerrar el ciclo de histéresis hasta un valor suficientemente bajo de magnetismo residual.

Cuando sea posible, las piezas que fueron sometidas a magnetización circular deben ser magnetizadas en forma longitudinal antes de la desmagnetización. Luego de la desmagnetización el campo magnético no debe ser superior a 3 G o 240 A/m.

Limpieza: puede realizarse mediante solvente, aire, etc. Debe asegurarse que no hay residuos de partículas magnéticas en las discontinuidades geométricas de la pieza, que pudieran afectar procesos de fabricación posteriores o el comportamiento en servicio.

Ultrasonido

El ultrasonido es una vibración mecánica con un rango mayor al audible por el oído humano que se transmite a través de un medio físico y es orientado, registrado y medido en Hertz con ayuda de un aparato creado para ese fin. Dicho método utiliza ondas sonoras para inspeccionar el interior de componentes que ofrecen una trayectoria continua a la propagación de las ondas sonoras.

Principios que se aplican:

- La impedancia acústica es la resistencia que oponen los materiales al paso de una onda ultrasónica.
- Ondas acústicas iguales a las ondas sónicas.
- Transmisión de energía entre partículas que propicia el oscilamiento.
- El número de oscilaciones son de acuerdo al tipo de onda que se trata.
- Se propagan en todos los medios elásticos donde exista fracciones de materia (átomos o moléculas capaces de vibrar).
- La vibración depende de la separación de las partículas.

A continuación se muestra un esquema comparativo (Tabla 14) entre dichos ensayos no destructivos a fin de visualizar su utilización según el tipo de imperfecciones, aplicaciones típicas, ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

Método	Imperfecciones típicas detectadas	Aplicación típica	Ventajas	Desventajas	Tintas Penetrantes
	Grietas, porosidad, traslapes y fisuras abiertas a la superficie	Piezas fundidas, forjadas, conjuntos de partes soldadas y componentes sometidos a agrietamiento por corrosión, por esfuerzo o por fatiga	Poco costoso, fácil de aplicar, portátil, de fácil interpretación.	La imperfección debe ser abierta a una superficie accesible, el nivel de detectabilidad depende del operador	
	Partículas				
	Magnetizables	Grietas, huecos, porosidad e inclusiones	Piezas fundidas, piezas forjada y piezas extrusionadas	Sencillo, poco costoso, detecta imperfecciones subsuperficiales poco profundas, así como defectos superficiales	Sólo para materiales ferromagnéticos, se requiere preparar la superficie, con frecuencia suceden indicaciones irrelevantes, depende del operador
	Ultrasonido	Grietas, huecos, porosidad, inclusiones y deslaminaciones	Piezas de metal compuesto, forjadas, fundidas y conjuntos de partes soldadas	Excelente profundidad de penetración, buena sensibilidad y resolución, puede proporcionar registros permanentes	Requiere el acoplamiento acústico con el componente, lento, difícil de interpretar

Tabla 14. Esquema comparativo de los distintos ENDS

Los ENDS que se llevan a cabo sobre los componentes involucrados (Tabla 15) se hacen luego de concluida la etapa de alineación de los ejes de la turbina de vapor. También se debe recordar el tema de la limpieza destacándose la correspondiente a los rotores de turbina. Estos se arenan con dos tipos de partículas: óxido de aluminio y arena de río. Las primeras se usan exclusivamente sobre los álabes mientras que las segundas para el resto del cuerpo. Este procedimiento se hace también sobre los estadios.

Con respecto a los cojinetes hay que aclarar que personal de planta puede realizar ensayos de tintas penetrantes con antelación a la mencionada etapa de alineación. Esto va a depender del análisis de los resultados de monitoreo de temperaturas y/o de la inspección visual.

Componente	END			
	Inspección visual	Tintas penetrantes	Partículas magnetizables	Ultrasonido
Carcasa AP				
• Superior (Tapa)	X		X	
• Inferior (Base)	X		X	
Carcasa BP				
• Superior	X		X	
• Inferior	X		X	
Ruedas distribuidoras AP (10)				
• Cuerpo	X		X	
• Álabes fijos (1 a 7)	X	X		
• Álabes fijos (8 a 10)	X		X	
• Radio exterior	X			
Ruedas distribuidoras BP				
• Cuerpo	X		X	
• Álabes fijos (11 a 20)	X		X	
• Radio exterior	X			
Rotor AP				
• Cuerpo	X			
• Álabes móviles (1 a 7)	X	X		
• Álabes móviles (8 a 10)	X		X	
• Flejes (bandaje)	X			
Rotor BP				
• Cuerpo	X		X	
• Álabes móviles (11 a 20)	X		X	
• Flejes (bandaje)	X			
Espárragos AP	X		X	X
Espárragos BP	X		X	X
Cojinetes (8)	X	X		X
Válvulas				
• Stop	X	X		
• Asiento válvula parcializadora	X	X		

Tabla 15. Tipo de ENDs realizados sobre los distintos componentes

Concluida la etapa de extracción del aislante térmico de los cuerpos de AP y BP se puede comenzar a desmontar el bloque de maniobras y los distintos elementos correspondientes a la regulación de entrada de vapor. Hay que destacar que el desgaste producto de las horas de funcionamiento es menor que el producido en la propia turbina, por lo que este bloque demanda menor atención.

Principalmente las tareas que gobiernan al bloque de maniobras están vinculadas con la limpieza de todo el conjunto y revisión del estado estructural de los componentes. La limpieza implica la remoción de todo el anaeróbico y el aceite de lino usado en las juntas de unión, con su posterior esmerilado. Trabajo similar al que se hace sobre todas las juntas de la turbina.

También se hace una revisión del funcionamiento del péndulo y el estado de los anillos excéntricos sobretodo de la condición en que se encuentran sus resortes de acción centrifuga. Se controla que los mismos no estén trabados, o sea, que posean libertad de movimiento.

Se efectúan ensayos de tintas penetrantes en cuerpo de válvulas "Stop" y asientos de válvulas parcializadoras. También se verifica el correcto contacto, en posición de cierre de las parcializadoras, mediante tinta "Azul de Prusia".

Pero se destacan los siguientes dos trabajos:

1. Construcción de curva de regulación
2. Revisión de luces en varillajes

Construcción de curva de regulación

Ésta se encuentra realizada por el fabricante para las condiciones óptimas de apertura de las cuatro válvulas parcializadoras, en función de la apertura de la válvula N° 1 (Fig. 74).

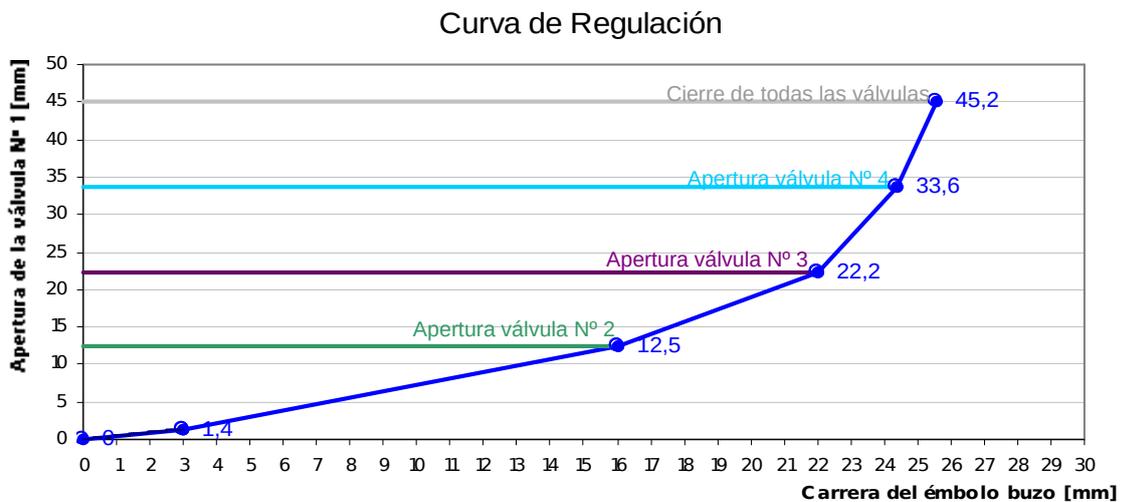


Figura 75. Disposición de los comparadores sobre las válvulas

Por lo tanto, la misma está realizada en función de dos parámetros característicos de la regulación de admisión del vapor en la turbina, ellos son:

- Carrera del émbolo de la válvula de distribución o émbolo buzo.
- Carrera del émbolo de la válvula parcializadora N° 1.

De esta manera, una vez finalizado el montaje final del bloque de maniobras, se procede a efectuar la regulación de dichas válvulas parcializadoras. Para ello se procede a la construcción de la mencionada curva, la cual debe reproducir los resultados impuestos por el fabricante.

A continuación se describe el modo de realizar la curva mencionada lo que en la planta se conoce como "Levantar las Curvas de Regulación"

Con las cuatro válvulas parcializadoras cerradas, o sea en su punto inferior, se comienza el procedimiento apoyando un comparador sobre el émbolo buzo (Fig. 75).

Al mismo tiempo, se coloca un comparador sobre el émbolo de la válvula parcializadora N° 1. La base magnética asociada a este comparador se encuentra apoyada sobre un collar dispuesto a lo largo del contorno de la válvula. También se debe verificar que la palanca relacionada al émbolo buzo se encuentre en posición horizontal, lo que se asegura mediante un medidor de nivel. Alcanzado este objetivo, se gira el tornillo regulador de la válvula N° 1 hasta que el comparador allí colocado acuse el movimiento, a partir de ese punto, comenzará la apertura de ésta. Aquí se obtiene el punto de origen de la curva que sería el conocido como cero del émbolo buzo y cero del émbolo de la válvula parcializadora N° 1.

Posteriormente se bombea aceite de regulación con una presión de 10 Kg. /cm².

A partir de allí, se gira el volante manual (el cual simula un aumento de la velocidad o de la carga de la turbina) que se encuentra relacionado al amplificador del regulación de la velocidad. El giro de éste se traduce en un movimiento de la palanca, relacionada al émbolo buzo, sobre un pivote. Así, dicho émbolo también se desplaza, en forma descendente. Éste descenso es acusado por el vástago del comparador apoyado sobre él.

El descenso provoca la abertura de las lumbreras, permitiendo el pasaje del aceite de regulación, que se dirige al servomotor, y luego hacia la válvula parcializadora N° 1 produciéndose el desplazamiento de su émbolo. Este movimiento es registrado por el comparador allí dispuesto. Se obtiene otro punto de la curva de regulación.

El varillaje de retorno emite la señal para el envío del aceite nuevamente hacia el servomotor para dirigirse otra vez hacia la válvula de distribución. Como resultado se obtiene el descenso de las camisas, cerrándose las lumbreras que se encontraban abiertas. Así es como se regula la admisión del vapor de la turbina.

Girando nuevamente el volante manual, se repite el proceso de regulación y obteniéndose otro punto. Es decir, que girando tantas veces dicho volante, se obtendrán tantos puntos de la curva como se deseen. Para lograr una curva continua se debe tomar una cantidad infinita de puntos, pero en la práctica se levanta la curva en forma discreta mediante la unión de 25 puntos aproximadamente.

Respecto a la apertura de la válvula parcializadora N° 2, la misma deben abrir, en la posición del émbolo buzo y émbolo de la válvula N° 1 correspondiente según la curva del fabricante. De esta manera, para su calibración, se coloca sobre ésta, el comparador mediante el mismo dispositivo que se utilizó con la primera de ellas, y en dicha posición, se gira el tornillo regulador hasta que el comparador allí colocado acuse el movimiento y comience su apertura.

Para las válvulas restantes, se repite el mismo procedimiento, llegando a la calibración final de las cuatro válvulas.

Ejemplo: Trazado de curva de regulación Turbina de Vapor Nº 8

Se realizó el trazado de la curva de regulación siguiendo el procedimiento mencionado, registrando los valores en los comparadores, lo que dio como resultado en primera instancia la curva formada por los puntos discretos **naranjas** (Fig. 76). La curva dada por el fabricante se representa en color **azul**.

Ensayo Curva de Regulación TV Nº 8

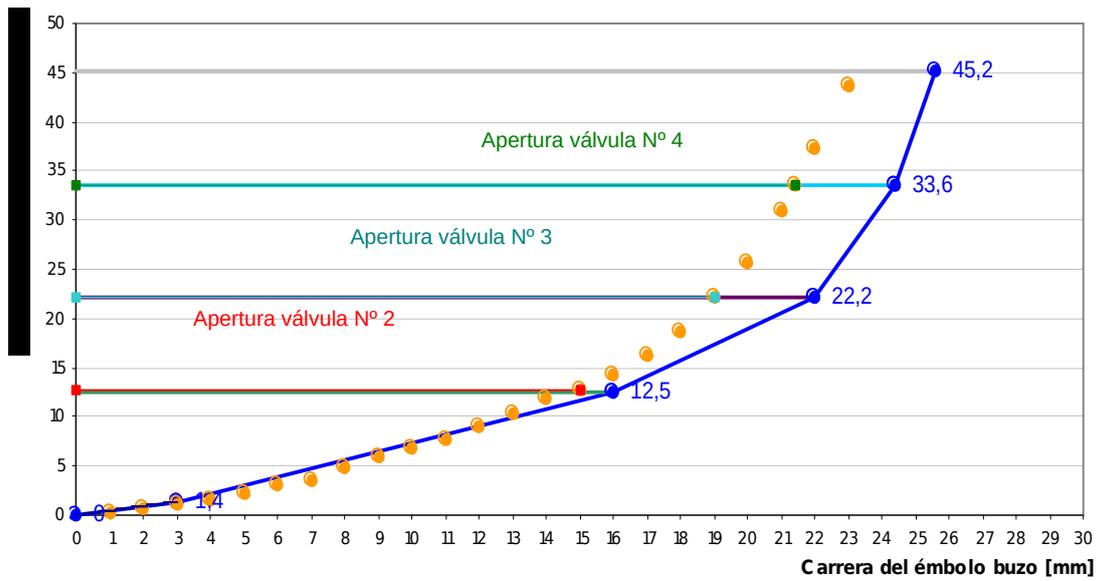


Figura 76. Trazado de la curva de Regulación TV Nº 8

En el ensayo se graficaron los momentos de apertura de las válvulas Nº 2, 3 y 4 en función del desplazamiento del émbolo de la válvula Nº 1. Allí se observa que la apertura de dichas válvulas, se encontraba desfasada respecto a los valores de los parámetros correspondientes dados por el fabricante. Para modificar dicha curva, de modo de que la misma se aproxime a la del manual, la palanca asociada al émbolo buzo cuenta con los llamados “tetones” ya mencionados, que son salientes de material., sobre los cuales se puede modificar su altura (lima o relleno de soldadura) de acuerdo a los requerimientos necesarios para cumplir con lo mencionado.

A partir de los primeros resultados, se procedió a la calibración final (Fig. 77) de la apertura de válvulas, llevando a cabo el procedimiento ya mencionado.

Ensayo Final Curva de Regulación TV Nº 8

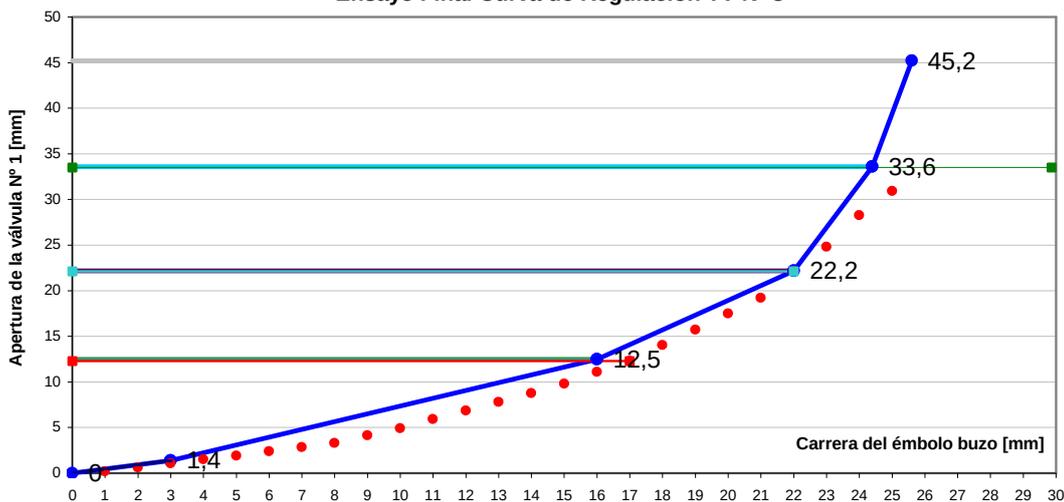


Figura 77. Trazado de la curva de Regulación final TV Nº 8

Revisión de luces en varillajes

Por medio de esta tarea se busca eliminar las luces de todo el sistema de varillaje de distribución, energía y retorno. Esto implica un cambio, si es necesario, de bulones o bujes de unión de dichas varillas con el fin de mejorar el tiempo de respuesta de este sistema de control. Cabe aclarar que los movimientos efectuados por éste son prácticamente imperceptibles a la vista por lo que la presencia de luces afecta en gran cuantía su correcto funcionamiento.

Alternador

Los trabajos sobre el alternador comienzan cuando se haya concluido la etapa de alineación de los ejes de AP, BP y de aquel. Una vez esto el personal eléctrico dispone de la máquina para hacer todos los trabajos necesarios. El tiempo de duración de estos puede influir en la criticidad temporal del mantenimiento pero no en los trabajos pertinentes a la turbina, es por esto que el personal mecánico puede concluir sus tareas aunque falten ajustes en el alternador. Se trabaja en paralelo coordinando los tiempos de utilización del puente grúa.

En primera instancia se desmonta el rotor del alternador según procedimiento establecido por fabricante. Con antelación se debe tener desmontado el bloque excitatriz. Se extraen las tapas (externas), semi-tapas (internas) y sellos de la carcasa estatórica. Se retiran los cojinetes N° 5 y 6; y el pedestal de este último. Se extraen las paletas del ventilador, de ambos lados del rotor. Estas suman un total de cuarenta y cuatro; se debe tomar el recaudo, al montarlas nuevamente, de conservar la posición y orientación establecida original. De lo contrario se invertiría el rol de los ventiladores, o sea, se transformarían en extractores y como consecuencia directa se reduciría la eficiencia de refrigeración. Retirados los cojinetes, para mantener al eje en nivel se utiliza el puente grúa y el de sujeción. Una vez esto se monta el dispositivo para deslizar el rotor; el cual esta comprendido por un carrito (pipper) y su respectiva vía carrilera del lado excitatriz. También se colocan patines engrasados que se interponen entre el rotor y las chapas magnéticas del estator. Con asistencia de malacate tipo tirfor se tira horizontalmente hasta su extracción.

Una vez extraído el rotor y montado sobre caballetes se procede a la limpieza de este y del estator. Durante la misma se hace inspección visual de cuñas y se controla que no estén flojas. La probabilidad de que haya cuñas flojas es muy baja no por esto debe ser descuidada esta tarea. Refiriéndonos nuevamente a la limpieza debemos aclarar que esta es fundamental ya que revela defectos que debajo de ella se esconden y al mismo tiempo elimina contaminantes que afecten la resistencia de aislación de la máquina. La correspondiente al estator se lleva a cabo según el siguiente procedimiento:

1. Remoción de suciedad en seco con trapos
2. Limpieza con trapos embebidos en Stoodard Tens
3. Pulverización de aire seco.
4. Secado con trapos secos
5. Pulverización a presión de Saf-Sol
6. Remoción seca de suciedad de agujeros de ventilación con baquetas
7. Ídem 5 con baquetas embebidas en Saf-Sol
8. Pulverización de aire seco

El rotor se limpia de manera similar, respetando la secuencia seca y líquida, pero solo con Saf-Sol.

El estator se debe mantener calefaccionado durante la limpieza, y mientras se encuentre abierto, mediante fuente externa (calo-ventor) por sobre la temperatura de rocío. El rotor es calentado mediante la inyección de corriente continua (150 a 200 A) a través de los anillos rozantes, siempre y cuando sea necesario levantar el valor de resistencia de aislación, es decir para secarlo. Para el mantenimiento de la temperatura deseada, se cubre al rotor con carpa de lona y se coloca un caloventor en su interior. Con esto se logra que no condense el aire en su interior lo cual acarrea disminución de la resistencia de aislación y degradación de la máquina.

Los solventes de limpieza presentan las siguientes características:

- Stoodard Tens: es un detergente industrial removedor de manchas grasas, aceitosas, pelusas y partículas livianas entre otros. Es de gran volatilidad, posee rigidez dieléctrica baja y es de menor calidad que el Saf-Sol.
- Saf-Sol: es un solvente que actúa químicamente removiendo la suciedad, grasas, contaminantes y otros con gran eficiencia. Posee gran rigidez dieléctrica por ende puede usarse en máquinas en funcionamiento. Es no tóxico, evapora en forma lenta y uniforme y no es inflamable en su punto de ebullición.

Seguidamente a la limpieza, tanto del rotor como del estator, se inician las actividades de ensayos y ajustes sobre ambos. Las mismas pueden llevar a cabo en forma paralela.

Ensayos del Alternador

Los ensayos realizados al alternador son esencialmente de carácter eléctrico y se dividen en dos grupos, de acuerdo a la siguiente clasificación:

- Ensayos de planta: ejecutados por personal de mantenimiento de planta
- Ensayos de terceros: ejecutados por empresas contratadas

Los del segundo grupo son motivados por la no disponibilidad de instrumental de última tecnología, personal no calificado por norma para su ejecución o bien por la necesidad de certificado (garantía) de calidad.

Ensayos Estatóricos

Estado de aislación estatórica

Mayoritariamente son ejecutados por terceros y están ligados a establecer el diagnóstico del estado de la aislación estatórica mediante las siguientes mediciones:

1. *Resistencia de aislación – parámetros dieléctricos*
2. *Ensayo de saltos de tensión*
3. *Capacidad y tangente δ en función de la tensión*
4. *Carga integrada y energía de las descargas parciales con el método del lazo*
5. *Descargas parciales como carga máxima aparente*
6. *Localización de descargas parciales con detector ultrasónico*

Normas de aplicación: IEEE 43-2000, REM 500, ASTM D3382, IEC 270.

Todos estos son de corta duración, del orden de horas. No son leyes ni condiciones necesarias y suficientes para la toma de decisiones como la declaración de la obsolescencia o rebobinado de la máquina, solo son criterios de evaluación que deben ser estudiados cuidadosamente antes de proceder a reparación u otros. Los distintos valores que de estos se desprenden no se consideran como absolutos sino que deben verse como relativos a ellos mismos y a los obtenidos en ensayos anteriores. Es por esto que es importante conocer la “partida de nacimiento” y los antecedentes o “historia clínica” del sistema de aislación antes de establecer conclusiones. La frecuencia de ensayo vigente es por lo menos un ensayo entre mantenimiento programados, además del que se debe hacer durante en transcurso de este. No necesariamente hace falta el desmontaje del rotor para su ejecución, salvo para la localización con detector ultrasónico de descargas parciales en ranuras. Puesto que se construye un historial con los resultados de los ensayos es recomendable que el prestatario del servicio sea único.

Los ensayos 1 y 2 se hacen con tensión continua de 5000 V que es el valor estandarizado para máquinas de tensión nominal mayor a 3300 V. Los electrodos del equipo de medición se conectan al borne de salida de la fase a ensayar (Terminal +) y a un bulón colocado en la carcasa (Terminal -).

Los ensayos 3, 4, 5 y 6 se hacen con tensión alterna de valores predefinidos e inferiores a la tensión nominal de ensayo. Esto se debe a que a tensión nominal la máquina podría sufrir un deterioro adicional al que recibe en servicio. Igualmente la misma norma establece para máquinas que no son nuevas, valores de ensayo conservadores para no provocar un envejecimiento adicional al que ya posee la aislación por su vida útil. A pesar de ser ensayos a tensión reducida los resultados que se obtienen son valederos a fin de establecer el estado del aislamiento. La tensión alterna se aporta a través de un circuito (Fig. 78) comandado por transformadores, variac e instrumento de medición.

La tensión máxima de ensayo equivale a la tensión de fase que es 7621 V la cual corresponde al 60 % de la tensión nominal de la máquina (13,2 KV). Durante las pruebas se regulan los valores de tensión con el variac y su valor se controla mediante voltímetro asociado a un transformador de medida con una relación de espiras de 120, por lo que para el valor máximo de ensayo se debe registrar una tensión de 65 V aproximadamente en el instrumento.

Se utiliza un amperímetro en el cable común para registrar los valores de intensidad de corriente de fuga, la cual no debe superar los 400 mA. A raíz de esto puede que la tensión de

ensayo se deba limitar a valores inferiores a los deseados. Es poco común esto, pero puede pasar si la máquina no se encuentra libre de humedad o bien existiera un cortocircuito.

Otro de los instrumentos que se coloca es un amperímetro por cuestiones de protección del variac disponible en planta. Se debe limitar la intensidad de corriente a 13 A.

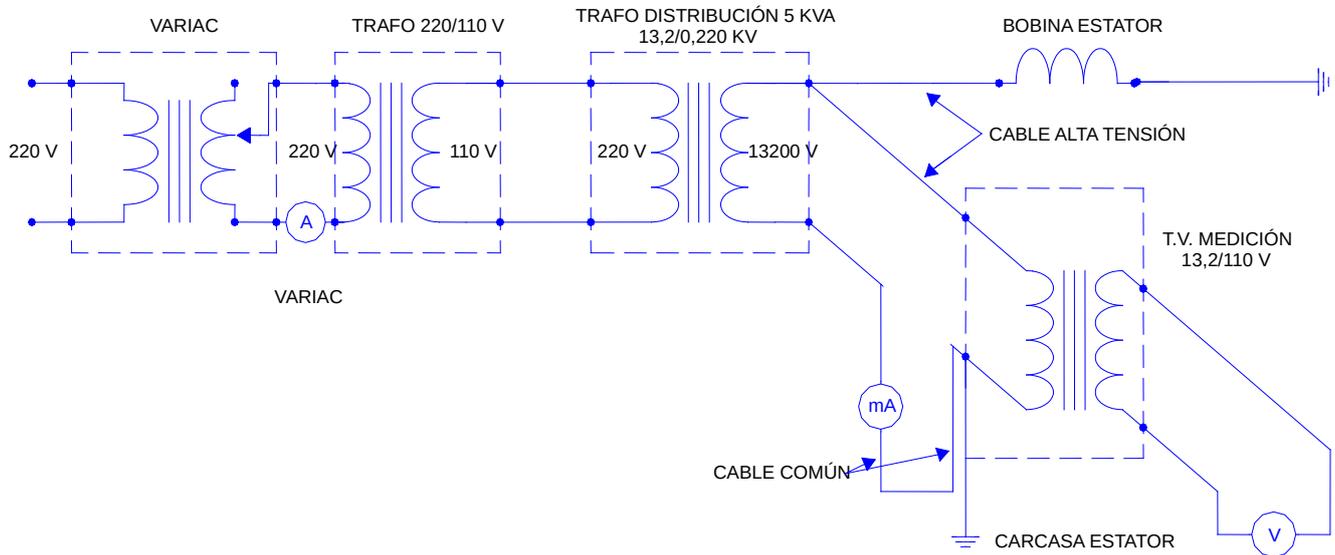


Figura 78. Circuito de alimentación para ensayos en C.A.

A continuación se hará una descripción, de cada uno de los ensayos, basada en los realizados por la empresa de Ingeniería en Mediciones CONIMED S.A., al alternador de la Turbina N° 7 correspondientes al 24 de septiembre del año 2003. En ese entonces los equipos de medición utilizados fueron:

- Megómetro AVO Megger modelo S1-5010 (Fig. 79) → ensayos 1 y 2
- Analizador de pérdidas dieléctricas Conimed modelo DLA 16 (Fig. 80) → ensayos 3, 4 y 5
- Detector ultrasónico Robinson Hostick → ensayo 6



Figura

Figura 80. Analizador DLA 16

1. Resistencia de aislación – parámetros dieléctricos

Consiste básicamente en la medición de la resistencia de aislación de cada una de las fases estáticas respecto a tierra. Con dichos valores se obtiene diversos parámetros dieléctricos para su comparación con estándares establecidos por norma. También se deben tener en cuenta las condiciones climáticas como temperatura y humedad ya que son magnitudes de influencia del ensayo.

El procedimiento de medición consiste en registrar los valores de resistencia para lapsos de 15'' durante el primer minuto y luego de 1' hasta los 10'. Se deben referir los mismos a la temperatura normalizada de 40° C (otra opción normalizada es de 20 °C) para su comparación con los estándares. También se registra el valor de capacidad. Este último es registrado una solo vez dado que el sistema aislante es asimilable a un condensador real, y como tal, presenta una capacidad que es prácticamente constante en el tiempo.

Para un mejor entendimiento del ensayo definimos los siguientes conceptos y parámetros:

Resistencia de aislación (R_{ais}): tras la aplicación de un escalón de tensión continua (E) es aquella resistencia que se opone al paso de la corriente total de pérdidas. Su valor se obtiene de acuerdo a la ley de Ohm como:

$$R_{ais} [M\Omega] = \frac{E [V]}{I [mA]}$$

Cabe destacar que esta resistencia esta fuertemente ligada a los procesos de conformación del material aislante, tipo Micadur clase F en sendos alternadores, y a su geometría. En los procesos de extrusión o moldeado de los aislantes, no siempre es posible evitar la presencia de burbujas o discontinuidades causadas por diversos factores difícilmente controlables. Las cavidades (vacuolas) pueden producirse también por esfuerzos de flexión a raíz del transporte y/o instalación del mismo. Dicha resistencia varía directamente con el espesor e inversamente proporcional con el área de la superficie conductora; y es dependiente de la temperatura, humedad y de la presencia de contaminantes. Normalmente el valor se expresa en millones de Ohms [$M\Omega$] dado que la corriente total que toma el aislante es del orden de los miliamper [mA]. Esta corriente esta compuesta por la suma de cuatro componentes dos de carácter constantes y dos que tienden a cero con el tiempo. Por este motivo es ensayo se basa en obtener la característica de R_{ais} en el tiempo

- *Índice de polarización (IP):* es un parámetro adimensional que se obtiene por el cociente entre las resistencias de aislación de 10' y 1'.

$$IP = \frac{R_{ais10'}}{R_{ais1'}}$$

- *Índice de absorción (I_{abs}):* es un parámetro adimensional que se obtiene por el cociente entre las resistencias de aislación de 1' y 30''.

$$I_{abs} = \frac{R_{ais1'}}{R_{ais30''}}$$

- *Constante de tiempo:* es el producto de la capacidad y la resistencia de aislación de 1'. Se expresa en segundos.

$$Cte \text{ de tiempo [seg]} = R_{ais1'} \times C$$

Los dos primeros parámetros son indicativos del grado de sequedad (humedad), integridad física y limpieza (contaminación) del aislamiento. El tercer parámetro permite evaluar la velocidad de crecimiento de la R_{ais} en el proceso de polarización del dieléctrico. El de mayor utilización es el IP.

Conocidos estos conceptos procedemos a ejemplificar la situación propuesta para la cual los datos generales de ensayo son los siguientes:

- Tensión de ensayo = 5000 V
- Tensión final ≈ 5062 V
- Temperatura ambiente = 17,4 ° C
- Temperatura elemento = 40 ° C
- Humedad relativa = 61,1 %
- Temperatura de rocío = 9,9 ° C

Los valores de resistencia de aislamiento y capacidad (Tabla 16); y los parámetros dieléctricos (Tabla 17) son procesados por el mismo equipo de medición, Megger S1-5010. Éste ejecuta las pruebas de forma automática, almacena los resultados, realiza los cálculos y las graficas de interés. Puede ser conectado a PC para la descarga de mediciones o bien para su visualización en tiempo real.

Resistencia [MΩ] Tiempo Fase R Fase S Fase T 1°
 min.15 seg.193074370830 seg.73672771245
 seg.10701050108060 seg.1390138013902
 min.2550242025603 min.3570331035704
 min.4470409044805 min.5320481053106
 min.6070545060707 min.6820604067508
 min.7540657074109 min.82107130805010
 min.888076008650 Capacidad [μF] 0,220,210,21

Parámetros dieléctricos	R	S	T
Índice de polarización	6,39	5,51	6,22
Índice de absorción	1,89	1,90	1,95
Constante de tiempo	305,8	289,8	291,9

Tabla 17. Parámetros dieléctricos

Tabla 16. Mediciones registradas – Fases estáticas TV Nº 7

El diagnostico del estado de las distintas fases estáticas se hace según las siguientes clasificaciones normalizadas:

Clasificación de estado - IP			Clasificación de estado - labs		
	Peligroso	<1		Peligroso	<1,1
1<	Cuestionable	<1,5	1,1<	Cuestionable	<1,25
1,5<	Aceptable	<2	1,25<	Aceptable	<1,4
2<	Bueno	<3	1,4<	Bueno	<1,6
3<	Muy bueno	<4	1,6<	Muy bueno	
4<	Excelente				

Cuanto mayor sea el valor de la constante de tiempo mejor será el estado del sistema de aislación y se clasifica de la siguiente manera:

Estado del Sistema de aislación

	Malo	< 100''
100'' <	Satisfactorio	<2000''
2000'' <	Bueno	

Otro dato de referencia para el análisis del sistema de aislación de máquinas de tensión nominal entre 13 a 16 KV arroja una constante de tiempo entre 113 a 902 segundos. Este resulta de un estudio, a nivel mundial, de generadores a lo largo de 30 años.

También se especifica el valor mínimo de resistencia de aislación para la puesta en servicio que es de 100 MΩ correspondiente a un tiempo de ensayo de 10' y referido a 40 ° C. Este valor es establecido, en protocolo, por el fabricante y es superior al propuesto por las normas vigentes que establecen un mínimo de 14,2 MΩ de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R_{ais}[M\Omega] = 4 \times (13,2KV + 1) \rightarrow a \ 20^{\circ}C$$

Para referir este valor al correspondiente a 40 ° C se lo debe afectar por un coeficiente de corrección cuyo valor es de ¼ según ábaco.

La diferencia de valores esta basada esencialmente en que las normas apuntan a garantizar la seguridad de las personas y el fabricante pone mayor énfasis en el equipo.

Es muy importante que el valor de R_{ais} medido sea superior al mínimo puesto que de no ser así no se podría hacer una lectura correcta de los índice dieléctricos. Al ser estos del tipo cocientes adimensionales se podrían obtener parámetros dentro los aceptables pero con valores de R_{ais} bajos con lo que se incurriría a un peligroso error si se aceptara un buen estado de la aislación solo a partir de dichos parámetros.

A su vez se grafica la relación entre el cociente de las resistencias de aislación y la de 1' en función del tiempo (Fig. 81), para el análisis de la tendencia temporal de dicho cociente. El aislamiento se encuentra en buen estado cuando el diagrama es una línea recta que aumenta apreciablemente con el tiempo de ensayo. El deterioro propio, carbonización, excesiva humedad y/ o contaminación conducen a una recta de suave pendiente con tendencia a aplanarse en el transcurso del ensayo. Se asume que este aplanamiento es real pero a partir de los diez minutos o más debido a la anulación de las corrientes que dependen del tiempo.

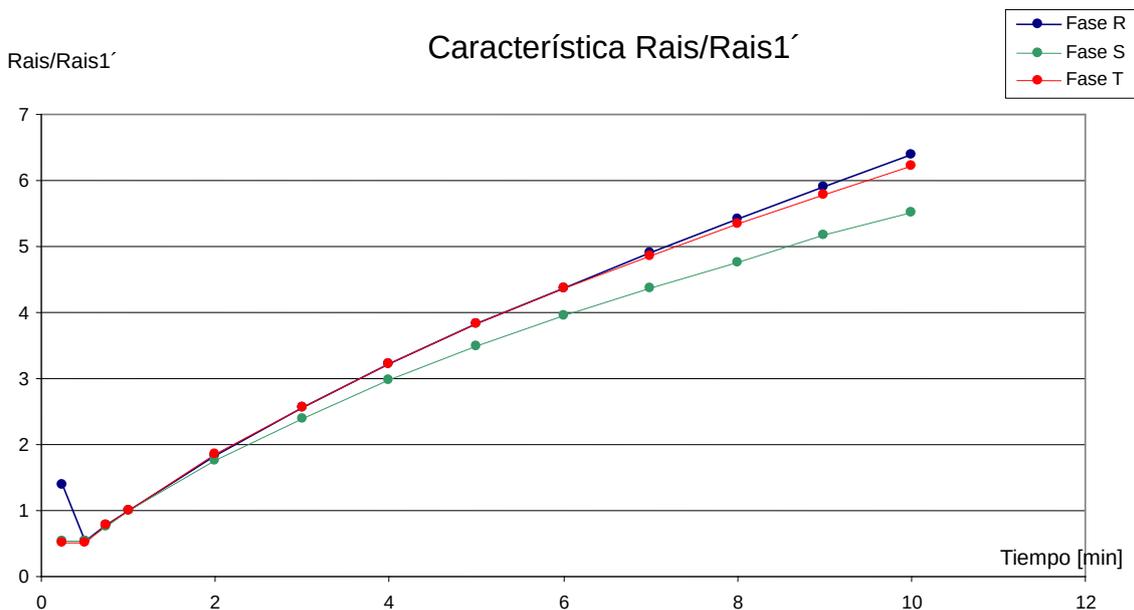


Figura 81. Característica Rais/Rais1' - arrollamiento estático TV N° 7

Análisis de resultados

- La resistencia de aislación mínima fue superada ampliamente en cada una de las fases y además fue del orden de los Giga Ohm que es lo que se espera de estas clase de máquinas
- Los parámetros IP e I_{abs} fueron los óptimos en todos los casos
- Los valores de constante de tiempo están dentro del rango satisfactorio
- La tendencia de la grafica fue de pendiente positiva sin insinuación al aplanamiento
- La fase R presento una anomalía en el inicio de la medición, pero fue atribuida a una falla en el método de medición, dado que los valores siguientes respetaron la tendencia esperada

De acuerdo a estos criterios la máquina soporto las pruebas con éxito, concluyéndose que estaba seca al momento del ensayo. Por esto se dedujo que los posteriores ensayos no se verían afectados por el factor humedad.

2. Ensayo de saltos de tensión

Esta prueba depende del principio que establece que un aislamiento ideal producirá lecturas idénticas de resistencia de aislamiento para todas las tensiones. Es un ensayo que se realiza en forma automática, por el AVO Megger S1-5010, y consiste en el aumento de la tensión de ensayo en intervalos discretos de 1000 V por minuto hasta llegar a 5000 V. Se registra la R_{ais} por cada quince segundos por cada intervalo de tensión.

Para este ensayo las magnitudes de influencia fueron las mismas que en el ensayo de resistencia de aislación. Los valores obtenidos (Tabla 18) se grafican (Fig. 82) para una mejor interpretación de los resultados. Solo se detallan los correspondientes al minuto de aplicación del escalón de tensión.

Medición de resistencia de aislación [MΩ]			
Tensión [V]	Fase R	Fase S	Fase T
1000	1390	1140	5170
2000	1660	1520	2980
3000	1900	1810	2880
4000	2150	2050	2890
5000	2350	2260	2990

Tabla 18. Mediciones registradas

La teoría establece que un aislamiento que presente puntos débiles, presenta valores inferiores a tensiones más elevadas, esto se traduce en una pendiente negativa de recta graficada.

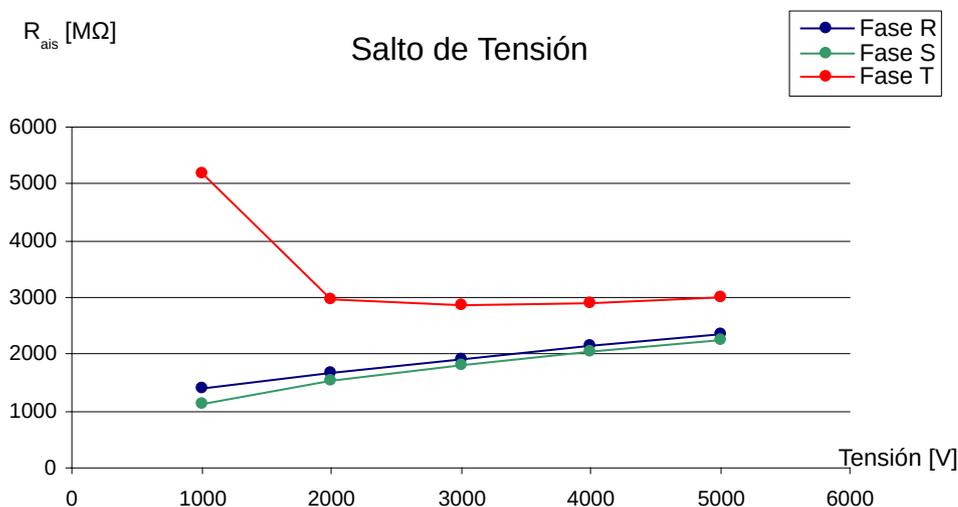


Figura 82. Diagrama de salto de tensión - arrollamiento estático TV N° 7

Análisis de resultados

- La resistencia de aislación mínima fue superada ampliamente en cada una de las fases y además fue del orden de los Giga Ohm
- La fase T presenta valores de resistencia mayores a las otras dos pero contrariamente tiene una tendencia a disminuir a más altas tensiones
- El valor de R_{ais} correspondiente a 1000 V fue muy elevado pero se atribuyó esto a una falla en el método de medición

Según este criterio la aislación de la fase T entró en degradación a pesar de que conserva una elevada resistencia de aislamiento.

3. Capacidad y tangente δ en función de la tensión

Las pérdidas dieléctricas están definidas como la pérdida de potencia eléctrica a través de los aislantes. Por este fenómeno se verifica la existencia de una corriente de fuga la cual calienta al material aislante derivando en la disminución de su resistencia.

En conductores, máquinas y demás artefactos eléctricos el caso más favorable de aprovechamiento de la potencia disponible se obtiene cuando:

$$P = U \times I \times \cos \varphi = U \times I \rightarrow \cos \varphi = 1 \rightarrow 0^\circ$$

Esto es decir que la tensión y la intensidad de corriente están en fase.

En un aislante se deduce por idéntica razón que el caso más favorable es aquel en que la potencia perdida a través del dieléctrico es nula, o sea:

$$P = U \times I \times \cos \varphi = 0 \rightarrow \cos \varphi = 0 \rightarrow 90^\circ$$

Éste caso corresponde a la idealización que se manifiesta solo en el vacío. En la práctica se producen pérdidas cuyo valor es muy reducido y es proporcional a la $\text{tg } \delta$. Los ángulos δ y φ son complementarios (Fig. 83). Al ángulo δ se lo denomina ángulo de pérdidas y se deduce que $\delta = \cos \varphi$.

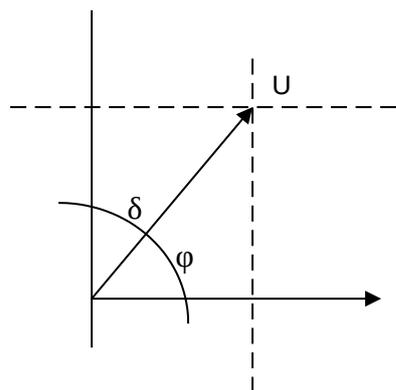


Figura 83. Factor de pérdidas

La $\text{tg } \delta$ es otra de las medidas de las pérdidas eléctricas del sistema aislante. Por medio de esta se evalúa su condición y calidad; revela contaminación, fracturas y perforaciones; y defectos propios del envejecimiento. En un material aislante interesa que las pérdidas dieléctricas sean mínimas por ende el valor de la $\text{tg } \delta$ debe ser lo más pequeño posible.

A bajas tensiones se puede determinar el envejecimiento y estado del aislante. A medida que se va aumentando la tensión las pronunciadas variaciones de la $\text{tg } \delta$ indican generalmente la presencia de descargas parciales en el volumen del material, también podrían llegar ser superficiales de misma intensidad. Se hace hincapié en que los valores obtenidos (Tabla 19) deben ser considerados como relativos a otros; es por esto que se calculan las variaciones de los mismos para las distintas tensiones de ensayo predefinidas.

Fase	Tensión		Capacidad y tangente δ			
	U/Un	U	C	$\Delta C/C$	$\text{tg } \delta$	$\Delta \text{tg } \delta$
			[nF]	[%]	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$
R	0,2	2640	187,0		48,3	
	0,4	5280	190,2	1,71	58,4	10,1
	0,6	7920	193,0	3,21	64,3	5,9
S	0,2	2640	185,8		46	
	0,4	5280	189,0	1,72	56,4	10,4
	0,6	7920	192,2	3,44	63	6,6
T	0,2	2640	185,0		50,2	
	0,4	5280	188,3	1,78	60,8	10,6
	0,6	7920	192,0	3,78	67,7	6,9

Tabla 19. Capacidad y $\text{tg } \delta$.

El valor más representativo del ensayo es el de $\text{tg } \delta$ y sobretodo su variación con la tensión (Fig. 84). También se deben tener en cuenta los valores obtenidos en ensayos anteriores. Para este tipo de máquina los valores típicos son:

- $\text{tg } \delta$ al 20% de $U_n \rightarrow 40 \times 10^{-3}$
- $\Delta \text{tg } \delta$ del 20% al 60% $U_n \rightarrow 5 \times 10^{-3}$

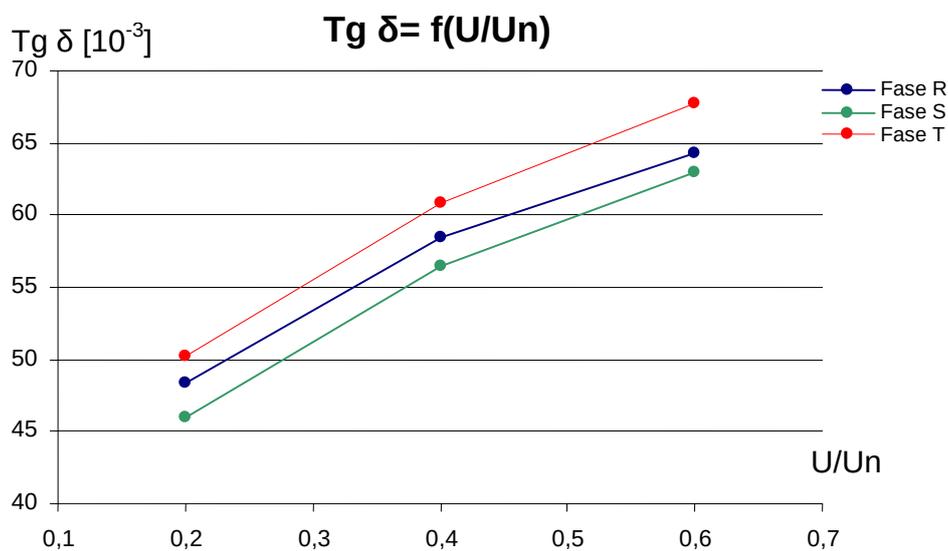


Figura 84. Resultado ensayo $\text{Tg } \delta$

Análisis de resultados

- Los valores de $\tan \delta$ fueron superior a los normalizados y mayores a los de ensayos anteriores
- La curva de tangente de delta en función de la tensión muestran una forma anómala ya que a partir de 0,4 Un disminuye su pendiente. Esto da a saber que a esa tensión ya estaban encendidas las descargas parciales en las vacuolas interiores de la aislación.

Se sostuvo que el material aislante se estaría degradando pero la pronta ignición de las descargas parciales oculta la verdadera información que se desea obtener de este ensayo.

4. Carga integrada y energía de las descargas parciales con el método del lazo

Las descargas parciales son pequeñas descargas que cortocircuitan parcialmente el material aislante entre conductores. Estas se presentan cuando los pequeños volúmenes de gas o aire dentro del aislante se ionizan creando un arco eléctrico microscópico disminuyendo de tal forma el poder dieléctrico de dicho material. Este mecanismo de degradación está ligado a las imperfecciones físicas del material en donde se puede provocar la concentración del campo eléctrico y con ello la aparición de estas descargas.

La carga integrada y la energía de las descargas parciales por ciclo son magnitudes integrales que se determinan con el método del lazo o paralelogramo, descrito en la norma ASTM D3382. Caracterizan el estado general de deterioro de la aislación. La forma del lazo (Fig. 85), visualizada en osciloscopio, permite obtener conclusiones sobre la naturaleza de las descargas y el seguimiento de su variación a lo largo del tiempo permite analizar el envejecimiento de la aislación.

Lazo Normal

Lazo con descargas
leves en ranuras

Lazo con contaminación
en cabezas de bobinas

Figura 85. Formas típicas de los lazos visualizados en osciloscopio

Una vez dispuestas las condiciones para el inicio del ensayo se debe seleccionar la capacidad de rango (Cs). Para el nivel de tensión de estas máquinas corresponde un valor de 150 μF . Los pulsos de descargas producidos cada medio ciclo se integran en dicho capacitor de tal manera que la diferencia de potencial obtenida, entre sus dos terminales, se aplica a un osciloscopio a través de un amplificador. Al ejecutar las mediciones se debe ajustar la escala (Fig. 86) del osciloscopio para luego poder traducir el ancho del lazo en centímetros a voltios. El ajuste se hace tal que la amplitud máxima horizontal ($2x\sqrt{2}xU_n$) corresponda a diez centímetros. Verticalmente se centra en su parte media.

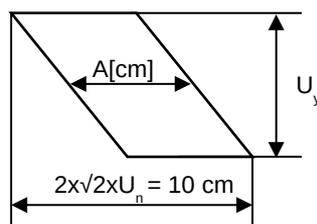


Figura 86. Ajuste de escala

Establecido el lazo se registra el ancho del mismo y su amplitud vertical [Uy]. Con estos se calcula la carga integrada (I) y la energía de las descargas parciales (II) de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$I. Q[\mu C] = U_y[V] \times C_p[\mu F]$$

$$II. E \left[\frac{\mu J}{pF} \right] = A[V] \times \frac{Q[\mu C]}{C_x[\mu F]} \times 10^{-6}$$

La energía de las descargas parciales es proporcional al área del lazo.

En base al ensayo realizado en aquella oportunidad se confecciona planilla de calculo (Tabla 20) con los valores registrados y los derivados; el ítem trazo en una codificación propia de la empresa prestataria del servicio para poder asociar los valores relevados a sus respectivas imágenes obtenidas en el osciloscopio. Con respecto a la capacidad destacamos que es la correspondiente al 20 % de la tensión nominal, debido que a esa tensión se posee una medición de la capacidad con mayor certeza dado que la actividad de las descargas parciales en menor y dicho valor es alterado por las estas. La tensión de ensayo fue del 60 % de la nominal.

Fase	Tensión		Método del Lazo							
			A	A	Uy	Cx(0,2)	Q	Trazo	Q/Cx	E
	U/Un	U	[cm.]	[V]	[V]		[μC]		[μC/μF]	[μJ/pF]
R	0,6	7920	6,0	13440,7	0,7031	187,0	105,47	7	563,98	7,58
S	0,6	7920	6,0	13440,7	0,7344	185,8	110,16	5	592,90	7,97
T	0,6	7920	6,0	13440,7	0,7969	185,0	119,54	3	646,14	8,68

Tabla 20. Método del lazo

El valor de mayor importancia para realizar el diagnostico del estado de la aislación es el de la energía de las descargas en función a la siguiente clasificación:

- E [μJ/pF]
- 4 → Bajo
- 20 → Moderado
- 50 → Alto

Se reconoce internacionalmente que para un 60% de la tensión nominal la energía de perdidas se encuentra generalmente alrededor de 0,1 a 12,5 μJ / pF ciclo.

En el osciloscopio se detectaron las formas de lazos esperadas. En el lazo de la fase S (Fig. 87) se puede apreciar en la grilla el ancho total del lazo de diez cuadrados de 1 cm o sea los 10 cm buscados y el ancho "A" en este caso 6 cm.

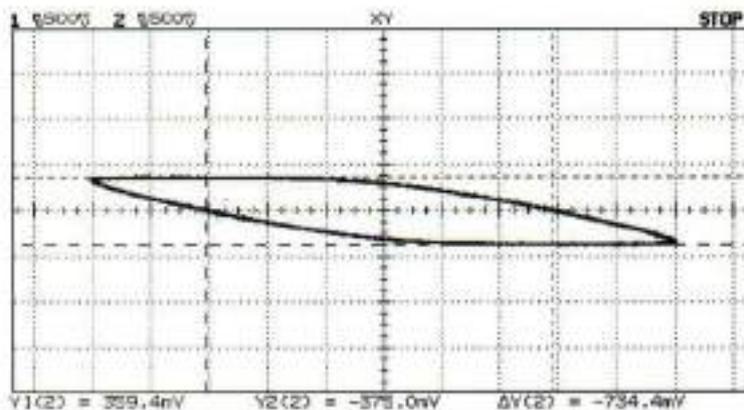


Figura 87. Método del Lazo a 0,6 U_n (7920 V) – Fase S

Análisis de resultados

- Los valores de energía fueron aceptables, pero mayores a ensayos anteriores
- La fase T presento valores de energía mayor a las otras dos
- La forma de los lazos fue la esperada, del tipo paralelogramo, en las tres fases

Se sostuvo que la aislación entro degradación, y en particular la fase T

5. Descargas parciales como carga máxima aparente

La medición de la carga máxima aparente sirve para cuantificar las descargas de elevado valor originadas en grandes vacuolas. Esta medición no provee la caracterización más adecuada puesto que esta influenciada por las características propias de la máquina, si la tenemos en cuenta como una red de inductancias y capacidades. Pierde valor frente al método del lazo pero su ejecución no deja de ser útil para los fines necesarios.

Previo a su ejecución efectúa la calibración por la cual se inyecta, mediante un generador de pulsos de corriente, un valor de carga conocida (q_c) que establece una amplitud (U_c) en la pantalla del osciloscopio y con esto queda determinada la sensibilidad del equipo. Una vez esto se procede al ensayo de cada fase, con valores de tensión reducida, registrándose las deflexiones en los diferentes casos. Por simple multiplicación de este valor con el de sensibilidad se obtiene la carga máxima aparente (Tabla 21).

En aquella oportunidad la deflexión en el osciloscopio fue de 114 mV para una carga de calibración de 10 nC. Se registran las imágenes en el osciloscopio (Fig. 88), además de los valores ya mencionados.

Fase	Tensión		Descargas Parciales			
			h	Trazo	sensibilidad	q
	U/Un	U	[mV]		[nC/mV]	[nC]
R	0,4	5280	220,0	6	10/114	19,30
	0,6	7920	380,0			33,33
S	0,4	5280	200,0	4, 8		17,54
	0,6	7920	375,0			32,89
T	0,4	5280	210,0	2		18,42
	0,6	7920	380,0			33,33

Tabla 21. Descargas parciales

Internacionalmente se reconoce que para este tipo de máquinas un valor de carga máxima aparente es de 10 a 12 nC correspondiente al ensayo con tensión reducida del 60 % del valor nominal.

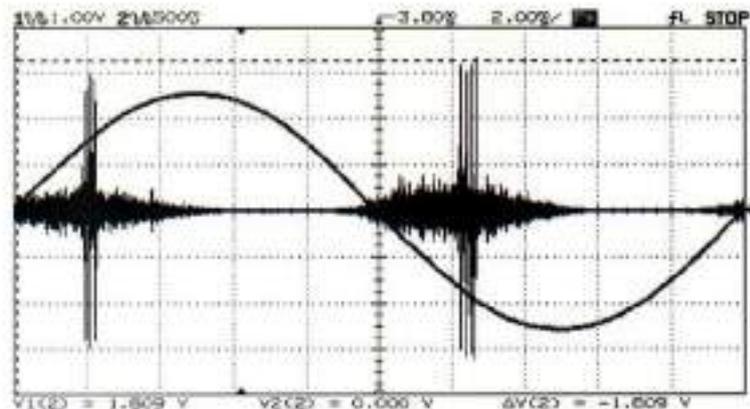


Figura 88. Descargas parciales – Fase S

Análisis de resultados

- La magnitud de las descargas fueron similares en las tres fases pero de elevado valor, del orden de los 380 mV para tensión de ensayo al 60 % de la nominal
- La fase S presento descargas aisladas de elevado valor → 1,69 V
- Las otras fases no presentaron particularidades

Dada la existencia de aquellas descargas de elevado valor en la fase S se recomendó su localización con detector ultrasónico.

6. Localización de descargas parciales con detector ultrasónico

El detector ultrasónico Robinson Hostick es un indicador de la intensidad de las descargas parciales en decibelios. Es un captador similar a un sistema micrófono-parlante que sirve para localizar espacialmente las descargas. Se utiliza tanto en cabeza de bobinas como en zona activa de los arrollamientos, sin la necesidad de que estén retiradas las cuñas.

El ensayo se realiza con valores reducidos de tensión y el detector es manipulado mediante una pértiga para comandar el equipo a distancia y así evitar descargas eléctricas a través del personal encargado de su uso.

Análisis de resultados

- Particularmente se localizaron descargas parciales en atadura de cabeza de bobina correspondiente a la Fase S

Conclusiones generales

La aislación de la máquina esta ingresando en una etapa de degradación. Se sugirió:

- Realizar una limpieza de mayor intensidad en atadura de Fase S seguido de reparación mediante pintura
- Hacer una inspección del aislante por debajo de las cuñas retirando solo algunas de ellas

Trabajos en Atadura Fase S

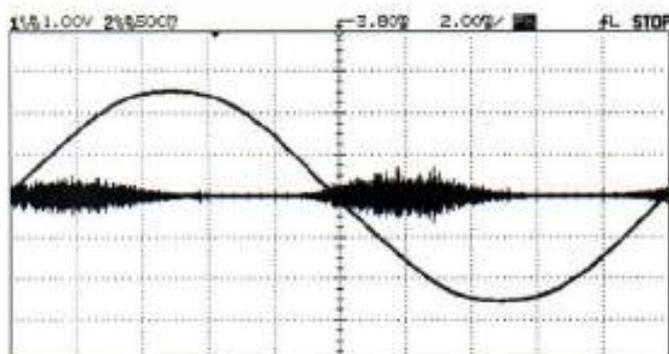
Localizadas puntos débiles del material aislante se procedió a una limpieza más específica, la cual es considerada artesanal.

El tiempo de duración de esta tarea es de 20 a 30 días según la cantidad de desvíos encontrados. A pesar de que se focalizan los trabajos sobre los puntos con particularidades, esta limpieza se hace sobre todo el estator. Con esto se logra también disminuir la intensidad de las descargas generalizadas.

Por medio de esta tarea se retira suciedad depositada entre cruces de bobinas y ataduras con cepillos de pequeño tamaño, similares a los utilizados por dentistas, levantando levemente las ataduras donde haga falta. Por ultimo se pinta el conjunto con pinturas semiconductoras y conductoras respectivamente.

Repetición de

Realiz
aparente para
Las e
quedando la n
recomendacio



destacó el de carga
io fueron eliminadas
de tener en cuenta las

Figura 89. Descargas parciales posterior reparación – Fase S

Ensayo de planta

Aprovechando la instalación del sistema de alimentación de corriente alterna personal eléctrico monta estructura metálica y cubre la carcasa con lonas. Con esto se logra oscurece el estator para poder apreciar visualmente las descargas eléctricas existentes.

Este ensayo se hace para observar las descargas parciales que logran salir a la superficie. El detector ultrasónico da la información de la ubicación e intensidad de las mismas pero no otorga información exacta acerca su carácter, visibles o audibles.

Esta prueba puede ser ejecutada a medida que se va realizando la "limpieza artesanal" con el objeto de apreciar los resultados parciales de esta.

Estado magnético del núcleo

A pesar de que la mayoría de los ensayos estatóricos están basados en el análisis del estado del aislamiento no hay que descuidar el estado del núcleo. Para este fin se hace un diagnostico basado en las perdidas magnéticas del mismo. La frecuencia de realización de esta prueba es menor que correspondiente al "Mantenimiento Programado" y es un trabajo mercerizado.

Las normas IEEE establecen que los niveles máximos tolerables son de 100 mA de corriente de pérdida, en cuadratura con la corriente que genera un flujo de inducción al 4% de 1 Tesla.

Las pérdidas magnéticas aparecen en los materiales de estas características por dos motivos: histéresis y corrientes parasitas. Se manifiestan cuando una masa magnética esta sometida a un campo variable o bien cuando el campo sea constante pero las masas estén en movimiento. Ambas se expresan de la siguiente manera:

- $P_{his} [W / Kg] = k \times f \times B^2$
- $P_{par} [W / Kg] = k' \times f^2 \times B^2$

Para este ensayo se magnetiza el núcleo a través del mismo circuito de alimentación de C.A usado en los ensayos del estado de aislación estatórica, el valor de tensión aplicada es tal que se obtenga el flujo de inducción al 4 % de un Tesla. El equipo de medición utilizado se denomina "El CID" y es justamente un detector de pérdidas magnéticas. Esencialmente consta de una bobina con la cual se recorre cada ranura en toda su longitud y por medio de amperímetro se detecta la corriente de fuga. Necesariamente debe estar el rotor extraído.

A modo de ejemplo mencionamos las mediciones realizadas el 27 de Julio de 1999 por la empresa ALSER S.R.L al generador N° 8. En aquella oportunidad las corrientes de fugas (Fig. 90) resultaron menores al límite tolerable. Se recomendó realizar nuevamente el mismo solo en caso de un reacuñado o bien ante la presencia de un cortocircuito que dañe el núcleo.

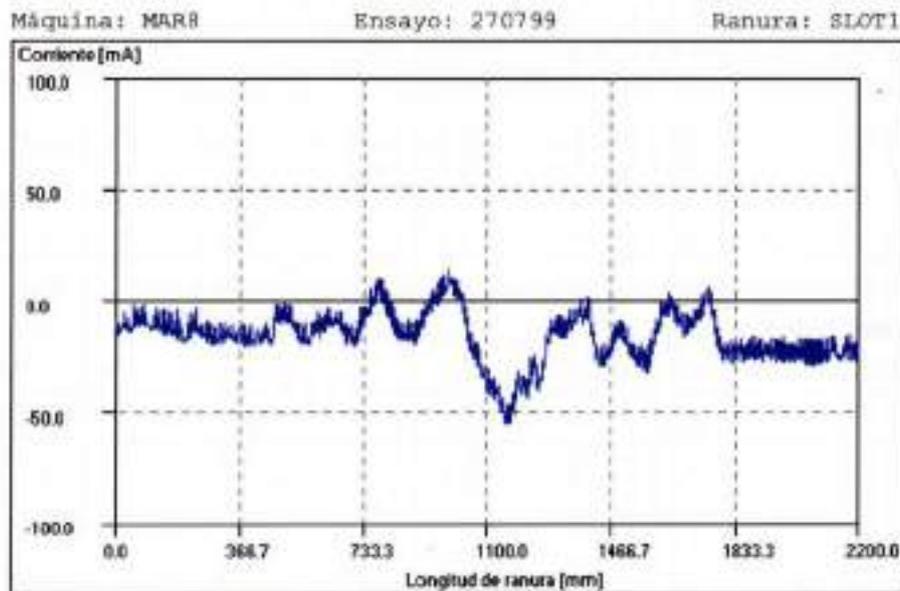


Figura 90. Corriente de fuga en núcleo

Ensayos rotóricos

Con el rotor posado sobre los caballetes y la limpieza ya ejecutada se procede a los ensayos pertinentes.

Debido a que el presente informe esta vinculado a las tareas propias del mantenimiento programado, en primera instancia queda de lado cualquier trabajo correspondiente a fallas imprevistas. Estas pueden ser cortocircuitos entre espiras, o entre espira y cuerpo rotórico o rotura de calotas. Debemos resaltar que las máquinas eléctricas son de gran fidelidad y que a lo largo del tiempo las posibles fallas que se han presentado fueron por casos puntuales. Con esto queremos aclarar que es muy baja la probabilidad de que las turbinas de vapor queden fuera de servicio por una falla eléctrica inesperada en el rotor. Igualmente cualquier trabajo extraordinario, en lo que respecta a los realizados durante la ejecución de un mantenimiento programado, puede ser programado sin que se vean afectadas temporalmente las tareas en la turbina y el regulador, pero si la fecha de finalización del mantenimiento total.

Inspección visual

Mediante esta se buscan desvíos como golpes o marcas en gorriones, anillos rozantes, calotas y cuerpo en general. Esta tarea esta encargada por personal de planta.

Se hace una inspección interna de las calotas, sin extraerlas, con asistencia de espejos. El objeto es revisar el estado de las ataduras, de cintas de fibra de vidrio, de los aislantes frontales de cabeza de bobinas. El alcance de esta inspección es parcial. En caso de encontrar ataduras rotas se deben extraer las calotas para reponerlas.

Ensayo de Calotas

Están basados en la determinación del estado estructural de las mismas. Para esto se contrata a empresa certificada por norma, para ejecución de inspección ultrasónica y líquidos penetrantes.

La inspección ultrasónica se hace sobre todo el diámetro exterior de la superficie de cada calota y tiene como alcance la determinación de fisuras en su volumen. Se pone mayor énfasis en las zonas cercanas el encastre por ser estas las de mayor sollicitación lo que conlleva a un aumento de la probabilidad de que existan micro-fisuras.

No solo se focaliza el análisis de las fisuras basándose en su tamaño sino también en su orientación y evolución en el tiempo. Que crezcan en tamaño, en cantidad y que haya varias sobre una misma recta son clara inminencia de un futuro colapso.

Terminada la inspección ultrasónica se limpian las calotas con acetona para proceder al ensayo de líquidos penetrantes sobre la superficie exterior.

En caso de encontrar fisuras se extraen las calotas para ejecutar este último ensayo sobre la superficie interior de las mismas.

Los antecedentes marcan fisuras en superficie exterior del orden del centímetro de largo y unas décimas de profundidad, no alineadas. La eliminación de estas consta de un pulido fino.

Ensayo de anillos rozantes

Se miden seis diámetros exteriores de cada anillo rozante para verificar que no haya ovalización o deformación. El diámetro original de fábrica es de 400 mm.

Entre mantenimientos programados la diferencia de diámetros pueden llegar a ser del orden de la décima de milímetro. Se ha tenido que rectificar alrededor de medio milímetro en el diámetro. Este valor es referencial y no solo depende de la cantidad de horas de marcha sino también de las condiciones de funcionamiento por lo que no puede establecerse rigurosamente una tasa de desgaste.

El beneficio que acarrea esta corrección es la disminución de una de las fuentes de desbalanceo.

Ensayos eléctricos

Son ejecutados por personal de planta y consisten esencialmente en la medición de la resistencia de aislación, medición de resistencia e impedancia de bobinas.

Para la medición de impedancia se utiliza tensión de ensayo alterna. Se aplica entre anillos y se varía hasta obtener una intensidad de corriente de 3 A, se mide la tensión y por la siguiente expresión se calcula la impedancia total del bobinado rotórico:

$$Z_T [\Omega] = \frac{U[V]}{3A}$$

Para la medición de resistencia se utiliza tensión de ensayo continua. Se aplica entre anillos y se varía hasta obtener una intensidad de corriente de 10 A, se mide la tensión y por la siguiente expresión se calcula la resistencia total del bobinado rotórico:

$$R_T [\Omega] = \frac{U[V]}{10A}$$

En protocolo se fija un valor de $R_T = 0,12746 \Omega$ referido a $18,2^\circ \text{C}$. Este valor no presenta indicaciones significativas a lo de la vida útil del generador pero si un leve aumento no alarmante.

Según las últimas mediciones (05/2006) $\rightarrow R_T = 0,1334$ a $18,6^\circ \text{C}$.

Se registran los valores de resistencia de aislación de un minuto con tensión de ensayo de 500 V. En este caso el valor mínimo referido a 20°C es de 100.000Ω .

La medición se hace entre cada anillo y carcasa. Los valores típicos registrados son del orden de los 20 G Ω . Se debe tener en cuenta la temperatura de cuerpo de rotor y el grado de sequedad del mismo.

Balanceo rotor

A diferencia de los ejes de AP y BP, el eje rotórico no sufre grandes desgastes. Por este motivo no necesariamente se debe balancear dicho eje entre mantenimientos programados. Hay que tener en cuenta que con el rectificado los anillos rozantes se logra disminuir el desbalanceo residual existente. La suciedad también puede ser causa de desbalanceo sobretodo la depositada en los agujeros de ventilación en el cuerpo rotórico. Si esta suciedad no permite el correcto pasaje del aire se van a producir zonas de puntos caliente donde el material se dilatará en distinta medida de lo normal y esto derivará en vibraciones excesivas durante el funcionamiento en servicio. Se entiende entonces que por medio de la limpieza se logra disminuir otra de las fuentes de desbalanceo.

Por último mencionamos que la extracción de calotas es condición necesaria y suficiente para recurrir a la ejecución del balanceo dinámico del eje.

Extracción de calotas

De ser necesario esta tarea puede ser ejecutada por personal de planta o terceros de acuerdo a necesidad.

El procedimiento de extracción de calotas es en caliente y responde a la siguiente secuencia:

- Se colocan zunchos de acero, sobre el diámetro exterior de la calota, con termocuplas para la medición de la temperatura durante el calentamiento
- Se retiran chavetas de sujeción radial
- Se calientan las calotas con mantas térmicas (Fig. 91) (*)
- Se eleva la temperatura a razón de 70 ° C por hora, hasta alcanzar los 350 ° C de temperatura superficial exterior promedio
- Se deja reposar por 10´ la calota con el objeto de homogeneizar la temperatura exterior
- Se coloca dispositivo de extracción (Fig. 92)
- Se gira la calota, en el mismo sentido que el arrollamiento amortiguador, hasta que se verifique la no interferencia de los dientes de encastre
- Se retira calota

(*) En su defecto con equipo de oxígeno – acetileno a través de picos de soplete.



Figura 91. Calentamiento con manta térmica



Figura 92. Sistema hidráulico de extracción

El tiempo de extracción según este procedimiento promedia las 5 horas. Se puede aumentar la intensidad de calentamiento para reducir este tiempo, pero se hace más difícil el control de la uniformidad en el calentamiento. La situación deseable es que el calentamiento sea lo más corto posible para minimizar el deterioro correspondiente a los esfuerzos térmicos.

Teniendo en cuenta que la extracción se lleve a cabo por cuestiones de inspección interna con líquidos penetrantes, se aprovecha el desmontaje para la ejecución de otras tareas.

Se renuevan la aislación y ataduras de cabeza de bobinas. Se limpian las mismas, en donde se puede encontrar polvo de color verdoso que es propio de la oxidación de cobre. Como consecuencia se logra mejorar la resistencia de aislación.

Historial

Desde la fecha instalación y puesta en servicio de las máquinas N° 7 y 8 a la fecha debemos destacar los siguientes temas:

- No se han presentado cortocircuitos
- No se han cambiado bobinas
- No se han reaislados las bobinas
- Se reemplazaron, por nuevas, una sola vez la calotas de cada máquina
- Se reemplazaron, por nuevos, los anillos rozantes del generador N°

Reemplazo de calotas

Las calotas presentan micro fisuras atribuibles al paso de los años pero en sendos alternadores hubo una causa adicional que justificaba la aparición de estas. Se descubrió que la composición química original de las calotas no era la más adecuada dado que sufrían un fenómeno de deterioro denominado "Tenso corrosión". Dicho fenómeno se produce en aceros austeníticos, por la presencia combinada de una tensión mecánica, humedad y esfuerzos térmicos.

Estas piezas están fabricadas en aceros austeníticos con aleaciones de manganeso, cromo y níquel. Con el tiempo se fueron cambiando los grados de aleaciones y mejorado las tecnologías del forjado y recocido.

Desde principio del siglo XX hasta mediados de 1920 se utilizaron las correspondientes a la muestra 1 (Tabla 22). A partir de esa fecha se fueron mejorando las tecnologías de conformación de la pieza. Y a partir de 1950 fueron modificándose también la composición química de la misma hasta obtener la calidad de la muestra 2. Esta aleación presentaba grandes cualidades mecánicas, que son necesarias, pero la aparición del fenómeno de "Tenso Corrosión" hizo que se haga un replanteo de dicha composición. A partir de la década del 80 empezaron a usarse calotas correspondientes a la muestra 3. La diferencia fundamental es el aumento significativo de la porción de cromo que es el elemento que da el carácter anticorrosivo a la calota. Todo este proceso de cambios fue estudiado por el fabricante del alternador, quien alertó a sus clientes y las acerías encargadas de la conformación de las calotas.

Muestra	Material acero	C %	Mn %	Cr %	Ni %
1	0,8/8/0,5	0,6-0,8	8	5	8
2	18/5	0,4-0,6	16,5-18,5	3,5-5	2
3	18/18	0-0,15	17,5-20,5	18-20	0,4-0,75

Tabla 22. Composición química

Las calotas de sendos grupos, a comienzo de los noventa, empezaron a presentar micro fisuras fuera de los límites aceptables. Se reconoció que el material de las mismas era del tipo 2 y conocido este fenómeno se decidió el reemplazo por nuevas con las modificaciones adecuadas. Las del generador N° 7 se reemplazaron en el año 1992 (Fig. 93) y las del N° 8 en el 1999.



Figura 93. Rotor con calotas nuevas

El estudio de este fenómeno trajo aparejado algunas recomendaciones y cambios de pensamientos.

Hoy en día se recomienda la extracción de las calotas aproximadamente en periodos comprendidos entre 8 y 12 años o entre 60.000 a 100.000 horas de marcha. Antes solo ante necesidad, ya que adoptaban un criterio conservador, puesto que durante la extracción y montaje se generan grandes esfuerzos térmicos como consecuencia del calentamiento necesario para estas maniobras.

Las fisuras superficiales en estas piezas no deben exceder los 30 mm de largo y una profundidad máxima de 2 mm. Pero esto solo es una recomendación no muy conservadora ya que de estar próximos a estos valores estaríamos hablando de calotas con alto riesgo del colapso. Se pueden rectificar las campanas para reparar esta falla. Solo se permiten tres puntos reparados y deben hallarse a una distancia mínima de 50 mm entre ellos.

En mantenimientos generales solo se recomienda el ensayo con tintas penetrantes sobre la superficie exterior y los dispositivos de sujeción. Y en caso de extracción se debe incluir el ensayo de tintas a la superficie interior prestando mayor atención en la zona de apriete y cierre de seguridad.

De observarse desvíos en los ensayos de tintas se recomienda la inspección ultrasónica; determinar la composición química; hacer análisis metalográficos de zonas con y sin fisuras y estudio de dureza en dichas zonas.

Reemplazo de anillos rozantes

Los anillos rozantes, correspondientes al rotor de TV 7, fueron reemplazados por nuevos dado que quedaron fuera de medida (Fig. 94). Esto sucedió por única vez en el año 1992.



Figura 94. Anillos rozantes nuevos

Excitatriz

Cuando el turbogruppo queda fuera de servicio, o sea, disponible para la ejecución del mantenimiento, se deben retirar todas las escobillas, tanto de la excitatriz principal como de la piloto. Esta se hace para evitar el fenómeno de soldadura en frío. Lo mismo se realiza con las escobillas correspondientes a los anillos rozantes.

Luego se procede al desmontaje del bloque dividido en dos etapas como se detalla a continuación:

1º Etapa: desmontaje parcial *in situ*. Se desconectan conexiones de llave de campo y regulador. Se retira estator de excitatriz piloto, previa desmagnetización del mismo. Se retiran mitades superiores de cojinetes N° 7 y 8. Se desacoplan ejes y se retira rotor piloto. Se retiran todas las tapas y dispositivo portaescobillas.

Con asistencia de grúa se traslada el conjunto restante, a sector dispuesto para la finalización del desmontaje, incluida la base metálica en la cual se colocan las eslingas.

2º Etapa: desmontaje final en lugar predeterminado. Se desmonta excitatriz principal y se separa el rotor del estator. Se retiran mitades inferiores de cojinetes N° 7 y 8. Se retiran pedestales de cojinetes.

Finalizado el desmontaje procede a la ejecución de las tareas pertinentes.

Con el transcurso de las horas de marcha la mayor parte del desgaste se presenta en el colector de la excitatriz principal. Dicho desgaste no es uniforme por lo cual se debe rectificar el diámetro exterior del mismo. A consecuencia de esto se tiene que retirar una cierta porción de mica entre delgas y luego biselar el cobre a 45 ° para quitar el filo remanente (Fig. 95). Esta tarea, de carácter artesanal, requiere demasiado tiempo aproximadamente un mes. Este es uno de los motivos por el cual se reemplaza por una excitatriz de reserva la cual fue acondicionada con antelación. El desmicado es necesario para lograr tener una conmutación adecuada y evitar el contacto de la mica con las escobillas. Si esto sucediera se vería favorecida la formación de partículas abrasivas de mica las cuales contribuirían al aumento de la tasa de desgaste. El biselado contribuye a la reducción del deterioro de las escobillas. El eje retirado queda estivado para su acondicionamiento una vez terminado el mantenimiento programado.

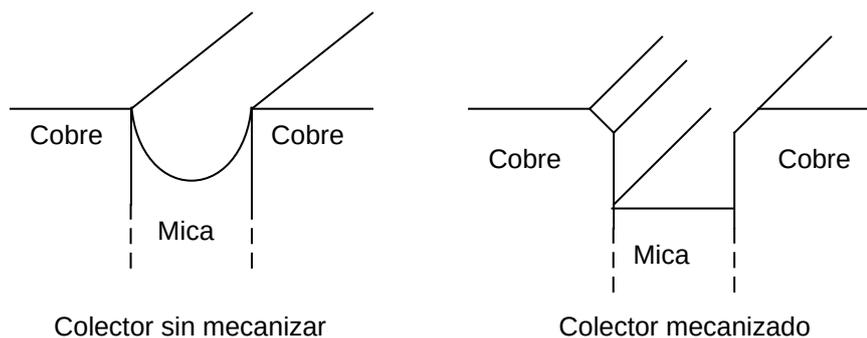


Figura 95. Mecanizado de colector

Limpieza

Los ajustes, realizados en su mayoría por personal de planta, de este bloque están ligados básicamente a la limpieza de los generadores y del conjunto. La suciedad que se presenta es de tipo grasoso compuesta por la combinación de partículas de carbón y el producto de los vapores de aceite, proveniente de los cojinetes N° 6, 7 y 8. Esta sustancia es de carácter conductor por lo que se ve alterada la resistencia de aislación de las máquinas eléctricas. La misma debe ser

recuperada, esto se logra con limpieza líquida con Saf – Sol, luego un secado en horno para finalizar con el pintado de los estatores con barniz dieléctrico. Se verifican si los valores de resistencia de aislación superan a los mínimos correspondientes, para esto se utiliza el AVO Megger.

Alineación

Habilitada la máquina para el montaje, previo montaje del alternador, se coloca solamente la base metálica. Sobre ella se disponen los pedestales de cojinetes N° 7 y 8 y las respectivas mitades inferiores. La alineación de la excitatriz principal es diferente a la de los otros ejes. En este caso no se modifican la posición de los panes de apoyo, sino que se cambia la posición de los pedestales. Para relevar las mediciones solo se monta el eje de dicha excitatriz, se utilizan comparadores asociados a este. Dado que las cañerías de lubricación en servicio están desconectadas, se utiliza aceite sintético colocado sobre respectivos cojinetes y gorriones. Durante esta tarea la excitatriz principal es girada manualmente y dicho aceite, de menor escurrimiento, confiere la película lubricante requerida para evitar el contacto metal-metal evitándose así una fuente de desgaste no deseado. Cuando se logra alcanzar la alineación dentro de las tolerancias establecidas se fija la posición final de los pedestales. Los movimientos ejecutados están por debajo del milímetro, pero esta magnitud justifica la contracción de nuevas espigas de mayor diámetro. Los correspondientes agujeros también deben ser mecanizados para lograr el correcto encastre de las espigas.

Una vez alineado el eje de la excitatriz principal se procede al montaje comenzando por colocar dicho eje dentro de su estator para luego montar el conjunto sobre la base.

Control tensión resortes de portaescobillas

Una de las tareas a destacar es el montaje del sistema de escobillas. Los porta escobillas deben estar colocados a una distancia radial de 2 mm aproximadamente del colector. Los resortes deben ejercer una tensión determinada por protocolo. Su verificación se realiza con un método que no por su simplicidad podemos dejar de destacar que es de gran ingeniosidad. Para el mismo se requiere de un dinamómetro y de la colocación de un trozo de papel entre las superficies de apoyo (escobilla y colector). Se tira del dinamómetro colinealmente a la recta de acción de la fuerza ejercida por el resorte, hasta que el papel se aleje de la posición en que estaba inicialmente (se caiga). En el momento que sucede esto se registra el valor de tensión indicado en el instrumento para luego ajustar o no el resorte a fin de lograr la tensión buscada. Este trabajo es análogo para el ajuste de las escobillas correspondientes a los anillos rozantes, en este caso la tensión es de 130 gramos.

Balanceo

El desbalanceo residual que se presenta es producto de la ovalización del colector y en menor parte de la suciedad presente. Se desprende que con la utilización de la excitatriz de reemplazo se eliminan las fuentes de error. Igualmente puede tomarse la decisión de realizar el balanceo dinámico al igual que el correspondiente a los ejes de turbina. Esta actividad es tercerizada, la cual se lleva a cabo estando los ejes de los generadores principales y pilotos acoplados.

Conclusión

Todos los resultados fueron analizados y discutidos a lo largo del informe, de manera que aquí se destacan los ítems pertinentes a los objetivos principales.

- Se describió correctamente la instalación Turbovapor, lo que nos permitió conocer la función de cada uno de los componentes que integran la misma, y su rol en conjunto para obtener el resultado final. El mismo es la generación de energía eléctrica basada en un equilibrio técnico – económico global, entre un gran número de variables, con el objeto de lograr el máximo aprovechamiento de la instalación.
- Se estudio el ciclo termodinámico por completo, comprobándose así lo establecido por la teoría.
- Se calcularon los rendimientos y potencias características de la instalación en función de las distintas variantes presentes tanto para lo estipulado por el fabricante, como para la realidad actual. Esto nos permite cuantificar el funcionamiento de cada uno de los componentes de la instalación para el análisis de futuras modificaciones.
- Se realizo la planificación del “Mantenimiento Programado” en forma correcta de acuerdo a lo estipulado y recomendaciones de personal calificado de planta. Se respetaron las pautas de duración de cada tarea y la extensión total del mantenimiento, como así también la secuencia lógica y la utilización de los recursos humanos.

Como corolario del presente informe, se adquirió un sentimiento de pertenencia hacia la instalación sustentado en el buen manejo de las relaciones humanas, y la satisfacción generada por la utilización de las herramientas adquiridas durante nuestra carrera universitaria, como así también el traspaso de los conocimientos recibidos por nuestros compañeros.

A su vez, motivó a la concientización de la correcta utilización de los recursos necesarios en la generación de energía, de manera de minimizar el impacto ambiental que el uso de los mismos provoca.

Bibliografía

Turbinas de Vapor y de Gas – L. Vivier – Ediciones Urmo
Turbinas de Vapor – Edwin F. Church – Editorial Alsina
Turbinas de Vapor, Partes I y II – A. V. Schegliáiev – Editorial Mir Moscú
Turbomáquinas Térmicas – Claudio Mataix – 3º edición – CIE Inversiones Editoriales
Teoría de las Máquinas de Corriente Alterna – Langsdorf – 2º edición – Editorial Mc Graw - Hill
Tratado de Electricidad, Tomo II – Ing. Francisco L. Singer – Editorial Neo - Técnica
Problemas de Termodinámica – Diez García – Nueva Librería
Fundamentos de Termodinámica Técnica, Primer tomo – M. J. Moran y H. N. Shapiro
Instrucciones de Servicio, Tomo I, II y III – Escher Wyss
Instrucciones de Operación y Mantenimiento – Babcock & Wilcox Ltd
Protocolos de Ensayos en Fábrica – Kennedy y Donkin
Apuntes de Cátedra – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Mar del Plata

Ensayos No Destructivos – Cátedra de Metalurgia Física – Ing. F. Dommarco
Generación de la Energía Eléctrica – Ing. C. Dimenna
Lubricación – Tribología. Fricción, Desgaste y Lubricación – Ing. M. Martínez Gamba
Materiales Eléctricos – Ing. C. Agüero
Operación y Mantenimiento de Máquinas Eléctricas – Ing. T. A. Urrutia y J. C. Stecca

Links

www.centralesdelacosta.com.ar
www.cammesa.com.ar
www.conimed.com.ar
www.wikipedia.org
www.semapi.com.ar

Normas

ISO 14.001 - Extractos
ISO 14.000 – Extractos
IRAM 4062 – Ruidos Molestos al vecindario – Métodos de medición y clasificación
IRAM N° 2203 y N° 2325 – Aislación eléctrica

Informes de ensayos y trabajos

ENDs Turbogruppo N° 8 – ATEND S:R:L 05/2006
Control de Fisuras en Campanas – ALSER S.R.L. 07/05/1997
Diagnostico de aislación estatórica – CONIMED S:A:24/10/2003
Provision Y Montaje de dos calotas TV N° 7 – ABB ALSTOM 18/12/1999
Mantenimiento Predictivo, Vibraciones Mecánicas - SEMAPI S.A. – Revisión 2000

Folletos Centrales de la Costa Atlántica S.A.– Seguridad e Higiene, Residuos Especiales

Información transmitida en forma oral y escrita por personal de planta

ANEXO I

Turbina

- Esquema de puntos fijos y direcciones de dilatación
- Plano: Izaje tapas de carcasa AP y BP
- Plano: Izaje rotores AP y BP

ANEXO II

Regulador

- Croquis: amplificador de la regulación de la velocidad
- Croquis: Válvula Stop
- Croquis: Válvula parcializadora

ANEXO III

Alternador

- Plano: corte longitudinal
- Plano: introducción y extracción de rotor
- Plano: plan de montaje

ANEXO IV

Excitatriz

- Plano: Ensamble
- Plano: Corte longitudinal

ANEXO V

Cálculos termodinámicos

- Esquema de balance térmico

ANEXO VI

Cálculos termodinámicos

- Planillas de cálculo
- Diagrama entrópico

ANEXO VII

Planificación del “Mantenimiento Programado”

- Project: “mantenimiento Programado”

INDICE

Resumen	2
Panorama de la empresa	3
Centrales de la empresa.....	3
Sistema de gestión ambiental	3
Negocio energético.....	4
Central Eléctrica 9 de Julio	6
Equipos generadores	6
Personal activo	7
Impacto ambiental	8
Impacto en la comunidad	8
Seguridad e Higiene	9
Grupo Turbovapor	11
Turbina de Vapor	11
Regulador	20
Alternador.....	25
Excitatriz	29
Cojinetes.....	32
Sistema de aceite	33
Ciclo termodinámico	35
Circuito cerrado de agua	35
Análisis de la influencia de las extracciones.....	39
Régimen de servicio	46
Programación y seguimiento	57
Introducción teórica	57
¿Qué es el Software Microsoft ® Project?.....	59
Mantenimiento programado	60
Planificación del Mantenimiento Programado	62
Programación	62
Discusión	66
Resultado final	66
Descripción de tareas	67
Turbina	68
Regulador	95
Alternador.....	99
Excitatriz	118
Conclusión	120
Bibliografía	121
Anexo I	122
Anexo II	126
Anexo III	130
Anexo IV	134
Anexo V	137
Anexo VI	139
Anexo VII	150

Resumen

Nos presentamos como Lucas Federico Scarpati y Matías José Vallelunga, estudiantes de las carreras de Ingeniería Mecánica (8980) y Electromecánica (9811) respectivamente, en la Facultad de Ingeniería dependiente de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

A la fecha de ejecución del presente informe, nos desempeñamos profesionalmente en la Central Termoelectrica 9 de Julio perteneciente a la empresa Centrales de la Costa Atlántica S.A. Esto motivó la ejecución del trabajo final de grado en dicho lugar.

Los objetivos principales planteados son los siguientes:

- Describir la instalación turbovapor
- Estudiar el ciclo termodinámico
- Calcular los rendimientos de la instalación
- Realizar la planificación del mantenimiento programado de turbina de vapor N° 7 y 8

A su vez se hará la planificación del mantenimiento propuesto mediante la asistencia del Software Microsoft® Project. Dicha planificación constará del desmontaje, ensayos, ajustes y montaje del equipo completo, teniéndose en cuenta también los recursos humanos necesarios.

Se establecen además objetivos secundarios:

- Afianzar y volcar los conocimientos adquiridos en la facultad
- Aprender el lenguaje técnico utilizado en planta
- Poner a prueba nuestro desempeño en el manejo de las relaciones humanas

Panorama de la empresa

Centrales de la Costa Atlántica S.A. desarrolla actividades de generación de energía eléctrica a través de la operación de sus cuatro centrales ubicadas en la costa atlántica bonaerense. La sede institucional de la empresa se encuentra en la ciudad de La Plata, capital de la provincia de Buenos Aires.

Centrales de la empresa

Las cuatro centrales pertenecientes al grupo empresarial son:

- *Central Termoeléctrica Necochea*, situada en el Puerto Quequén de esta ciudad balnearia. Cuenta con 4 unidades generadoras Turbovapor que funcionan con combustible gaseoso o líquido, es decir Gas Natural y/o Fuel oil y su potencia instalada nominal es de 206 MW.
- *Central Termoeléctrica 9 de Julio*, ubicada en las cercanías del Puerto de la ciudad de Mar del Plata. La potencia nominal instalada es de 160 MW, y su parque generador está compuesto por 5 unidades Turbogas y 2 Turbovapor que funcionan con Gas Natural durante la mayor parte del año, pudiendo también utilizar como combustibles alternativos Gas Oil y Fuel Oil respectivamente.
- *Central Turbogas Mar de Ajó*, cuenta con 2 equipos que funcionan con Gas Natural o Gas Oil. Tiene una potencia nominal instalada que alcanza los 32 MW.
- *Central Turbogas Villa Gesell*, cuenta con 3 equipos que funcionan con dos opciones de combustible: Gas Natural y Gas Oil. La potencia nominal instalada es de 28 MW.

La potencia nominal instalada de Centrales de la Costa Atlántica S.A. es de 426 MW.

Sistema de gestión ambiental

Centrales de la Costa Atlántica S.A. asumió, en septiembre del año 2.002, el compromiso de implementar un Sistema de Gestión Ambiental tomando como referencia la norma ISO 14001, tal como lo establece el Ente Nacional Regulador de Energía (ENRE) en su artículo 2º de la resolución N° 555 / 2.001.

Un Sistema de Gestión Ambiental (SGA), está formado por políticas, procedimientos, instructivos y recursos correspondientes, para cumplir y mantener permanentemente, una gestión ambiental efectiva en la empresa.

Este sistema implica evaluar periódicamente (auditorías) los impactos ambientales, comprometiéndose a cumplir con las leyes y regulaciones ambientales para así promover la mejora continua y progresiva de la gestión ambiental.

Alcanzar la certificación del Sistema de Gestión Ambiental no es sólo un requisito que deben cumplir quienes participan del Mercado Eléctrico, sino también una apuesta a compatibilizar la acción productiva de las empresas con la preservación del medio ambiente.

La normativa ISO 14001 son las especificaciones técnicas del Sistema de Gestión Ambiental, y corresponden a la única normativa de requerimiento en la serie ISO 14000. En otras palabras, esta norma establece los requisitos sobre los elementos de un SGA, la cual exige a la empresa su cumplimiento para así lograr su certificación, luego de pasar por una auditoría de un tercero independiente debidamente registrado.

La serie ISO 14000 corresponden al conjunto de normas y sus estándares diseñados para ayudar a las empresas a establecer y evaluar objetivamente su SGA. Estas normas exigen básicamente, que se cumpla con la legislación interna del país y se establezca una política de Mejoramiento Continuo orientada en el sentido de ciertas tendencias y prácticas de alto consenso social, que la legislación pudiera no haber incluido aún.

Negocio energético

En calidad de agente generador, *Centrales de la Costa Atlántica S.A.* forma parte del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM), y sus operaciones están integradas al Sistema Interconectado Nacional (Fig. 1). La conexión a dicho sistema es través del tendido eléctrico de 132 KV. Particularmente la Central 9 de Julio esta vinculada al sistema mediante tres tendidos diferentes a distintas ciudades. Una conexión con Balcarce, otra con Quequén y la restante con Miramar. Estas últimas dos convergen en Necochea.



Figura 1. Esquema geográfico del Sistema Interconectado Nacional – Provincia Bs. As.

Los flujos de potencia activa y las tensiones se representan mediante el esquema unifilar (Fig. 2) asociado a la región de influencia, donde se observa claramente las conexiones entre dicha Central y el Sistema Interconectado Nacional.

Al estar ubicadas estratégicamente abastecen de energía a importantes ciudades de nuestra costa atlántica, principalmente a Mar del Plata y Necochea, jugando un rol fundamental durante las temporadas estivales debido a la gran afluencia de turismo que se registra en la costa bonaerense. En épocas invernales también son de gran importancia, dada la escasez de generación a nivel nacional, época del año en la cual las empresas generadoras acostumbran a realizar paradas programadas para llevar a cabo tareas de mantenimiento.

Todo tipo de parada, ya sea por mantenimiento y/o reparación, deben ser del menor tiempo posible, con el fin de que las turbomáquinas estén disponibles para los fines de generación. Se declara el estado de disponibilidad y características (potencia máxima disponible, regulación de frecuencia y control de tensión) de las mismas ante la Compañía Administradora del Mercado

Mayorista Eléctrico - CAMME S.A., quién se encarga principalmente de la coordinación de las operaciones de despacho, y las cataloga según el estado, de la siguiente manera:

- S: en servicio
- D: disponible – reserva en frío
- I: indisponible
- A: fase de arranque
- G: disponible con falta combustible

Las máquinas declaradas como disponibles constituyen un “ranking” basado en el costo de generación. Se confecciona partiendo desde la máquina de menor costo hasta la de mayor. De la misma manera CAMME S.A. es quién solicita que entren en servicio en función de la demanda. El costo de generación está dado por el costo de operación más el costo de transporte desde su nodo de conexión hasta el mercado. La remuneración está fijada por la unidad de reserva en frío siguiente a la de mayor costo que se encuentra en servicio.

También se cataloga a las mismas de acuerdo a la posibilidad de prestar servicios adicionales, como la regulación de frecuencia y el control de la tensión. Por estos adicionales se percibe una remuneración extra.

Se aclara que no siempre entran en servicio las máquinas a pedido de CAMME S.A. sino que también pueden generar para distribuidores regionales o bien para empresas del sector privado. Todo tipo de contrato celebrado con organismos particulares debe ser igualmente notificado a CAMME S.A.

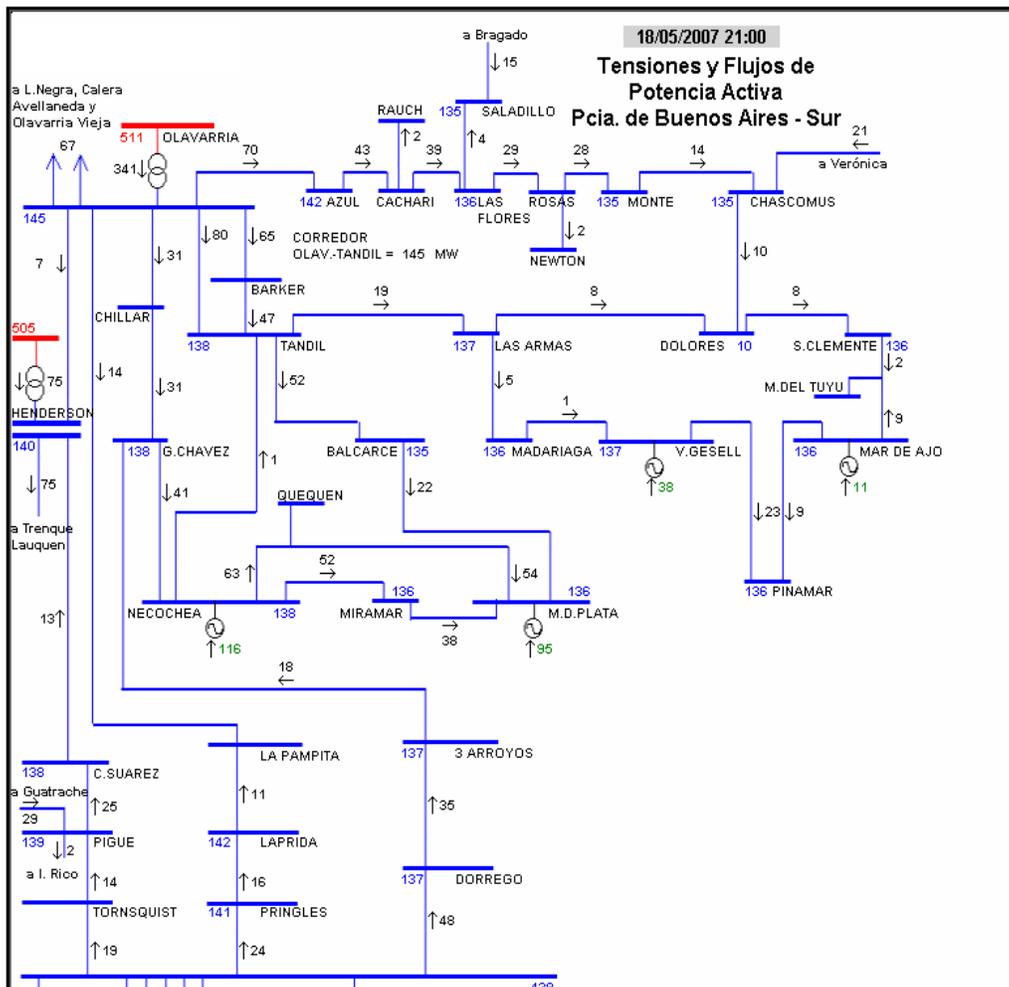


Figura 2. Esquema unifilar – Provincia de Bs. As. Zona Sur

Central Eléctrica 9 de Julio

Dado que el trabajo del presente informe se basa en la Central Termoeléctrica 9 de Julio (Fig. 3), se detallarán algunas de sus características de acuerdo a la siguiente clasificación:

- Equipos generadores
- Personal activo
- Impacto ambiental
- Impacto en la comunidad
- Seguridad e higiene



Figura 3. Fachada de la Central 9 de Julio

Equipos generadores

Actualmente el total de la potencia nominal instalada se encuentra distribuida de la siguiente manera:

- Turbogas N° 12: marca AEG – 16 MW (16 MW)
Fecha de puesta en servicio: 06/01/1993
- Turbogas N° 13: marca ALSTHOM – 25MW (23 MW)
Fecha de puesta en servicio: 08/12/1990
- Turbogas N° 19: marca HITACHI – 17,350 MW (16 MW)
Fecha de puesta en servicio: 08/02/1971
- Turbogas N° 20: marca HITACHI – 17,350 MW (16 MW)
Fecha de puesta en servicio: 04/03/1971
- Turbogas N° 21: marca ALSTHOM – 25MW (23 MW)
Fecha de puesta en servicio: 20/01/1984
- Turbovapor N° 7: marca ESCHER WYSS - BROWN BOVERI - 30 MW (30 MW)
Fecha de puesta en servicio: 17/04/1972
- Turbovapor N° 8: marca ESCHER WYSS - BROWN BOVERI - 30 MW (27 MW)
Fecha de puesta en servicio: 08/09/1972

() Valor de potencia máxima declarado a la fecha ante CAMME S.A.

Personal activo

El personal activo en la planta es de 140 personas encuadradas según el organigrama vigente (Fig. 4). En el mismo se incluye también el personal correspondiente a Villa Gesell y Mar de Ajó puesto que están a cargo de la Gerencia de Planta.

Para las tareas de mantenimiento de las turbinas de vapor y los equipos auxiliares se dispone de la mano de obra aportada por el personal de Mantenimiento de Máquinas, Eléctrico e Instrumental. Cada sector esta comprendido por una cantidad de 15, 12 y 4 personas respectivamente, asumiendo las siguientes incumbencias en el mantenimiento:

- Turbina: personal de Máquinas e Instrumental
- Alternador: personal de Máquinas, Eléctrico e Instrumental
- Excitatriz: personal de Máquinas, Eléctrico e Instrumental
- Regulador: personal de Máquinas, Eléctrico e Instrumental

Las tareas de montaje y desmontaje son exclusividad del personal de Máquinas.

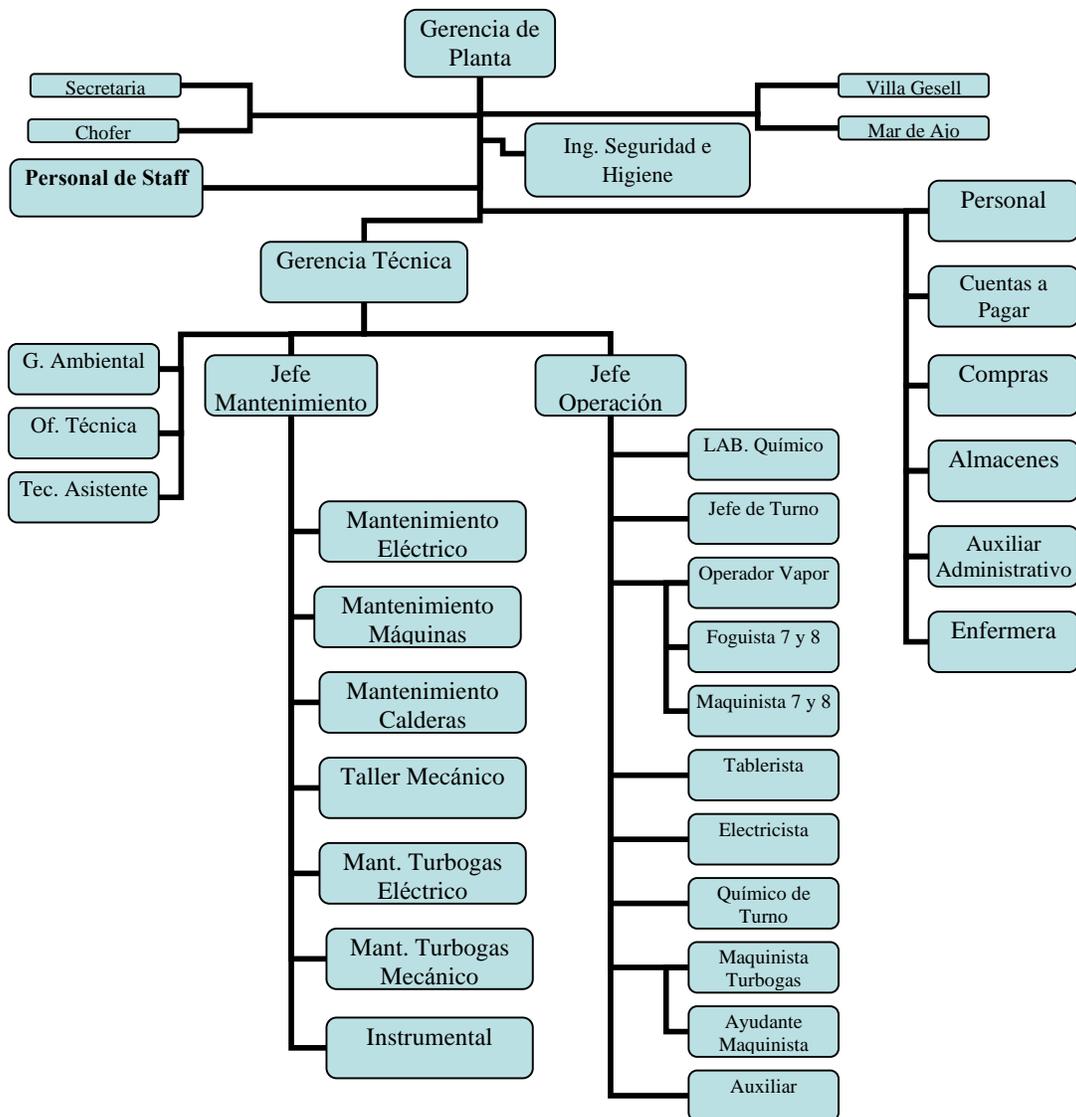


Figura 4. Organigrama del personal activo

A pesar de que conformamos el Personal de Staff, desempeñamos nuestras actividades para el grupo de Mantenimiento de Máquinas. Para la ejecución éste trabajo final de grado interactuamos a su vez con Gerencia de Planta y Técnica, Jefe de Mantenimiento y Mantenimiento Eléctrico.

Impacto ambiental

Las plantas termoeléctricas son consideradas fuentes importantes de emisiones atmosféricas y pueden afectar la calidad del aire en el área local o regional. La combustión que ocurre en los procesos termoeléctricos emite dióxido de sulfuro (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y partículas (que pueden contener metales menores). Las cantidades de cada uno dependerán del tipo y tamaño de la instalación; del tipo y calidad del combustible; y de la manera en que se lleva a cabo la combustión. La dispersión y las concentraciones de estas emisiones, a nivel de la tierra, son el resultado de la interacción compleja de las características físicas de la chimenea de la planta; de las cualidades físicas y químicas de las mismas; de las condiciones meteorológicas en el sitio, o cerca del mismo durante el tiempo que se requiere para que las emisiones se trasladen desde la chimenea hasta el receptor a nivel de la tierra; de las condiciones topográficas del sitio de la planta y las áreas circundantes; y de la naturaleza de los receptores (por ejemplo, seres humanos, cultivos y vegetación nativa).

En la Central Termoeléctrica 9 de Julio, las emisiones a la atmósfera de estos compuestos nocivos se encuentran dentro de los valores admisibles por reglamentación, considerando también el hecho de cumplir con la certificación de la norma ISO 14001 mediante auditoria externa cada 3 años, debiendo ser recertificado anualmente hasta la próxima certificación.

Impacto en la comunidad

Otros impactos que se producen son los visuales y auditivos. En la Central Termoeléctrica 9 de Julio, el impacto visual se encuentra atenuado por el hecho de contar con los turbogrupos de vapor N° 7 y 8 en el interior de la construcción edilicia. Lo mismo ocurre con la estación transformadora de 132 KV, la cual se encuentra dentro de otra edificación. En cuanto a las turbinas de gas, a pesar de estar emplazadas en el exterior, el impacto visual es bajo debido a que componen módulos compactos y la Central cuenta con un parque visualmente agradable.

Respecto al ruido, la atención se centraliza en las turbinas de gas, por estar emplazadas en el exterior. Para ello se cumple con la resolución SPA N° 159/96, la cual aprueba el método y clasificación de ruidos molestos al vecindario fijados por la norma IRAM 4062/84.

Dicha norma establece niveles máximos para aquellos ruidos que sean claramente atribuibles a una fuente determinada. Así, se estipulan valores máximos en el lugar receptor.

Se basa en la idea de establecer lo que se denomina un *nivel básico*, es decir un nivel de ruido ambiental máximo aplicable en determinadas condiciones idealizadas. Como tales condiciones en general no se verifican, se corrige dicho criterio básico en función del grado de apartamiento de esas condiciones.

El nivel básico corresponde a 40 dBA, y las correcciones (Tabla 1) se efectúan por *día* (laborable, hábil o feriado) y *hora* (diurna o nocturna), por *zona* (por ejemplo rural, urbano, predominantemente industrial, etc.), y por *ubicación de la medición del ruido* (interior, exterior).

CORRECCIONES POR UBICACIÓN K_U

Ubicación	Corrección en dBA
Interiores: - linderos con la vía pública - no linderos con la vía pública	0 -5
Exteriores: - Áreas descubiertas no linderas con la vía pública	5

CORRECCIONES POR PERÍODO K_h

Período	Corrección en dBA
Días hábiles: de 6 a 22 hs.	5
Días feriados: de 6 a 22 hs.	0
Noche: de 22 a 6 hs.	-5

CORRECCIONES POR ZONA K_z

Zona	Tipo	Corrección en dBA
Rural (residencial)	1	-5
Suburbano con poco tránsito	2	0
Urbano (residencial)	3	5
Residencial urbano con alguna industria liviana o rutas principales	4	10
Centro comercial o industrial intermedio entre tipos 4 y 6	5	15
Predominantemente industrial con pocas viviendas	6	20

Tabla 1. Correcciones al criterio básico de 40 dBA según ubicación, período y zona.

El nivel calculado (N_c) se obtiene a partir del nivel básico de 40 dBA (N_b) y de las correcciones K_U , K_h y K_z .

$$N_c = N_b + K_U + K_h + K_z$$

La calificación entre ruido MOLESTO y NO MOLESTO se basa en la diferencia entre el nivel de evaluación total (medido experimentalmente) y el nivel calculado N_c . Si la diferencia entre dichos valores es menor que dBA se considera que el ruido es no molesto, si en cambio la misma es mayor o igual a 8 dBA el ruido es molesto.

En la Central 9 de Julio periódicamente se realizan mediciones de ruidos, dando siempre dentro de los parámetros normales.

Seguridad e Higiene

La política en Seguridad e Higiene en la central es de carácter primordial, en base al tipo de trabajo y riesgo al que su personal se encuentra sometido. Para ello se cuenta con el sector de Gerencia Ambiental, que se encarga de:

- Instruir a la totalidad del personal en materia de Seguridad e Higiene
- Cumplir con la Ley N° 19.587/72 de *Higiene y Seguridad en el Trabajo*, con su decreto reglamentario N° 351/79, y la Ley N° 24.557/95 de *Riesgos del Trabajo*
- Hacer cumplir con la utilización de la indumentaria de trabajo y de los elementos de protección personal (casco, guantes, zapatos de seguridad, elementos de protección auditiva, anteojos, mascarilla, etc.)
- Fijar señalización acorde a las normas de seguridad e higiene
- Gestionar la manipulación y disposición final de los residuos

Tomando especial atención en la gestión de los residuos, se puede dar una definición de residuos, para luego considerar los tipos de residuos que se generan la Central Termoeléctrica 9 de Julio.

“Se considera que una sustancia u objeto, gaseoso (siempre que se encuentre contenido en recipientes), sólido, semisólido o líquido se convierte en residuo en el momento en que su poseedor, productor o generador no puede utilizarlo destinándolo al abandono, o se desprenda o tenga obligación legal de hacerlo.”

Se pueden distinguir los siguientes grupos de residuos:

- *Residuos domésticos:* son los provenientes de restos de alimentos, envases de productos alimenticios, elementos de vidrio no contaminados, embalajes de productos inocuos y residuos de las tareas de administración y limpieza de oficinas, talleres, baños y enfermería.
- *Residuos especiales:* son los que resultan de la utilización de aceites lubricantes (minerales y sintéticos), combustibles líquidos (gas oil y fuel oil), solventes halogenados, disolventes orgánicos, pinturas, lacas, barnices, resinas epoxídicas, zinc o compuestos del zinc, cobre o compuestos del cobre, mercurio o compuestos del mercurio, plomo o compuestos del plomo, hipoclorito de sodio, ácido sulfúrico, soda cáustica, morfina, hidracina, fosfato trisódico, amianto (polvo y fibras) pilas y baterías, etc.
- *Residuos patogénicos:* son los provenientes de la actividad de la enfermería y comprenden a los residuos farmacéuticos, vendas, materiales descartables con o sin contaminación sanguínea, algodones, apósitos y material de vidrio.

El poseedor o generador de residuos especiales o patogénicos tiene la responsabilidad legal de aplicar una adecuada gestión de los mismos, desde el momento inicial de su generación hasta su disposición final.

La gestión de los residuos comprende al conjunto de actividades encaminadas a dar a los mismos el destino final más adecuado de acuerdo con sus características. El proceso de gestión comprende a las siguientes operaciones:

- *Separación:* la misma se lleva a cabo en cada sector de trabajo por el personal que presta sus servicios en el mismo, mediante la utilización de recipientes para el depósito de los residuos domésticos, especiales y patogénicos según corresponda. Además de los recipientes ubicados en cada sector, se han estipulado cinco sitios de separación y disposición generales, los que se identifican mediante cartelera específica. Los recipientes para el depósito de residuos domésticos son de color blanco, conteniendo en su interior bolsas de polietileno del tipo domiciliario sin un color definido. Los recipientes para el depósito de residuos especiales o patogénicos son de color negro, conteniendo en su interior bolsas de polietileno de 120 micrones de espesor de color rojo.
- *Recolección:* la recolección periódica de los residuos está a cargo del personal de limpieza contratado. Los residuos domésticos son dispuestos en forma final en el relleno sanitario municipal, estando su transporte hasta el mismo a cargo de las empresas recolectoras tradicionales.
- *Almacenamiento:* los residuos especiales y patogénicos son almacenados transitoriamente en el depósito que la Central 9 de Julio ha dispuesto para tal fin, hasta que se procede a su transporte y disposición final.

Transporte y Disposición final: estas operaciones son llevadas a cabo periódicamente a través de transportistas y operadores debidamente autorizados según los requerimientos establecidos por la ley 11720 – Decreto 806 / 97.

Grupo Turbovapor

El término turbina suele aplicarse, por ser el componente principal, al conjunto de turbina conectada a un generador para la obtención de energía eléctrica. Por lo expresado se entiende por turbina al conjunto comercial integrado por: turbina, regulador, alternador y excitatriz.

A continuación se realizará una descripción de los cuatro bloques componentes del grupo (Fig. 5), en función de las unidades emplazadas en la Central Termoeléctrica 9 de Julio. También se hará hincapié en los cojinetes y en el sistema de aceite.

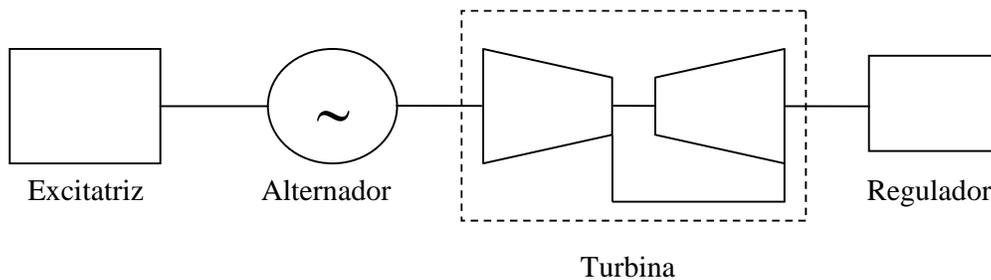


Figura 5. Conjunto completo de turbina de vapor

Turbina de Vapor

La turbina de vapor (Fig. 6) puede definirse como una máquina térmica, en la cual la energía calórica del vapor se transforma en energía cinética en las toberas, transformándose a su vez ésta energía en fuerza, que desarrolla trabajo al actuar el vapor sobre álabes o paletas montadas sobre un elemento rotatorio.



Figura 6. Turbina de vapor N° 8

La misma consta de cuatro elementos fundamentales:

- *Rotor*: árbol rotatorio dispuesto de álabes o paletas
- *Estator*: formado por una carcasa y por diafragmas dispuestos de álabes fijos, en su interior gira el rotor
- *Toberas*: conductos por donde fluye el vapor, generalmente fijadas en el interior de la carcasa
- *Carcasa*: para soportar al estator y al rotor, apoyándose éste último sobre cojinetes

Las turbinas de vapor N° 7 y 8, por ser idénticas, tienen análogos datos técnicos (Tabla 2). Las mismas conforman dos turbogrupos independientes, pero hay que considerar que ante situaciones particulares, mediante el cierre y la apertura de las válvulas que corresponden, las calderas N° 7 y 8 están preparadas para funcionar en forma "cruzada".

El rotor de alta presión presenta una primera rueda de acción con escalonamiento de velocidad, también llamada rueda Curtis, en la cual el vapor se expande totalmente en las toberas fijas, sin producir caída de presión en los álabes móviles. Dicha rueda permite la admisión parcial del vapor, ya que en ella se puede realizar la regulación cuantitativa de la turbina, es decir, es una rueda de regulación. Esta es una característica indispensable dado que estas turbinas son del tipo caudal variable.

Turbina Escher Wyss		
Potencia en bornes		
• Económica	24 MW	
• Máxima nominal	30 MW	
• Sobrecarga	33 MW	
Nº revoluciones	3000 r.p.m.	
Sentido de rotación.	Antihorario	
Visto en la dirección del flujo de energía		
Rotor	Alta Presión	Baja Presión
Nº de gradas (ruedas) rotor	10	10
Peso rotor	2095 Kg.	7360 Kg.
Velocidad crítica rotor	2483 r.p.m.	2319 r.p.m.
Cantidad de extracciones de vapor	1	3
• Ubicación	grada 10	grada 2 grada 5 grada 7

Tabla 2. Datos característicos

La clasificación respecto al diseño interno y a la secuencia de flujo es del tipo tandem – compound, es decir, que el vapor pasa consecutivamente a través de las unidades separadas de alta (AP) y de baja (BP) presión expandiéndose en cada una de ellas. A su vez se encuentran en línea sobre el mismo eje, accionando a un único generador eléctrico. Los flujos de vapor en dichos ejes son de sentido contrario, contrarrestándose los empujes axiales entre ellos, teniendo como ventaja la utilización de cojinete de empuje de menor porte y mayor estabilidad del equipo.

Con relación a la dirección de flujo de vapor relativa al plano de rotación las turbinas son de flujo axial, en éstas el vapor fluye substancialmente en forma paralela al eje de rotación entre las paletas colocadas radialmente. Esto permite obtener casi todos los grados de expansión deseados del vapor.

Según sea las condiciones del vapor las mismas son de “alta presión con condensación”, construidas especialmente para las centrales eléctricas. Para su rendimiento máximo, se alimentan con vapor de alta presión y temperatura, en consecuencia de volumen específico reducido. El escape se realiza a muy baja presión, lo que significa volumen específico del vapor muy grande. Este gran aumento del mismo requiere paletas cortas en las etapas de alta presión y paletas largas en la región de baja presión.

A su vez son turbinas regenerativas, puesto que se extrae vapor antes que haya alcanzado la presión más baja. De esta forma se dispone de vapor a diferentes temperaturas, que se emplea para calentar por etapas el agua de alimentación, esto recibe el nombre de calentamiento regenerativo. Termodinámicamente hablando, la función de la regeneración es la de disminuir la irreversibilidad, de modo de reducir el salto entálpico entre la salida del condensador y la entrada a la caldera (disminución del trabajo perdido), y aumentarlo entre la entrada de la turbina y la entrada al condensador (aumento del trabajo positivo). Económicamente hablando, la mejora causada por la disminución del salto entre la salida del condensador y la entrada a la caldera, se traduce en un menor aporte de calor, aprovechando el calor residual de una parte de vapor en su expansión por la turbina, es decir un menor consumo específico de combustible (ver Análisis de la influencia de las extracciones).

La velocidad de rotación de la turbina es la misma que la del generador eléctrico, por estar acoplados directamente.

Detalles constructivos

La turbina propiamente dicha se encuentra dividida en dos cuerpos:

- Cuerpo de Alta presión (AP)
- Cuerpo de Baja presión (BP)

Seguidamente se desarrollarán los detalles constructivos de cada uno de los cuerpos. A su vez, se hará una descripción de la base media y de cola, las cuales vinculan los cuerpos de AP y BP, y al de BP con el alternador respectivamente. También se describirá el dispositivo giratorio del rotor, denominado “virador”.

Cuerpo de Alta presión

El mismo (Fig. 7) se compone de:

- Una carcasa (base y tapa)
- Un rotor de alta presión (AP)
- Sellos laberínticos N° 1 y 2
- Cojinetes N° 1 y 2



Figura 7. Vista frontal del cuerpo AP - TV N° 8

Carcasa

Está compuesta por la tapa y por la base, las cuales durante el funcionamiento de la turbina se encuentran recubiertas con aislante térmico. El mismo está compuesto por lana de vidrio y una funda de cierre.

La tapa posee cuatro extremidades, las cuales apoyan, de a dos, sobre base media y asiento en bloque de maniobras. Mediante suplementos en los apoyos se consigue el posicionamiento vertical de la carcasa. En su parte superior se dispone de las cuatro bridas de acople para el sistema de válvulas parcializadoras. A este último se vinculan, mediante bridas, las cañerías provenientes de las dos válvulas stop y las correspondientes hacia las toberas. También hay que mencionar las que sirven de vapor de sellos a las cajas de sellos laberínticos. Todo el sistema de cañerías posee el aislamiento mencionado.

La base se encuentra abulonada a la tapa, actuando ésta última como sostén vertical, dado que aquella no posee apoyo alguno. Coloquialmente está “colgada”. En la base se disponen los ganchos N° 1 y 2, con los cuales se logra el posicionamiento horizontal de la carcasa con el bloque de maniobra y base media respectivamente. El gancho N° 1 admite movimiento axial relativo entre sus componentes, absorbiendo la dilatación térmica de la turbina (ver Anexo I). En el N° 2 está restringido dicho movimiento axial.

El ensamble entre la tapa y la base de la carcasa es mediante espárragos y tuercas, cuyo apriete es en caliente, para asegurar que no existan pérdidas de vapor a través de la junta, la cual conviene esmerilar y colocar aceite de lino cocido sobre su superficie en el momento del ensamble.

En los extremos del conjunto se disponen los asientos de las cajas de sellos laberínticos N° 1 y 2.

Interiormente se dispone el grupo de diez diafragmas. Al primero se lo reconoce especialmente como “tobera”, la cual proporciona el vapor vivo a la rueda Curtis. Los nueve restantes se fijan en ranuras existentes en la carcasa, y se sujetan mediante espigas y pernos, llamados “tortas” en la jerga. Cabe aclarar que cada diafragma es el antecesor de una rueda de rotor.

En el espacio que media entre el eje y cada diafragma se disponen las empaquetaduras de laberinto, tipo peine, cuya función es disminuir las pérdidas de vapor producidas por la diferencia de presión entre las caras de los diafragmas.

Los materiales de este cuerpo son los siguientes:

- Carcasa: fundición de hierro.
- Diafragmas: fundición de hierro.
- Álabes fijos: aleación de acero (distinto grado de aleación según el número de diafragma)

Rotor de AP

El rotor de AP es un eje macizo forjado, compuesto por diez ruedas de diámetros progresivamente mayores en el sentido del flujo. La rueda Curtis es de mayor diámetro que la segunda, por cuestiones de regulación. Una de las consecuencias es el logro de la expansión deseada con un número menor de ruedas. Entre éstas se ubican los sellos, tipo “peine” o “pan”, para obtener el cierre con los correspondientes a los diafragmas.

Los álabes móviles se encuentran fijados a cada rueda por una ensambladura en forma de perfil “T”. El extremo de cada álabe posee una espiga, remachables a una banda metálica denominado bandaje. Cada bandaje vincula una cantidad de diez álabes aproximadamente y tiene como función variar la frecuencia de oscilación del los álabes para contrarrestar los efectos vibratorios causados por fuerzas tangenciales originadas por el vapor y la propia inercia del rotor. Para la introducción radial de los álabes, las ranuras circunferenciales se ensanchan en un punto para permitir que el encastre “T” de un álabe pueda introducirse en la ranura. Los álabes se insertan de uno en uno en los ensanchamientos y se los hace deslizar hasta llenar casi totalmente la ranura periférica. El espacio libre que queda en el lugar del ensanchamiento citado es menor que el requerido por otro álabe, por lo que se llena el espacio con piezas de cierre (chavetas). Las dimensiones de los álabes, aumentan progresivamente desde la rueda N° 1 a la 10, debido al aumento de volumen específico del vapor como consecuencia de la expansión del mismo.

En el extremo del lado BP presenta brida de acoplamiento y en el del lado regulador presenta un engranaje que actúa con el sistema mecánico de bombeo de aceite (IMO).

Sobre el eje se dispone de las llamadas “chapas jota”. Éstas se hallan encastradas en ranuras provistas en el mismo y zunchadas con alambre dulce de alta calidad. Las chapas se tornean en dos alturas diferentes, en forma alternada, correspondiente a la geometría del “pan” de trabajo en caja laberíntica.

Los materiales de rotor son los siguientes:

- Eje del rotor: aleación de acero
- Ruedas: aleación de acero
- Álabes móviles: acero inoxidable

Los álabes de las rueda N° 1 a 7 son de carácter no magnetizable. En cambio los de la rueda 8 a la 10 son ferromagnéticos.

Sellos laberínticos N° 1 y 2

Las cajas de sellos laberínticos son empaquetaduras que generan un gran número de puntos de estrangulación conectados sucesivamente. El diseño es del tipo "chapa jota y panes de alturas alternadas" para lograr mayor pérdida de carga del vapor de fuga, debido a la turbulencia que se genera en esa zona. Este último se topa con el vapor de sello generándose el cierre. El producto final de ambos se dirige al condensador de vapor de sellos (chancha).

La luz existente entre las chapas y los panes ronda entre 2 y 3 décimas de milímetros.

Las cajas de sellos se encuentran apoyadas sobre la base del cuerpo de AP, dispuestas antes de la rueda Curtis y luego de la última rueda (en el sentido del flujo de vapor).

Los panes metálicos están precargados con resortes de acero.

Cojinetes N° 1 y 2

El cojinete N° 1 es de deslizamiento del tipo radial, y el N° 2 es de deslizamiento combinado radial y axial de doble efecto. Esto último se debe puesto que en los arranques o paradas de la máquina funciona el dispositivo giratorio del rotor (virador), el cual introduce un empuje axial en sentido opuesto al normal de la turbina en servicio continuo. Por lo tanto, con el virador hay empuje hacia el alternador, en tanto que con el vapor de accionamiento el empuje es hacia el regulador.

El cojinete N° 1 se encuentra apoyado sobre el pedestal asociado al bloque de maniobras, mientras que el 2 se apoya sobre la base media. Ambos funcionan según el principio de lubricación hidrodinámica; y según el principio hidrostático en el momento del arranque de la máquina o cuando la velocidad es baja.

Cuerpo de Baja presión

El cuerpo está compuesto por:

- Una carcasa (tapa y base)
- Un rotor de baja presión (BP)
- Cojinetes N° 3 y 4
- Sellos laberínticos N° 3 y 4

Carcasa

Está compuesta por la tapa y la base. A su vez las podemos subdividir en una parte en caliente y otra en frío. En el interior de la parte en caliente se aloja el rotor y está térmicamente aislada. El interior de la parte fría conduce al vapor proveniente de la rueda N° 20 hacia el condensador.

La base en caliente se encuentra abulonada a la tapa, y sus extremos están apoyados sobre la base media. Al igual que la base de AP, se encuentra "colgada". Está acoplada a la base media mediante el gancho N° 3, con lo cual se logra el posicionamiento horizontal de la misma con la base media.

El ensamble entre la tapa y la base de la carcasa es mediante espárragos y tuercas, cuyo apriete es en caliente, en el lado anterior y en frío en el lado posterior. El apriete en caliente tiene la función de asegurar que no existan pérdidas de vapor a través de la junta, debido a la posterior dilatación de los espárragos, que provoca un ajuste con interferencia, al igual que AP, conviene esmerilar y colocar aceite de lino cocido sobre su superficie en el momento del ensamble.

Interiormente se dispone el grupo de diez diafragmas, cuyos detalles constructivos son similares a los de AP. Respecto a los diafragmas de alta, las dimensiones son mayores debido al aumento de volumen específico del vapor.

La base en frío se vincula a la base de cola mediante brida de acople. Se encuentra apoyada sobre fundación y posee anclajes de referencia cero de dilatación térmica.

Los materiales de este cuerpo son:

- Carcasa: fundición de hierro
- Diafragmas: fundición de hierro
- Álabes fijos: aleación de acero (distinta grado de aleación según número de diafragma)

Rotor de BP

El rotor de BP (Fig. 8) presenta diez ruedas de álabes móviles, las ruedas N° 11 a 20, éstas son ruedas de reacción cuyo grado va en aumento hacia la última.



Figura 8. Rotor de BP - TV N° 7

Comparativamente con el rotor de AP, tanto el rotor como los álabes poseen mayores dimensiones ya que trabaja con vapor de mayor volumen específico. A su vez las dimensiones aumentan progresivamente desde la rueda N° 11 a la 20, como consecuencia de la expansión del mismo a través de cada etapa.

Los álabes se encuentran fijados a las coronas de cada rueda de la misma forma que los de AP. También poseen el mismo sistema de variación de frecuencia de oscilación, o sea el bandaje.

En ambos extremos del eje se localizan las "chapas jotas" dispuestas antes de la rueda N° 11 y luego de la última rueda (en el sentido del flujo de vapor). Las chapas dispuestas antes de la rueda N° 11 están mecanizadas en dos alturas diferentes, en forma alternada; mientras que las otras son de altura constante, debido al tipo de caja de sellos laberínticos que actúan de cierre.

Los materiales de rotor son los siguientes:

- Eje del rotor: aleación de acero
- ruedas: aleación de acero
- Álabes móviles: aleación de acero ferromagnética

Cojinetes N° 3 y 4

Ambos cojinetes son de deslizamiento del tipo radial. El cojinete N° 3 se encuentra apoyado sobre la base media, mientras que el N° 4 se apoya sobre la base de cola. Al igual que los cojinetes N° 1 y 2, ambos funcionan según el principio de lubricación hidrodinámica; y según el principio hidrostático en el momento del arranque de la máquina o cuando la velocidad es baja.

Sellos laberínticos N° 3 y 4

Las cajas de los sellos N° 3 y 4 se encuentran apoyadas sobre la base caliente del cuerpo BP, dispuestas antes de la rueda N° 11 y luego de la última rueda (en el sentido del flujo de vapor)

respectivamente. La caja N° 3 (Fig. 9) presenta panes metálicos similares a los detallados para el cuerpo AP, mientras que la caja N° 4 posee panes lisos de carbón (Fig. 10), ya que trabaja con menor presión y temperatura. Éstos actúan de cierre con las chapas del rotor.



Figura 9. Caja de sellos N° 3.



Figura 10. Caja sello – "Panes de carbón"

Base media

La base media (Fig. 11) cumple diversas funciones por las cuales se vinculan los cuerpos de Alta y Baja. En su interior se halla el acople entre los respectivos ejes. Esto es a través de bridas de acoplamiento abulonadas. El sistema tornillos-tuerca, es a su vez, trabado transversalmente mediante chavetas para evitar el movimiento relativo radial de aquellos.

En la misma se disponen los asientos de los cojinetes N° 2 y 3 y los correspondientes espárragos para el apriete de los puentes.



Figura 11. Base media TV N° 7

La base constituye un “carter”, o sea un depósito de aceite la cual ya cumplió su función para retornar al depósito y reiniciar su ciclo (refrigerado, filtrado y presurizado). En su interior se disponen las cañerías, accesos y egresos del aceite de lubricación, tanto para la hidrodinámica como para la hidrostática.

Con respecto al cuerpo AP hace de apoyo a los extremos la respectiva tapa. Mediante suplementos se logra varias la posición relativa vertical. Horizontalmente se logra el mismo propósito mediante el gancho N° 2 el cual vincula a la base media con la base AP. Este gancho no admite movimiento axial entre sus cuerpos. Con respecto al cuerpo BP se encuentra vinculado por el gancho N° 3, que hace de apoyo a los extremos de la respectiva base. En este caso los propósitos de alineación y vinculación son similares a lo expresado en el párrafo anterior.

Cabe aclarar que no se procede al desmontaje de la vinculación entre base media-base BP con fines de alineación.

Por último aclaramos que en la tapa se dispone de los accesos para termómetros y manómetros. La misma es apretada en frío a la base, dispuesta sobre fundación, mediante bulones y centrada por medio de espigas.

Base de cola

La base de cola (Fig. 12) es el cuerpo contiguo al de baja y se encuentra rodeado por la parte “fría” de este último. En su interior se halla el acople entre el eje BP y el del alternador. El conjunto bridas y engranaje de virador se encuentra cubierto por un cubre manchón.

En la misma se disponen los asientos de los cojinetes N° 4 y 5 y los correspondientes espárragos para el apriete de los puentes. La base también cumple la función de “carter”.

La tapa de cola hace a su vez de base del sistema virador.



Figura 12. Base de cola

Dispositivo giratorio del rotor

El dispositivo giratorio del rotor (Fig. 13) se encuentra colocado sobre la tapa de cola. Cuenta con un motor eléctrico de relación de transmisión 1:130 aproximadamente, que está embridado a un engranaje planetario que se encuentra atornillado a la caja de engranajes, a través de un sistema de engranajes se encuentra embragado a la corona dentada ubicada en la mitad del acoplamiento (lado turbina) del rotor de Baja y el rotor del alternador.

El mismo tiene la misión, luego de una parada o en cortas interrupciones del servicio, de girar lentamente el rotor para evitar la curvatura del mismo durante el enfriamiento de la máquina.

Principio de funcionamiento

Cuando el rotor de Baja comienza a girar debido al trabajo realizado por el vapor de accionamiento, sobre la dentadura inclinada de la corona ubicada en el acoplamiento se produce una fuerza axial que separa del rotor al virador. Si el rotor no gira y se acciona el motor eléctrico, la fuerza axial opera en sentido inverso y el piñón se mantiene en contacto con la corona.

La velocidad de giro del mismo es de 26 r.p.m., durante su funcionamiento el virador se encuentra lubricado mediante la bomba principal de aceite a una presión de 1,5 Kg. /cm².

El virador posee dos interruptores de seguridad; de presión y de fin de carrera, éstos desconectan el motor cuando la presión de aceite desciende por debajo de 1 Kg. /cm^2 y cuando el piñón se encuentra todavía entre 10 y 30 mm en contacto con la corona del rotor, respectivamente.

En funcionamiento normal, cuando el rotor comienza a girar debido al vapor de accionamiento; comienza el movimiento de desembrague entre piñón y corona del rotor y entonces actúa el interruptor de fin de carrera desconectando automáticamente al motor.



Figura 13. Dispositivo giratorio

Regulador

El Regulador se compone básicamente del bloque de maniobras el cual se sitúa físicamente delante del cuerpo de alta presión de la turbina. La función del regulador es la de mantener constante a la velocidad de giro al variar la carga, en el caso de generadores de corriente alterna se exige la constancia de la frecuencia, para lo cual se debe mantener con mucha exactitud la velocidad de giro de la turbina.

El estudio de la regulación se divide en dos partes:

- La regulación propiamente dicha, es decir, los mecanismos y accesorios empleados para mantener la velocidad de la turbina.
- Los procesos termodinámicos empleados en los diferentes métodos de regulación empleados y sus efectos sobre el rendimiento de la turbina a cargas parciales.

Para las grandes máquinas es conveniente emplear varias válvulas, cada una de las cuales alimenta a una tobera o a un grupo de toberas, abriéndolas o cerrándolas consecutivamente mediante un servomotor o con dos servomotores en serie.

Descripción del Principio de Regulación

El vapor se conduce (Fig. 14) a la turbina a través de la tubería de vapor vivo (1), se expansiona en la turbina y se condensa en el condensador.

Una válvula de cierre de vapor (2), de cierre rápido, obstruye el paso de vapor vivo a la máquina. La cantidad de vapor que penetra en la turbina está regulada por las válvulas de regulación (3). Estas válvulas están unidas al varillaje de regulación mediante un amplificador de la energía (no se encuentra esquematizado.) El péndulo centrífugo (8) actúa, a través del dispositivo de cambio de la velocidad (7), sobre la palanca (5), la cual se apoya en un pivote (6). Las válvulas de regulación están articuladas en otro pivote (4).

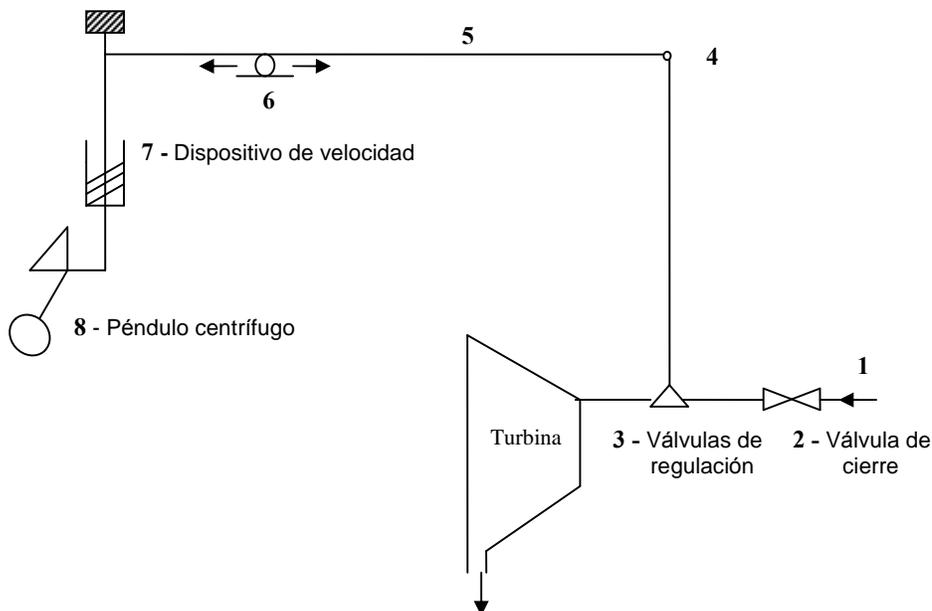


Figura 14. Esquema del principio de la regulación.

Función del Regulador

Si por ejemplo, aumentara la velocidad, el peso centrífugo del péndulo (8) se aleja de su eje giratorio y arrastra hacia abajo, alrededor del pivote (6) a la palanca (5) y de esta manera las válvulas de regulación (3) se acercan a sus asientos.

Esta regulación de la velocidad trabaja, según sea el tipo de explotación, de las formas:

Servicio aislado

Es el caso cuando el grupo está acoplado eléctricamente a una red propia en la que debe mantener la frecuencia. A pesar de que la velocidad está regulada, ésta no permanece exactamente constante, sino que varía de acuerdo con la carga.

Servicio con red

Se entiende cuando el grupo está sincronizado a una “red externa”, esto es, a una red en la que varias centrales mantienen constante la frecuencia. Si por el contrario oscila la frecuencia de la red, la potencia variará según la nueva situación del regulador de velocidad. Al contrario del servicio aislado, la carga se adapta a la velocidad.

Detalles constructivos del regulador

El Regulador (ver Anexo II) se compone básicamente de los siguientes componentes:

- Bloque de maniobras
- Dos válvulas de cierre rápido (válvulas stop)
- Cuatro válvulas de regulación
- Varillajes de distribución
- Varillaje de energía
- Varillaje de retorno

A continuación se describirá constructivamente cada componente.

Bloque de Maniobras

El mismo se sitúa físicamente delante del cuerpo de alta presión de la turbina (Fig. 15). Está compuesto principalmente de:

- Péndulo centrífugo
- Amplificador de la regulación de velocidad
- Válvula de distribución
- Válvula de cierre rápido
- Regulador de seguridad
- Dispositivo de disparo
- Disparo a mano
- Bomba principal de aceite
- Dispositivo de prueba de cierre rápido
- Dispositivo eléctrico por baja frecuencia
- Dispositivo eléctrico por sobre frecuencia



Figura 15. Vista frontal bloque de maniobras – TV N° 8

Péndulo centrífugo

A partir de una disminución en la velocidad de la turbina debida a un aumento de la carga, varía la fuerza centrífuga actuante sobre el péndulo, generando en el aceite de regulación una diferencia de presión. Ésta produce una fuerza que actúa sobre la válvula de distribución, y hace desplazar al émbolo regulador, el cual libera ciertos orificios, haciendo fluir el aceite por las tuberías de distribución hacia el servomotor.

El servomotor envía al aceite hacia las válvulas de regulación, las cuales regulan la cantidad de vapor mediante el desplazamiento del émbolo, elevándose así el cono de válvula para permitir el ingreso de un mayor caudal de vapor que ingresa a la turbina.

Amplificador de la regulación de la velocidad

La función principal del amplificador es la de ampliar la carrera del péndulo y transmitirla así al varillaje regulador (distribución, energía, retorno).

Válvula de distribución

El movimiento del émbolo regulador de dicha válvula abre o cierra los orificios que permiten el flujo de aceite hacia las válvulas de regulación.

Válvula de cierre rápido

Para mayor seguridad, se disponen de dos válvulas. Para parar el grupo, es suficiente accionar sólo una de éstas válvulas.

En posición normal el casquillo de ésta se encuentra mantenida en su posición inferior por un gatillo en contra de la fuerza de un resorte. En esta posición se encuentran cerrados los orificios de retorno, de manera que el servomotor y la válvula de cierre se alimentan con aceite procedente de la tubería de distribución.

Cuando actúa el cierre rápido, se dispara el gatillo y la corredera se desliza hacia la posición superior, descubriéndose los orificios de retorno, iniciándose el movimiento de cierre.

Regulador de seguridad

Es un dispositivo mecánico de seguridad contra sobre velocidad. En el eje de la turbina se encuentran colocados dos anillos excéntricos. Cuando la velocidad supera cierto valor, la fuerza centrífuga sobre ellos supera la fuerza de un resorte, provocando el desplazamiento radial, que hace que golpee una palanca vinculada al gatillo que se encuentra en el bloque. Ésta hace que se dispare, repitiendo lo explicado en el párrafo precedente.

Dispositivo de disparo

Cumple la misma función que el regulador de velocidad. Es un dispositivo hidráulico, el cual se dispara cuando deja escapar el aceite que hay encima del émbolo y un resorte provoca el ascenso de una barra. La misma acciona las correderas que hacen disparar el gatillo que se encuentra en el bloque.

Disparo a mano

Sobre el bloque, se hallan dos botones que presionando uno o ambos, se disparan las correderas de cierre rápido mediante el gatillo antes mencionado.

Bomba principal de aceite

Es accionada por el eje de la turbina a través de un engranaje frontal de relación de transmisión 1:2,04. La misma distribuye el aceite de regulación a una presión de 8,5 Kg. /cm².

Dispositivo de prueba de cierre rápido

Tiene la finalidad de verificar separadamente, durante el servicio, cada uno de los cierres rápidos o anillos excéntricos (Fig. 16).



Figura 16. Dispositivo de prueba de cierre rápido

Válvulas Stop

Las válvulas Stop (Fig. 17) regulan y ajustan el cierre del vapor vivo mediante el giro de un volante. A pesar del gran esfuerzo de regulación de la válvula, la fuerza que se debe ejercer es pequeña ya que cuenta con la ayuda de un regulador hidráulico preliminar.



Figura 17. Válvula Stop – TV N° 8

Válvulas de Regulación

La turbina cuenta con cuatro válvulas de regulación (Fig. 18). Las mismas se encuentran físicamente sobre el techo de la chapa protectora del cuerpo de alta presión.

El varillaje de energía transmite los movimientos del servomotor al eje giratorio, que a su vez, una palanca transmite el mismo al cono de la válvula, con ayuda de una palanca y el tornillo superior que se observa en la figura, abriéndose o cerrándose aquella según sea el sentido antihorario u horario respectivamente del varillaje, venciendo la fuerza del resorte que la mantiene apoyada en su asiento en el caso cuando se abre.

Si el eje giratorio acciona varias válvulas, el orden sucesivo y temporal del movimiento puede ser ajustado por medio del tornillo superior.



Figura 18. Válvula de regulación

Varillajes de distribución

Une al émbolo distribuidor con el amplificador de la regulación de la velocidad, las palancas transmiten los impulsos de distribución al émbolo, en el que se amplían, llegando luego a las válvulas a través del servomotor y del varillaje de energía.

Varillaje de energía

Se encarga de transmitir a las válvulas los movimientos de distribución del servomotor.

Varillaje de retorno

Cumple la función de estabilizar los procesos de regulación.

Alternador

El alternador es la máquina destinada a transformar la energía mecánica rotacional del rotor de la turbina en energía eléctrica, generando una corriente alterna trifásica mediante fenómenos de inducción. Está compuesto básicamente de los siguientes elementos:

- Estator o inducido: comprendido por un circuito magnético el cual esta conformado por un conjunto de chapas ferromagnéticas, apiladas y aisladas unas de otras. Dicho circuito posee ranuras uniformemente distribuidas en las cuales se aloja el devanado trifásico del estator. La salida de cada una de las fases del estator está conectada a la red trifásica.
- Rotor o inductor: posee un devanado dispuesto en las ranuras periféricas del mismo, por donde circula la corriente continua de excitación. El rotor gira en el interior del estator inmóvil. El mismo esta acoplado en un extremo al rotor de la turbina y en el otro a la maquina excitatriz.

Los alternadores acoplados a las turbinas N° 7 y 8 son similares, por ende presenta las mismas características (Tabla 3).

Alternador Brown Boveri & CIA - (BBC)	
Potencia nominal	37500 KVA
Velocidad	3000 rpm
Frecuencia	50 Hz
Voltaje nominal	13200 V \pm 5 %
Corriente nominal	1640 A
Factor de Potencia	0,8
Clase de Aislación	F (155 °C)
Entrehierro	45 mm
Peso del estator	59 t
Peso del rotor	18,5 t
Resistencia estatórica a 20° C	0,0065 W / fase
Resistencia rotórica a 20° C	0,128 W
Longitud total	7570 mm
Ancho total	3600 mm
Altura total	3735 mm

Tabla 3. Datos técnicos – Alternador BBC

Detalles constructivos

El bloque alternador (ver Anexo III) está compuesto esencialmente por el estator y su respectiva carcasa, el rotor, el dispositivo porta escobillas, el cojinete N° 5 y el cojinete N° 6 con su pedestal.

Estator

La carcasa hace de soporte a los paquetes de chapas magnéticas del arrollamiento estatórico y a las tapas del generador. Tanto la carcasa como las tapas terminales, sirven de cubierta de cierre para la hermeticidad del aire de refrigeración que circula en su interior (Fig. 19).

Esta estructura rígida dispone de cuatro sectores estratégicamente ubicados donde se encuentran los cajones de los refrigerantes, vinculados a la misma mediante cordón de soldadura. Los refrigerantes son esencialmente intercambiadores de calor de superficie por los cuales se enfría el aire, previamente filtrado, mediante agua de mar. En la parte superior de dichos cajones se consta de acceso para la limpieza periódica de los refrigerantes. El circuito de refrigeración es abierto donde la porción de aire que ha cumplido su función es devuelta nuevamente a la atmósfera.

Se dispone también dos pivotes, uno en cada lateral, a media altura para el izado de la estructura.

En el perímetro interior se encuentran, repartidas uniformemente, cuñas de milano para la sujeción de los paquetes de chapa. En la parte inferior se halla la abertura para las borneras de salida del alternador.

El peso del estator se transmite a la fundación por medio de los pies de apoyos soldados lateralmente a la carcasa. Se fijan a la fundación mediante bulones y espigas. Están prolongados cercanamente a los cojinetes con el fin de transmitir las fuerzas ejercidas sobre estos directamente a la fundación.

Los paquetes de chapas magnéticas del estator son los encargados de conducir el flujo magnético y alojar el arrollamiento estatórico en las ranuras dispuestas en ellas. Se construyen paquetes parciales compuestos por segmentos de chapas apiladas una con otras y aisladas entre sí mediante laca aislante resistente para evitar que entren en cortocircuito. Las mismas están laminadas en frío y poseen bajo coeficiente de pérdidas. En los extremos del estator se construyen paquetes de menor altura con el objeto para que el entrehierro aumente gradualmente y así disminuir las pérdidas adicionales en los casquetes del rotor. El ajuste permanente de todo el conjunto de chapas se logra mediante las denominadas placas de presión colocada en los extremos frontales. Las mismas son de material antimagnético. Los paquetes parciales poseen preajuste, logrado mediante perfiles "L".

El arrollamiento estatórico, encargado de conducir la corriente nominal inducida en el mismo hacia la red a alimentar, esta uniformemente repartido en todo el perímetro del inducido y colocado en las ranuras rectangulares del paquete de chapa estatórico. Se disponen de dos barras, aisladas entre sí, por cada ranura a lo largo de la parte activa del estator. El cierre de las ranuras se lleva a cabo mediante cuñas macizas. Las cabezas de bobinas tienen una inclinación tal que asemejan al perfil de un barril.

Las barras están compuestas por un gran número de conductores elementales macizos, distribuidos uniformemente en la sección de conjunto que forman la misma. La disposición adoptada se denomina "Roebel", por la cual los conductores se trenzan de forma tal que cada uno ocupe, como mínimo una vez, todas las posiciones transversales a lo largo de una misma ranura, compensándose así el efecto reactivo. Los conductores elementales están aislados entre sí mediante seda de vidrio y son embebidos en resina sintética. Para aumentar la resistencia mecánica del conjunto, los conductores son pegados bajo presión y temperatura para formar la barra compacta. Luego se realiza el aislamiento principal según el procedimiento MICADUR que utiliza seda de vidrio, como aislante base y soporte de la mica. El aislamiento se consigue enrollando una cinta continua de este material a lo largo de toda la superficie de la barra, la cual se seca bajo vacío, se impregna con resina sintética y se endurece mediante proceso térmico en molde de forma. Por último se las recubre con una laca conductora de fuerte poder adhesivo con el fin de conferir protección contra efluvios, lo mismo se hace en las ranuras estatóricas.

Mediante uniones en las cabezas de bobina se realizan las conexiones correspondientes a las tres fases y al centro de estrella. Se dispone de soporte, para las cabezas de bobinas, los cuales se encargan de mantenerlas fijas para garantizar rigidez del conjunto ante la posibilidad de sobre-corrientes debidas a cortocircuitos en bornes de salida o bien a condiciones desfavorables de funcionamiento. Dichas bobinas se fijan al mediante un vendaje de cordón formando un conjunto compacto. Este es fijado a la placa de presión mediante bulones de material antimagnético.



Figura 19. Interior del alternador

Rotor

El rotor es de dos polos construido con acero magnético forjado de alta calidad. Posee un agujero central donde se aloja el arrollamiento de excitación vinculado a los anillos rozantes. Dispone de asientos (gorrones), en ambos extremos, para cojinetes y ventiladores. El extremo de accionamiento esta provisto de una brida de acoplamiento, por donde se transmite el momento de giro de la turbina. Dado que la frecuencia normalizada del sistema eléctrico es de 50 Hz y el número de polos del generador es de dos, resulta como velocidad de rotación 3000 r.p.m., tanto del rotor de alternador como el de la turbina por estar acoplado directamente. La velocidad de giro responde a la siguiente expresión:

$$V[r.p.m.] = \frac{120 \times 50 [Hz.]}{\text{Número de polos}} = 3000 r.p.m$$

El cuerpo está fresado en toda su longitud activa, con ranuras de perfil rectangular en las que se colocan los arrollamientos de excitación y de amortiguación. Se realizan también muescas transversales para compensar la desigualdad del eje neutro con el polar del rotor, y con esto reducir las vibraciones mecánicas que esta desigualdad causaría. Posee agujeros, concentrados en la zona central, para que el aire de refrigeración pueda ser evacuado al entrehierro en sentido radial.

El arrollamiento rotórico es el encargado de conducir la corriente necesaria para la excitación del generador, el mismo está ubicado en las ranuras realizadas en el rotor. Los conductores son aislados entre sí, contra las ranuras y el arrollamiento de amortiguación. Los conductores que están fuera de las ranuras, o sea, las cabezas de bobinas, poseen distanciadores para mantener sus posiciones relativas y dar rigidez al conjunto.

El arrollamiento amortiguador está alojado en la parte superior de las ranuras, y se lo aísla del principal. Está compuesto de barras planas. Las cabezas de bobinas de éste, también están aisladas con respecto al de excitación, están dobladas de forma tal que se tocan una con otras formando junto al casquete una configuración similar a una "jaula de ardilla".

En cada polo hay una ranura que no posee arrollamiento amortiguador, que es donde se coloca el dispositivo (chavetas) de sujeción radial de los casquetes.

Las bobinas de excitación son de cobre duro con aleación de plata al igual que las bobinas de amortiguación, pero con diferente grado de aleación y dureza.

El cierre de las ranuras se hace mayormente por medio de cuñas macizas y otras tantas con agujeros huecos roscados. Estas últimas están distribuidas estratégicamente y sirven para fines de balanceo.

Los casquetes del rotor, comúnmente llamados "Calotas" son los encargados de soportar las fuerzas centrífugas producidas en la cabeza del arrollamiento. También absorben el empuje producido por los efectos de dilatación del mismo. Están compuestos por anillos y placas circulares vinculados mediante técnicas de zunchado. La sujeción es del tipo bayoneta, de perfil similar al de una senoide. Están construidas de material antimagnético de alta resistencia y tenacidad. Se fijan en voladizo a los bloques extremos del rotor, se aseguran axialmente por de cierre tipo bayoneta y radialmente por medio de chavetas. El grado restante de libertad, por el cual la calota podría ejecutar movimientos de "cabeceo", se restringe mediante placa de cierre con interferencia en su diámetro interior y zapatas del rotor.

En el extremo del lado excitatriz se hayan montados sobre el eje los anillos rozantes, debidamente aislados entre sí y del mismo con capas de mica. Estos conducen la corriente de excitación que atraviesa a las escobillas ubicadas en su periferia. Están compuestos cada uno por dos anillos concéntricos zunchados a presión (interferencia). El anillo interior asienta sobre el eje y soporta al exterior. La superficie exterior de los anillos rozantes esta provista de ranuras para evitar zonas de calentamiento y lograr una buena transmisión eléctrica. El calor producido es evacuado mediante aire provisto por un ventilador radial.

Los conductores de los anillos rozantes tienen la misión de transmitir la corriente de excitación suministrada a través de las escobillas. Dichos conductores consisten dos barras, de sección transversal semicircular, de cobre que se adaptan a la perforación central del árbol. Están aislados entre sí y contra el árbol. La conexión entre estas barras y los anillos rozantes se hacen por medio de bulones de toma corriente roscados.

Dispositivo porta escobillas

Tiene por objeto transmitir a los anillos rozantes en rotación la corriente de excitación precedente de la máquina de corriente continua denominada excitatriz. Se compone de puentes de escobillas, porta escobillas y las escobillas mismas (Fig. 20). Está montado sobre la misma base metálica del bloque excitatriz.

Los puentes están aislados de la cubierta a la cual están fijados y entre sí. Por ellos circula la corriente proveniente de la llave de campo, a través de barras. A ellos se les acoplan los porta-escobillas, los cuales están dispuestos radialmente y distanciados unos de otros. Los porta-escobillas están distanciados radialmente de los anillos entre 1,5 a 2 mm.

Las escobillas se alojan en las cavidades de los porta escobillas y mediante resorte se las mantiene en contacto con la superficie de los anillos para así lograr una presión determinada.



Figura 20. Dispositivo porta escobillas

Cojinetes N° 5 y 6

Estos cojinetes son de deslizamiento del tipo radial, ambos funcionan en servicio mediante el principio de lubricación hidrodinámica. También poseen accesos para lubricación hidrostática utilizada en fase de arranque.

El cojinete N° 5 está montado sobre base de cola y el cojinete N° 6 sobre pedestal montado en placa base del bloque excitatriz.

Excitatriz

El bloque excitatriz (ver Anexo IV) es el encargado de proveer la corriente de excitación (I_{ex}) al arrollamiento rotórico del alternador. Este bloque está compuesto esencialmente por dos máquinas de corriente continua denominadas excitatriz principal y excitatriz piloto, cada una cumple una función y poseen distintas características (Tabla 4).

	Excitatriz	
	Principal	Piloto
Potencia	193/405 KW	4,34 KVA
Tensión	180/260 V	380 V
Corriente	1070/1560 A	6,6 A
Nº rev.	3000 r.p.m.	

Tabla 4. Datos característicos

Este bloque responde a una secuencia de generación (Fig. 21) por la cual se cumple el objeto primordial.

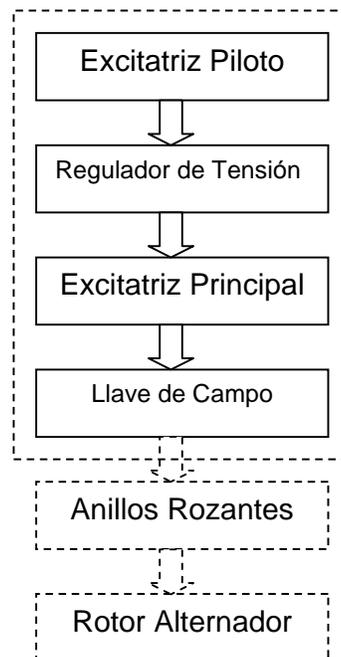


Figura 21. Secuencia de generación

El estator de la excitatriz piloto hace las veces de inductor, es del tipo imán permanente y esta bobinado para su magnetización externa cuando sea necesario cumpliendo lo establecido por el ciclo de histéresis. Dicha magnetización se lleva a cabo mediante banco de baterías que proveen una tensión continua de 110 V. El campo remanente enlaza al rotor bobinado. Éste campo, en combinación con el momento de giro que impone el eje de la turbina al rotor, da origen a una tensión trifásica alterna de 380 V. Mediante tres anillos rozantes y juegos de escobillas se alimenta al regulador de tensión ubicado en tablero de comando.

El regulador de tensión es el encargado de proveer la corriente de magnetización, de cierto valor medio (I_M) al estator de la excitatriz principal. El valor de I_M es directamente proporcional a la I_{ex} requerida y para cuantificarlo actúa un sistema electrónico, compuesto por diodos, tiristores y otros elementos de estado sólido, que transforman la onda sinusoidal de valor medio cero en una onda de valor no nulo. En base al tiempo de actuación empleado por los

tiristores se consiguen los distintos valores que debe tomar I_M . Al ser esta corriente ajustable se consigue inducir al rotor de la excitatriz principal, acoplado a la turbina, el campo magnético requerido para generar la I_{ex} . Este rotor alimenta, a través de las escobillas de conmutación, a dos barras conductoras que se conectan a la entrada de la llave de campo (seccionador) ubicada en tablero externo a la máquina. Y la salida de esta llave se conecta, también mediante barras, a los anillos rozantes del alternador mediante sistema de escobillas.

Detalles constructivos

El bloque excitatriz (Fig. 22) está compuesto, además de sendas máquinas de excitación y sus accesorios, por base metálica y cojinetes N° 7 y 8 con sus respectivos pedestales. El peso total del grupo es de 3,3 toneladas, incluyendo a la placa base.



Figura 22. Bloque Excitatriz

Base metálica

Esta base se encuentra montada sobre una placa base metálica que a su vez está solidaria a la fundación. Ambas poseen cavidades y accesos para el aire de refrigeración. Además en la base metálica se dispone de filtro de aire para el flujo de ingreso al conmutador de la excitatriz principal.

Dispone de cuatro pivotes, dos frontales y dos laterales, para colocar eslingas y ejecutar maniobras de izado.

Sobre lateral se haya bornera de barras y cables que vincula al bloque con llave de mando y regulador de tensión respectivamente.

Excitatriz principal

Se encuentra montada directamente a la base metálica. Cuenta con cobertura metálica asociada a la carcasa estatórica. Tiene dos tapas de inspección, en el extremo correspondiente al sistema conmutador, sobre los laterales del mismo. Estas son de utilidad al momento de hacer cambios de escobillas, como también para inspecciones visuales de su estado. En el extremo opuesto se haya el cajón de aire.

En su interior se dispone de ventilador axial, propulsado directamente por el eje de turbina, para favorecer la circulación del flujo refrigerante. Por encima del conmutador, la cobertura tiene zona de rejillas para la evacuación del dicho flujo. El ventilador esta ajustado con interferencia al eje y posee chaveta para restricción del grado de libertad radial.

El dispositivo porta escobilla del conmutador, montado en el interior de la cobertura, está ajustado a la base metálica, conectado a tierra y totalmente aislado de los porta escobillas como así también de las barras de alimentación de la llave de mando. Dichas barras están conectadas a los cables de las escobillas.

El eje de giro cuenta con asientos para el ventilador y ambos cojinetes. El extremo que se acopla al eje de la excitatriz piloto es cónico y posee agujero roscado coincidente con el eje de simetría.

Excitatriz piloto

Está emplazada sobre pedestal montado a la base metálica, para compensar la diferencia de tamaño con la excitatriz principal. Con ésto se logra que los ejes de ambas estén a la misma altura.

El eje de giro presenta cavidad para el encastrado con el eje de la otra excitatriz. También es hueco en el otro extremo, por donde se dispone del perno para el acople de dicho eje con el de la excitatriz principal. En el extremo final se coloca un tapón de cierre.

Los anillos rozantes son montados sobre asientos de eje con interferencia y están aislados del mismo.

La ventilación en este caso es natural, para este fin se dispone de rejillas en la carcasa. El dispositivo porta escobillas está sujetado por la misma carcasa.

Cojinetes N° 7 y 8

Estos cojinetes son de deslizamiento del tipo radial, ambos funcionan en servicio mediante el principio de lubricación hidrodinámica. No poseen accesos para lubricación hidrostática. Ambos están montados sobre pedestales vinculados a la base metálica.

Cabe aclarar que los mismos no son similares entre sí.

Cojinetes

Constructivamente los cojinetes (Fig. 23) están compuestos por dos mitades, vinculadas entre sí mediante dos bulones y dos espigas distribuidos diagonalmente. La mitad inferior consta de orificios para ingreso de aceite. La misma posee dos suplementos exteriores o “panes” laterales para la alineación horizontal y uno en la parte inferior para la vertical. Estos suplementos son desmontables y se les interponen láminas delgadas para la corrección de la alineación. La mitad superior está provista de una franja central que sirve de asiento para el puente de sujeción, por el cual se ajusta al conjunto y se lo traba axialmente. Cabe destacar que el diseño interior del conjunto es del tipo “limón”, donde el diámetro horizontal es mayor al vertical favoreciéndose así el mecanismo de lubricación hidrodinámica. Este mecanismo también se ve favorecido por lo que se denomina “bolsa o bolsillo de aceite” que no es más que un rebaje suave, que se va suprimiendo gradualmente desde la horizontal hasta un octavo del diámetro interior, del material antifricción. Se dispone del mismo solo en un lado por mitad de cojinete.



Figura 23. Cojinete N° 3

El diámetro interior del cojinete está ligado al diámetro del eje con el que interactúa. El diámetro vertical es tal que dicho huelgo sea de 0,15 % del diámetro del eje y el horizontal sea de 0,4 % del mismo (Fig. 24). Por ser un redondo, dichos porcentajes permiten apreciar el carácter de “limón” que poseen los cojinetes.

Para ejemplificar esta situación tomamos como referencia al cojinete N° 3. El diámetro del eje es de 200 mm, por ende resulta:

$$v = 0,0015 \times 200\text{mm} = 0,3\text{mm} \rightarrow \phi_v = 200,3\text{mm}$$

$$h = 0,0040 \times 200\text{mm} = 0,8\text{mm} \rightarrow \phi_h = 200,8\text{mm}$$

Con respecto al bolsillo de aceite, la profundidad inicial del mismo es del orden del milímetro.

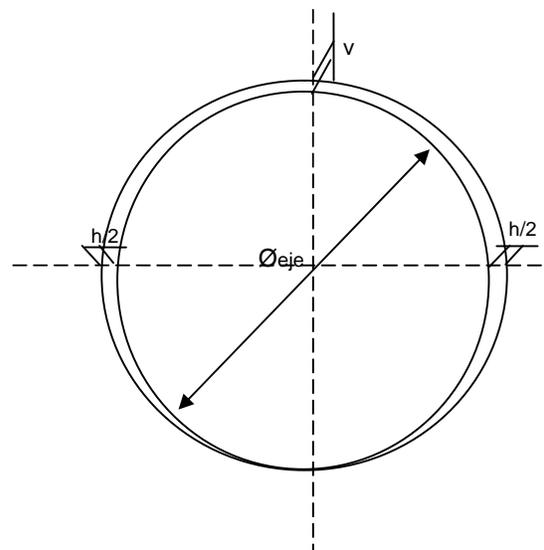


Figura 24. Diámetro de cojinete

Los materiales empleados en la construcción de los cojinetes son de hierro fundido de alta calidad y están recubiertos, interiormente, con metal blanco antifricción. Este consiste en una aleación estaño, plomo y antimonio.

En cada extremo se colocan sellos de bronce con diámetro interior levemente superior al eje. Estos sirven para que el aceite que ya cumplió su función sea vertido al correspondiente depósito, tanto el grueso del fluido como el que tendería a viajar por el eje si estos sellos no estarían.

Los ocho cojinetes distribuidos en la turbina trabajan bajo el principio de cuña hidrodinámica, por el cual la distribución de presión da origen al poder de sustentación de la carga en servicio, o sea el eje. Este fenómeno es promovido por las condiciones geométricas y el movimiento relativo entre las superficies involucradas, derivando en la auto-sustentación del sistema. Otro de los fenómenos que se presenta, es el de lubricación hidrostática que consiste en la introducción presurizada (110 Kg./cm^2) del aceite mediante una bomba, la cual es la denominada "levanta eje". Los cojinetes N° 1 al 6 son los preparados para este tipo de lubricación mediante orificio de entrada practicado en la mitad inferior de los mismos. Este mecanismo se utiliza sólo en fase de arranque o regimenes de baja velocidad (eje virando).

Sistema de aceite

El sistema de aceite consta de dos subsistemas principales, ellos son:

- el subsistema de lubricación de los cojinetes
- el subsistema de regulación

Circuito de lubricación de los cojinetes

El aceite (YPF 32) es aspirado del depósito por la bomba principal de aceite (mecánica), la cual es una bomba helicoidal marca IMO. Consta de un tornillo motriz y dos tornillos laterales. Ésta impulsa al aceite hacia los sistemas de regulación y de lubricación de los cojinetes, el sistema regulación presenta dos válvulas de desbordamiento de paso recto que regulan la presión del aceite a 10 Kg./cm^2 , y el sistema de lubricación presenta dos válvulas de desbordamiento de paso doblado que regulan la presión de aceite a $1,5 \text{ Kg./cm}^2$. En estas válvulas se trabaja con el sobrante que desbordo en las dos primeras válvulas y el sobrante de ellas vuelve al depósito.

A una presión de aceite de $1,5 \text{ Kg./cm}^2$, éste se dirige hacia los cojinetes N° 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8, previo paso por los refrigerantes de aceite (son 3 intercambiadores de calor de superficie de casco y tubos dispuestos verticalmente cuyo fluido de refrigeración es agua de mar) y luego por el filtro de aceite de los cojinetes (Fig. 25).



Figura 25. Filtros y refrigerantes de aceite.

Como un dispositivo de seguridad, si la diferencia de presión a la entrada y la salida fuera superior a $1,5 \text{ Kg./cm}^2$, el sistema cuenta con una válvula de desbordamiento de paso recto que abre y hace circular al aceite hacia los filtros de aceite de los cojinetes (sin pasar por los refrigeradores de aceite).

Luego de lubricar los cojinetes retorna al depósito de aceite, el cual está destinado a eliminar la espuma del aceite que retorna del sistema de regulación y de los cojinetes, a desgasificarlo, a la decantación del lodo y de las impurezas que contenga y que arrastró en el trayecto, para ello la máquina cuenta con un exhaustor de los vapores de aceite (motor de CA) y con una bomba centrífuga de aceite (motor de CA) cuya función es la de separar el agua del aceite. Una vez en el depósito de aceite, el mismo comienza el circuito nuevamente.

Circuito de regulación

Como se ha dicho, el aceite es aspirado del depósito por la bomba principal antes mencionada, éste se encuentra gobernado por dos válvulas de desbordamiento de paso recto que regulan la presión del aceite a 10 Kg./cm^2 para regular el caudal de admisión de vapor en la turbina.

De esta manera, luego del pasaje por el sistema de regulación, el aceite retorna al depósito de para comenzar el ciclo nuevamente.

Por seguridad, en el caso en que la bomba principal de aceite llegara a fallar o le faltara presión, el sistema cuenta con tres bombas auxiliares: una bomba auxiliar de aceite de CA de 10 Kg./cm^2 , para regulación y lubricación una bomba auxiliar para aceite de lubricación de CA de $1,5 \text{ Kg./cm}^2$ de CA, a su vez de caerse la línea o si no hay servicio interno, también cuenta con una bomba de aceite de emergencia de CC de $1,5 \text{ Kg./cm}^2$, ya que sólo haría falta la lubricación de los cojinetes.

En el arranque de la máquina, el sistema cuenta con una bomba levanta eje de 110 Kg./cm^2 , la cual tiene la función de generar la cuña de aceite (estado hidrostático), cuando la turbina entra en régimen, la misma corta su funcionamiento.

Del mismo modo, el sistema de lubricación de los cojinetes cuenta con una válvula antes del virador que abre en el momento de virar para lubricar los elementos de máquina de éste.

Ciclo termodinámico

El ciclo termodinámico al cual obedecen las dos turbinas de vapor instaladas en la Central, es el ciclo de Rankine como base, correctamente denominado ciclo de Hirn por ser de carácter regenerativo; está conformado por cuatro extracciones. El fluido de trabajo es agua destilada, la cual es producida en planta.

Circuito cerrado de agua

Se hará una descripción cualitativa del circuito cerrado del fluido de trabajo (Fig. 26), teniendo en cuenta todos los equipos involucrados en forma directa e indirecta.

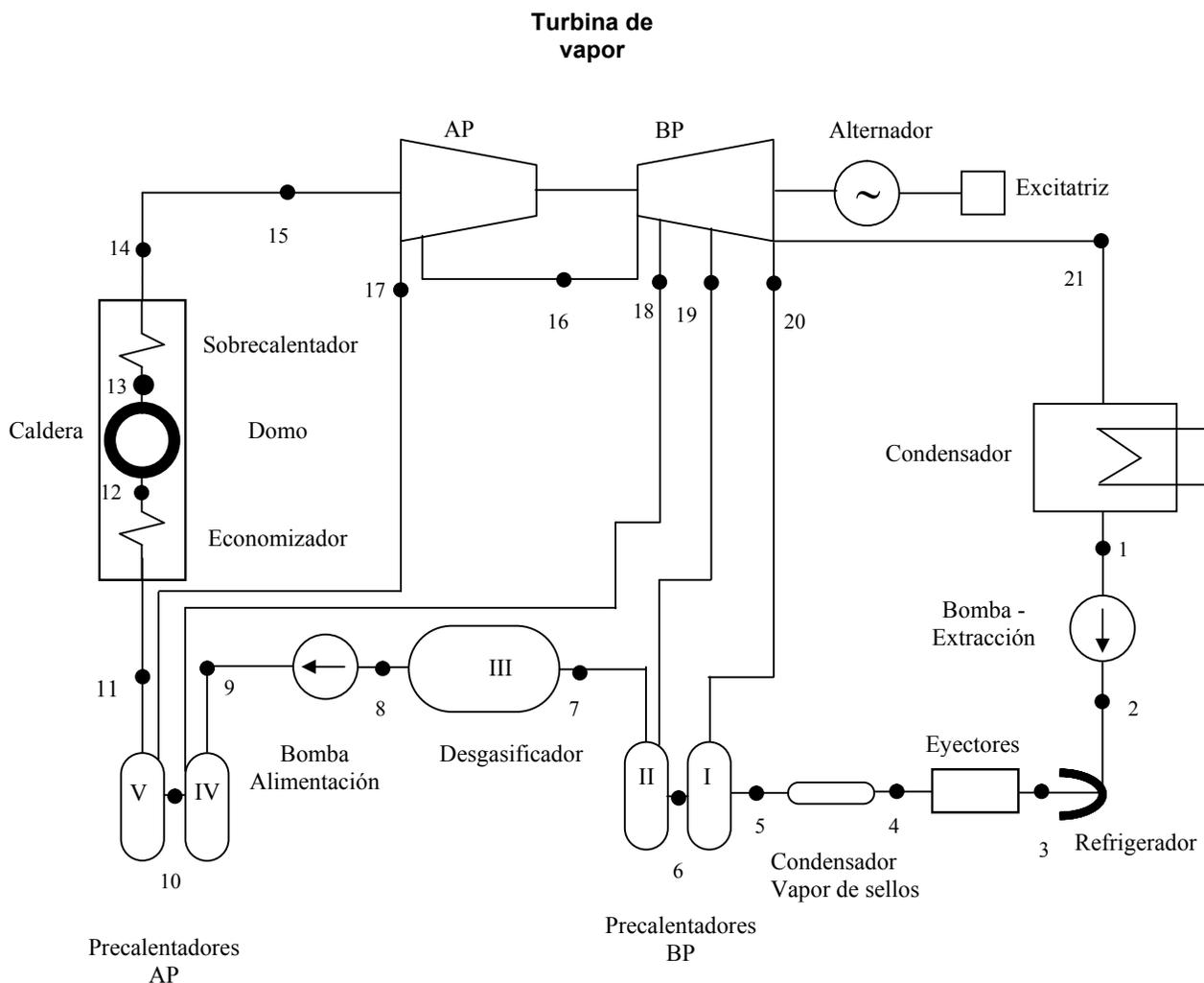


Figura 26. Esquema del circuito cerrado del fluido de trabajo

Como punto de partida tomamos el condensado a la salida del condensador. El fluido en estado líquido ingresa (1) a la bomba de extracción (Fig. 27), la cual tiene la misión de elevar la presión. El mismo egresa (2) para iniciar el trayecto hacia la caldera. A lo largo de este recorrido pasa por diversos equipos auxiliares que restituyen las características y elevan la presión y temperatura del mismo.

De la bomba de extracción pasa por un intercambiador horizontal de superficie (3) el cual posee un doble propósito y se lo denominado refrigerador. Este tiene como objeto enfriar el condensado, proveniente del precalentador de BP I, que tiene como destino el condensador. Esta energía liberada es aprovechada para calentar el caudal de agua provisto por la bomba antes mencionada.



Figura 27. Bomba de extracción

Del refrigerador pasa por dos eyectores de servicio (Fig. 28), dispuestos en paralelo. Dichos eyectores tienen como función extraer los gases no condensables albergados en el interior del condensador, contribuyendo de esta forma con el vacío. Básicamente es un sistema de toberas convergentes – divergentes por donde circula vapor vivo, proveniente del colector, a gran velocidad. Como consecuencia de esto se genera una zona de depresión a la salida de la tobera derivando en el arrastre de dichos gases. El fluido de arrastre es recirculado al condensador. Previamente se aprovecha su energía calórica para ceder calor al condensado mediante dos intercambiadores (4) asociados a cada eyector.



Figura 28. Eyectores de servicio y arranque

El recorrido continúa por el condensador de vapor de sellos (5) (Fig. 29), en el cual se condensa el vapor que egresa de los sellos laberínticos de la turbina; y se aprovecha el calor cedido para elevar la temperatura al agua del ciclo. Este equipo es un intercambiador de calor horizontal de superficie, con aislamiento térmico.



Figura 29. Condensador de vapor de sellos

Luego se dirige hacia los precalentadores de baja presión (Fig. 30), pasando primero por el precalentador BP I (6) y luego por el BP II (7). Estos intercambiadores verticales de superficie intercambian, con el agua del ciclo, el calor proveniente de la cuarta (20) y la tercer extracción (19) respectivamente, las cuales surgen de las gradas 17 y 15 del cuerpo BP.



Figura 30. Precalentadores BP y AP

Posteriormente circula hacia el desgasificador (Fig. 31) (8), el cual es un intercambiador de mezcla. El propósito principal es extraer los gases no condensables, sobretodo el oxígeno presente en el condensado. Para esto se utiliza una sustancia química denominada hidracina la que reacciona con el condensado liberando el exceso oxígeno presente en éste. El condensado es atomizado hacia su interior por medio de una válvula llamada Stork. Allí se mezcla con parte del vapor vivo proveniente de la segunda extracción que surgen de la grada 12 (18) del cuerpo BP.



Figura 31. Desgasificador

Siguiendo el recorrido, el condensado ingresa a las bombas de alimentación (Fig. 32) (9). Por las mismas se confiere una muy alta presión al condensado, característica esencial para el ingreso del mismo a la caldera.



Figura 32. Bombas de alimentación

A continuación pasa por los precalentadores de alta presión, del tipo vertical de superficie, pasando primero por el AP IV (10) y luego por el AP V (11). Éstos intercambian el calor proveniente de la segunda (18) y primer extracción (17) respectivamente, las cuales surgen de las la gradas 12 del cuerpo BP y la grada 10 del cuerpo AP.

Posteriormente ingresa a la caldera (Fig. 33), la cual tiene una capacidad de producción de vapor de 130 toneladas por hora, donde circula hacia el domo pasando previamente por el economizador (12). En éste se eleva la temperatura del condensado mediante la utilización de los gases de escape. Una vez en el domo, desciende por tubos denominados portadores y regresa al mismo en estado de vapor húmedo por los tubos hervidores (13). Dichos tubos reciben el calor de los gases producidos en la combustión. El vapor húmedo egresa del domo, pasando a través de un sistema ciclónico, para así dirigirse a los sobrecalentadores primario y secundario (14). En estos se transforma en vapor sobrecalentado llegando a la temperatura de 500 ° C, para dirigirse hacia la turbina.



Figura 33. Cuerpo superior de caldera

El mismo es transportado a través de cañerías aisladas térmicamente hacia la turbina (15), ingresando a ésta a través de las válvulas de admisión, con una presión de 80 Kg./cm² a 495 ° C. La expansión se lleva a cabo primero en la etapa de alta presión (16) resultando al final de la misma 24 Kg./cm² y 366 ° C . Luego se efectúa la expansión en la etapa de baja presión (21). El resultado es la energía cinética de rotación del eje móvil de la turbina.

Últimamente el fluido continúa su recorrido por el condensador (Fig. 34), que es un intercambiador horizontal de superficie en donde ingresa a la carcasa del mismo, como vapor húmedo y pasa a estado líquido. El agente refrigerante es agua de mar impulsada por las bombas de circulación que toman el caudal del canal de entrada. La misma atraviesa, en dos números de pasos, una cantidad de 3650 tubos para finalizar nuevamente en el mar circulando por el canal de salida. La carcasa del condensador está sometida a presión negativa. Esta situación de vacío se logra mediante el eyector de arranque, durante esa etapa. Durante el régimen normal de funcionamiento el vacío se logra por la acción conjunta de los eyectores de servicio que extraen los gases no condensables, y por la brusca reducción del volumen específico propio de la condensación del vapor húmedo.



Figura 34. Condensador

Análisis de la influencia de las extracciones

Para el análisis propuesto, se comenzará por realizar la descripción del ciclo termodinámico de Carnot para el vapor de agua, el cual está compuesto de cuatro procesos (reversibles o irreversibles):

- Compresión adiabática 1 – 2
- Expansión isotérmica 2 – 3
- Expansión adiabática 3 – 4
- Compresión isotérmica 4 – 1

Dicho ciclo se representa en el plano T – S (ciclo 1-2-3-4-1), junto a un ciclo de Rankine simple (ciclo a-2-3-4-a), operando entre las mismas temperaturas extremas (Fig. 35).

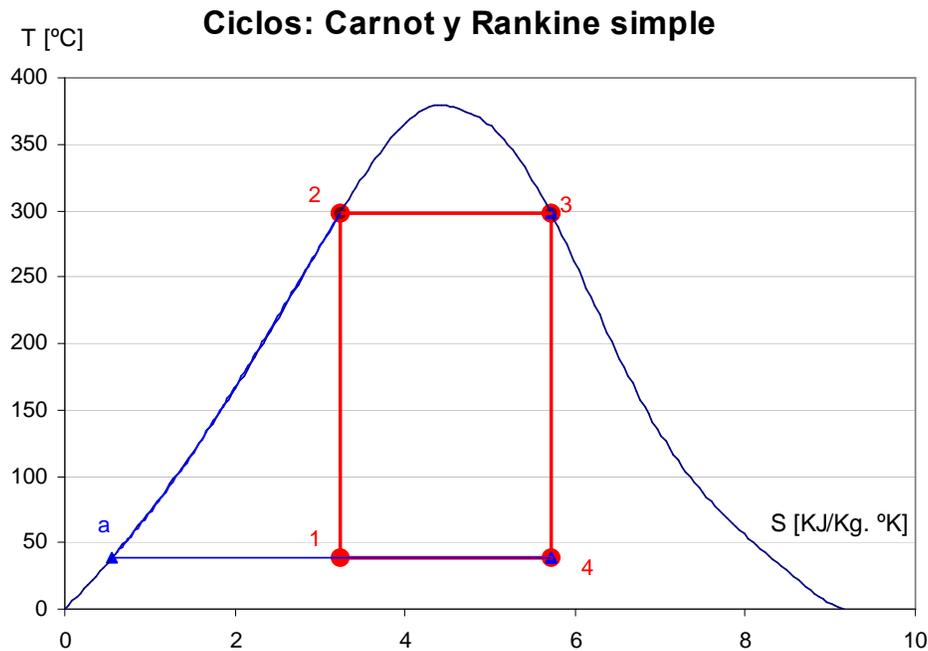


Figura 35. Ciclo de Carnot reversible y de Rankine simple para vapor de agua.

El ciclo de Carnot ha sido presentado ya que es necesario para la demostración del aumento de rendimiento térmico del ciclo de Rankine regenerativo respecto al simple. El ciclo de Hirn de cuatro extracciones con el que se opera en la Central 9 de Julio se puede descomponer en ciclos elementales de Carnot (reversibles o irreversibles), trazando una serie de adiabáticas próximas y cerrando dichos ciclos elementales con isoterma trazadas por el punto medio del segmento de curva del ciclo inicial, representado en el plano P - V (Fig. 36).

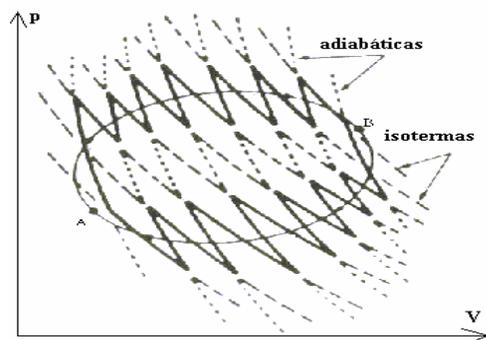


Figura 36. Descomposición de un ciclo en ciclos elementales de Carnot

Para dicho ciclo irreversible, se verifica la siguiente desigualdad:

$$\oint \frac{dQ}{T} \leq 0$$

Esta es conocida como *Desigualdad de Clausius*, correspondiendo la igualdad a todo ciclo reversible y la desigualdad propuesta a todo irreversible.

Demostración

Por lo expuesto anteriormente conocemos la existencia de una diferencia entre los rendimientos correspondientes entre los ciclos de Rankine simple y regenerativo, la cual se demostrara. Para ello se aproximan sendos ciclos de Rankine al ciclo de Carnot, obteniéndose la diferencia de rendimiento entre un ciclo de Carnot único para el ciclo de Rankine simple y la suma de los ciclos de Carnot aproximados de cada extracción para el ciclo de Rankine regenerativo.

Se hará el cálculo para el lado izquierdo del diagrama entrópico (circulación hacia caldera), ya que sobre éste se visualiza en mayor grado la diferencia de rendimientos, pero cabe aclarar que de igual forma ocurre sobre la expansión del vapor en la turbina.

Los dos ciclos a estudiar se proyectan en diagrama T – S (Fig. 37), donde la superficie proporcional al trabajo queda establecida de acuerdo a la siguiente identificación:

Ciclo aproximado de Carnot del ciclo Rankine simple:

- ciclo 1-a-a'-2-1

Ciclo aproximado de Carnot del ciclo Rankine con cuatro extracciones:

- ciclo V-i-j-2-V □ primer extracción
- ciclo V-g-h-V-IV □ segunda extracción
- ciclo II-e-f-IV-II □ tercer extracción
- ciclo I-c-d-II-I □ cuarta extracción
- ciclo 1-a-b-I-1 □ condensador

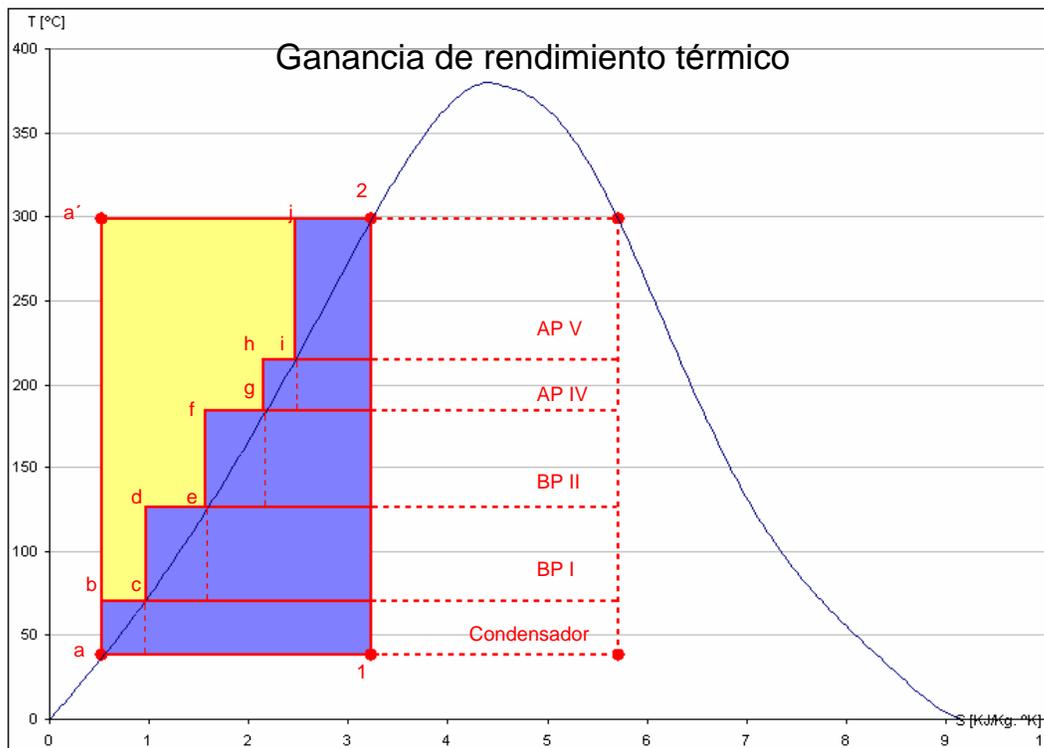


Figura 37. Ganancia de rendimiento térmico debida a la regeneración.

El trabajo útil perdido es proporcional al área que queda a la izquierda de la curva de líquido saturado. Se aprecia rápidamente que dicho área es mayor en el caso del ciclo simple que la del regenerativo, la cual esta compuesta por la suma de las correspondientes a cada uno de los sub-ciclos que lo componen.

Esta apreciación será respaldada cuantitativamente. Para ello se calcularán los trabajos netos y los rendimientos de ambos ciclos aproximados de Carnot, de acuerdo con los parámetros medidos en planta, comenzando por el ciclo de Rankine simple siguiendo por el regenerativo.

El trabajo útil se define como la diferencia entre en calor de entrada y el de salida según la siguiente expresión:

$$\tau = Q_e - Q_s$$

Rankine sin extracciones

- Calor de entrada

$$Q_e = T_H \times \Delta S^{1-a} = 571,76^\circ K \times \left(0,7743 \frac{Kcal}{Kg.\circ K} - 0,1315 \frac{Kcal}{Kg.\circ K} \right)$$

$$Q_e = 571,76^\circ K \times 0,6428 \frac{Kcal}{Kg.\circ K} = 367,53 \frac{Kcal}{Kg.}$$

- Calor de salida

$$Q_s = T_{C_o} \times \Delta S^{1-a} = 311,55^\circ K \times 0,6428 \frac{Kcal}{Kg.\circ K}$$

$$Q_s = 200,26 \frac{Kcal}{Kg.}$$

- Trabajo útil

$$\tau = 367,53 \frac{Kcal}{Kg.} - 200,26 \frac{Kcal}{Kg.} = 167,266 \frac{Kcal}{Kg.\circ K}$$

- Rendimiento

$$\eta = \frac{\tau}{Q_e} = \frac{167,266 Kcal/ Kg.}{367,53 Kcal/ Kg.} = 0,455$$

$$\boxed{\eta_{\%} = 45,50\%}$$

Rankine con extracciones

Extracción AP V □ ciclo V-i-j-2-V

- Calor de entrada

$$Q_e^{APV} = T_H \times \Delta S^{1-i} = 571,76^\circ K \times \left(0,7743 \frac{Kcal}{Kg.\circ K} - 0,61 \frac{Kcal}{Kg.\circ K} \right)$$

$$Q_e^{APV} = 571,76^\circ K \times 0,1643 \frac{Kcal}{Kg.\circ K} = 93,94 \frac{Kcal}{Kg.}$$

- Calor de salida

$$Q_s^{APV} = T_{APV} \times \Delta S^{1-i} = 496,05^\circ K \times 0,1643 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K}$$

$$Q_s^{APV} = 81,5 \frac{Kcal}{Kg.}$$

- Trabajo útil

$$\tau^{APV} = 93,94 \frac{Kcal}{Kg.} - 81,5 \frac{Kcal}{Kg.} = 12,44 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K}$$

- Rendimiento del ciclo - AP V

$$\eta^{APV} = \frac{\tau}{Q_e} = \frac{12,44 Kcal/ Kg.}{93,94 Kcal/ Kg.} = 0,1324$$

$$\eta_{\%}^{APV} = 13,24\%$$

Extracción AP IV □ ciclo IV-g-h-V-IV

- Calor de entrada

$$Q_e^{APIV} = T_{APV} \times \Delta S^{1-g} = 496,05^\circ K \times \left(0,7743 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K} - 0,52 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K} \right)$$

$$Q_e^{APIV} = 496,05^\circ K \times 0,2543 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K} = 126,1455 \frac{Kcal}{Kg.}$$

- Calor de salida

$$Q_s^{APIV} = T_{APIV} \times \Delta S^{1-g} = 456,75^\circ K \times 0,2543 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K} = 116,15 \frac{Kcal}{Kg.}$$

- Trabajo útil

$$\tau = 126,1455 \frac{Kcal}{Kg.} - 116,15 \frac{Kcal}{Kg.} = 6,994 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K}$$

- Rendimiento del ciclo - AP IV

$$\eta^{APIV} = \frac{\tau^{APIV}}{Q_e^{APIV}} = \frac{6,994 Kcal/ Kg.}{126,1455 Kcal/ Kg.} = 0,055$$

$$\eta_{\%}^{APIV} = 5,5\%$$

Extracción BP II □ ciclo II-e-f-IV-II

- Calor de entrada

$$Q_e^{BP^{II}} = T_{AP^{IV}} \times \Delta S^{1-e} = 456,75^\circ K \times \left(0,7743 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K} - 0,388 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K} \right)$$

$$Q_e^{BP^{II}} = 456,75^\circ K \times 0,3863 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K} = 176,4425 \frac{Kcal}{Kg.}$$

- Calor de salida

$$Q_s^{BP^{II}} = T_{BP^{II}} \times \Delta S^{1-e} = 402,24^\circ K \times 0,3863 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K} = 155,3853 \frac{Kcal}{Kg.}$$

- Trabajo útil

$$\tau^{BP^{II}} = 176,4425 \frac{Kcal}{Kg.} - 155,3853 \frac{Kcal}{Kg.} = 21,0572 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K}$$

- Rendimiento del ciclo - BP II

$$\eta^{BP^{II}} = \frac{\tau^{BP^{II}}}{Q_e^{BP^{II}}} = \frac{21,0572 \text{ Kcal/ Kg.}}{176,4425 \text{ Kcal/ Kg.}} = 0,1193$$

$$\eta_{\%}^{BP^{II}} = 11,93\%$$

Extracción BP I □ I-c-d-II-I

- Calor de entrada

$$Q_e^{BP^I} = T_{BP^{II}} \times \Delta S^{1-c} = 402,24^\circ K \times \left(0,7743 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K} - 0,2365 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K} \right)$$

$$Q_e^{BP^I} = 496,05^\circ K \times 0,5378 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K} = 216,3247 \frac{Kcal}{Kg.}$$

- Calor de salida

$$Q_s^{BP^I} = T_{BP^I} \times \Delta S^{1-c} = 346,05^\circ K \times 0,5378 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K} = 186,1057 \frac{Kcal}{Kg.}$$

- Trabajo útil

$$\tau^{BP^I} = 216,3247 \frac{Kcal}{Kg.} - 186,1057 \frac{Kcal}{Kg.} = 30,219 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K}$$

- Rendimiento del ciclo - BP I

$$\eta^{BP^I} = \frac{\tau^{BP^I}}{Q_e^{BP^I}} = \frac{30,219 \text{ Kcal/ Kg.}}{216,3247 \text{ Kcal/ Kg.}} = 0,1397$$

$$\eta_{\%}^{BP^I} = 13,97\%$$

Condensador □ ciclo 1-a-b-l-1

- Calor de entrada

$$Q_e^{C_o} = T_{BP^I} \times \Delta S^{1-a} = 346,05^\circ K \times \left(0,7743 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K} - 0,1315 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K} \right)$$

$$Q_e^{C_o} = 346,05^\circ K \times 0,6428 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K} = 222,441 \frac{Kcal}{Kg}$$

- Calor de salida

$$Q_s^{C_o} = T_{C_o} \times \Delta S^{1-a} = 311,55^\circ K \times 0,6428 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K} = 200,26 \frac{Kcal}{Kg}$$

- Trabajo útil

$$\tau^{C_o} = 222,441 \frac{Kcal}{Kg} - 200,26 \frac{Kcal}{Kg} = 22,176 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K}$$

- Rendimiento del ciclo - condensador

$$\eta^{C_o} = \frac{\tau^{BP^I}}{Q_e^{BP^I}} = \frac{22,176 \text{ Kcal/ Kg.}}{222,441 \text{ Kcal/ Kg.}} = 0,099 \quad \boxed{\eta_{\%}^{C_o} = 9,9\%}$$

El trabajo útil total es la suma de los trabajos hechos en cada una de las extracciones, por lo tanto se obtiene:

$$\tau^T = \sum_{i=1}^5 \tau^i = \tau^{AP^I} + \tau^{AP^{II}} + \tau^{BP^{II}} + \tau^{BP^I} + \tau^{C_o}$$

$$\tau^T = 12,44 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K} + 6,994 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K} + 21,0572 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K} + 30,219 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K} + 22,176 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K}$$

$$\tau^T = 92,8862 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K}$$

El rendimiento total resulta:

$$\eta^T = \sum_{i=1}^5 \eta^i = 0,1324 + 0,055 + 0,1193 + 0,1397 + 0,099 = 0,5454 \quad \boxed{\eta_{\%}^T = 54,54\%}$$

Entonces, la diferencia de trabajo neto entre ambos ciclos es:

$$\Delta \tau = \tau^{s/e} - \tau^{c/e} = 167,266 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K} - 92,8862 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K}$$

$$\Delta \tau = 74,38 \frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ K}$$

La reducción porcentual del trabajo perdido al utilizar las extracciones es:

$$\tau_{p\%} = \frac{[(\tau^{s/e} - \tau^{c/e}) \times 100]}{\tau^{s/e}} = \frac{\left[74,38 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{K}} \times 100\right]}{167,266 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{K}}} = 44,47\%$$

La diferencia de rendimiento entre los ciclos es:

$$\Delta\eta = \eta^{c/e} - \eta^{s/e} = 0,5454 - 0,455 = 0,0904$$

$$\Delta\eta_{\%} = 9,04\%$$

El aumento de rendimiento en el ciclo regenerativo es de:

$$\eta_{g\%} = \frac{[(\eta^{c/e} - \eta^{s/e}) \times 100]}{\eta^{s/e}} = \frac{[0,0904 \times 100]}{0,455} = 19,87\%$$

Conclusiones

- La suma de los ciclos aproximados de Carnot del ciclo Rankine regenerativo presenta una disminución del trabajo perdido respecto al ciclo de Carnot (ciclo 1aa'21) del 44,47%.
- El rendimiento total del ciclo regenerativo es mayor que el rendimiento del ciclo de Carnot en un 19,87 %.
- De los valores obtenidos se verifica la disminución de irreversibilidad en el ciclo con extracciones.

Cabe aclarar que la cantidad de vapor a extraer presenta un valor límite, gobernado por el trabajo de la turbina. Si se quisiera disminuir al máximo la irreversibilidad de ciclo resultaría nulo el trabajo de expansión.

Régimen de servicio

Una vez reconocido el ciclo termodinámico en forma cualitativa se procede a la recolección de los datos característicos (presión y temperatura), indicados en el instrumental instalado tanto en la planta como en el tablero de mando y los propuestos por el fabricante.

Valores de Planta

Para este fin se recabaron los datos registrados el día 17 de Mayo del 2007 a las 14:00 hs, funcionando el turbogruppo con una carga aproximada de 24,250 MW en bornes del alternador, funcionando la caldera a Fuel-oil y con una temperatura de agua de refrigeración de 14 ° C. Los puntos registrados son homólogos a los designados en el esquema del circuito cerrado del fluido de trabajo. En función de las presiones y temperaturas, se obtienen los valores de entropía y entalpía de cada punto. Los mismos se encuadran en planilla de cálculo (Tabla 5) para con estos trazar el diagrama entrópico del ciclo.

Cabe destacar que las presiones en tabla son absolutas P_a , puesto que así lo requiere dicho diagrama, para esto se corrigieron las presiones manométricas P_r (relativas a la presión atmosférica) según la siguiente fórmula:

$$P_a = P_r + P_{atm} \rightarrow P_{atm} = 1 \text{ Kg./cm}^2$$

La tabla se confecciona según los siguientes campos:

- **Punto** que es el que corresponde al lugar donde se registra la medición.
- **Temperatura** en ° C.
- **Presión absoluta** en Kg./ cm²
- **Entropía** en Kcal./Kg. ° K
- **Entalpía** en Kcal. /Kg.
- **Titulo** según estado.
- **Detalle** del punto en cuestión.

PUNTO	T [°C]	P [Kg./cm2]	S [Kcal/Kg. °K]	h [Kcal/Kg]	Titulo	DETALLE
1	40	0,155	0,1367	40,1000	Liquido	Ingreso a Bomba Extracción
2	40	13	0,1365	40,2700	Liquido	Egreso de Bomba Extracción
3	s/d	s/d			Liquido	Egreso de Refrigerador
4	s/d	s/d			Liquido	Egreso de Eyectores
5	s/d	s/d			Liquido	Egreso Condensador Vapor de Sellos
6	132	7,5	0,3953	132,5900	Liquido	Egreso BP I y BP II
7	147	4,9	0,4325	147,9700	Liquido	Desgasificador
8	149	5,4	0,4374	149,9700	Liquido	Ingreso Bomba Alimentación
9	149	114	0,4347	151,5600	Liquido	Egreso Bomba Alimentación
10	185	s/d			Liquido	Egreso Precaentador AP IV
11	215	112	0,5866	220,6000	Liquido	Egreso AP V - Ingreso Caldera
12	273	86,6	0,7155	286,5100	Liquido	Ingreso Domo
13 i	298,61	85,9	0,7743	319,4000	0	Hervidores - Inicio evaporación
13 f	298,61	85,9	1,3660	657,7000	1	Hervidores - Fin evaporación
14	502	82	1,6074	812,8500	Vapor	Egreso Caldera - Sobrecalentador secun.
15	499	79	1,6100	811,9200	Vapor	Ingreso a Turbina
16	366	25	1,6509	756,0800	Vapor	By Pass AP - BP
17	366	25	1,6509	756,0800	Vapor	<i>Extracción Vapor - AP V</i>
18	293	11,1	1,6854	724,8500	Vapor	<i>Extracción Vapor - AP IV - Desgasificador</i>
19	231	2,6	1,7961	700,0400	Vapor	<i>Extracción Vapor - BP II</i>
20	93	0,36	1,8685	637,9300	Vapor	<i>Extracción Vapor - BP I</i>
21	41	0,0690	1,9832	615,3700	Vapor	Egreso de turbina
22 i	38,40	0,0690	1,9797	614,2100	1	Condensador - Inicio Condensación
22 f	38,40	0,0690	0,1315	38,3900	0	Condensador - Fin Condensación

Tabla 5. Datos de campo

NOTA: los ítems del campo **Punto** son coincidentes tanto al “Esquema del circuito cerrado del fluido de trabajo” como a los detallados en la descripción cualitativa.

Para un mejor entendimiento se define:

Entropía: Es la magnitud física que mide la parte de la energía que no puede utilizarse para producir trabajo. Se la interpreta como la medida de la irreversibilidad de la energía de un sistema y es una función de estado.

Entalpía: Es la cantidad de energía de un sistema termodinámico que este puede intercambiar con su entorno. También es función de estado.

Vapor saturado: Vapor en equilibrio con su líquido.

Líquido saturado: Líquido en equilibrio con su vapor.

Vapor húmedo: Mezcla líquido / vapor saturado.

Título: Es la cantidad de vapor saturado por kilogramo de vapor húmedo, y suele expresarse como porcentaje o fracción decimal. Da una idea de la calidad del vapor húmedo.

Valores de Fábrica

Se construye planilla (Tabla. 6) con los valores característicos propuestos por el fabricante, ESCHER WYSS, para una potencia de 24 MW, funcionando la caldera a gas y con 14 ° C de temperatura de refrigeración. Dicha información se extrae de los manuales (ver Anexo V) y planos del equipo.

En la tabla se incluye un nuevo campo: **Caudal** [Kg. /h].

PUNTO	T [°C]	P [Kg./cm2]	S [Kcal/Kg. °K]	h [Kcal/Kg]	Caudal [kg/h]	Título	DETALLE
1	25,2	0,093	0,08830	25,2300	78110	Líquido	Ingreso a Bomba Extracción
2	25,2	13	0,08824	25,5000	78110	Líquido	Egreso de Bomba Extracción
3	32,7	s/d			78110	Líquido	Egreso de Refrigerador
4	34,3	s/d			78110	Líquido	Egreso de Eyectores
5	35,4	s/d			78110	Líquido	Egreso Condensador Vapor de Sellos
6	117,7	s/d			78110	Líquido	Egreso BP I y BP II
7	147,2	5,5	0,433	148,1200	91000	Líquido	Desgasificador
8	149,9	s/d			91000	Líquido	Ingreso Bomba Alimentación
9	149,9	114	0,4368	152,4800	91000	Líquido	Egreso Bomba Alimentación
10	169,9	s/d			91000	Líquido	Egreso Precaentador AP IV
11	199,3	109	0,554	204,7000	91000	Líquido	Egreso AP V - Ingreso Caldera
12	s/d	87			91000	Líquido	Ingreso Domo
13 i	298,68	86	0,7745	319,5100	91000	0	Hervidores - Inicio evaporación
13 f	298,68	86	1,3658	657,6700	91000	1	Hervidores - Fin evaporación
14	500	80	1,6091	812,2300	91000	Vapor	Egreso Caldera - Sobrecalentador secun.
15	495	79	1,607	809,4000	91000	Vapor	Ingreso a Turbina
16	321,23	17,28	1,6574	735,9700	85510	Vapor	By Pass AP - BP
17	321,23	17,28	1,6574	735,9700	85510	Vapor	<i>Extracción Vapor - AP V</i>
18	244,54	9	1,664	701,1000	78110	Vapor	<i>Extracción Vapor - AP IV - Desgasificador</i>
19	147,7	2,2	1,7271	659,8000	72300	Vapor	<i>Extracción Vapor - BP II</i>
20	84,14	0,57	1,7305	606,5000	66240	0,95160	<i>Extracción Vapor - BP I</i>
21	25,37	0,033	1,7891	532,9400	66240	0,87032	Egreso de turbina
22 i	25,37	0,033	1,7891	532,9400	66240	0,87032	Condensador - Inicio Condensación
22 f	25,37	0,033	0,0889	25,3900	78110	0	Condensador - Fin Condensación

Dado que los equipos Turbovapor son el tipo caudal variable, este dato es de gran relevancia, para el análisis del funcionamiento en servicio. Esto motiva al cálculo del porcentaje del vapor (Tabla 7) que es extraído en cada extracción.

Caudal requerido para generar 24 MW - Fabricante		
Caudal [Kg/h]	% del total	Fracción de expansión
91000 - Total	100	1
5490 - 1° ext.	6,03	0,940
7400 - 2° ext.	8,13	0,858
5810 - 3° ext.	6,38	0,795
6060 - 4° ext.	6,66	0,728

Tabla 7. Caudal de vapor

Nota: se anexan todas las planillas de cálculos (ver Anexo VI)

Diagrama Entrópico

Con los datos obtenidos se construye el diagrama entrópico (Fig. 38) correspondiente a la situación actual y a la propuesta por el fabricante. Destacamos que en el manual se propone el balance térmico para distintos estados de carga, pero se elige el de 24 MW para que el estudio funcionamiento sea del carácter comparable.

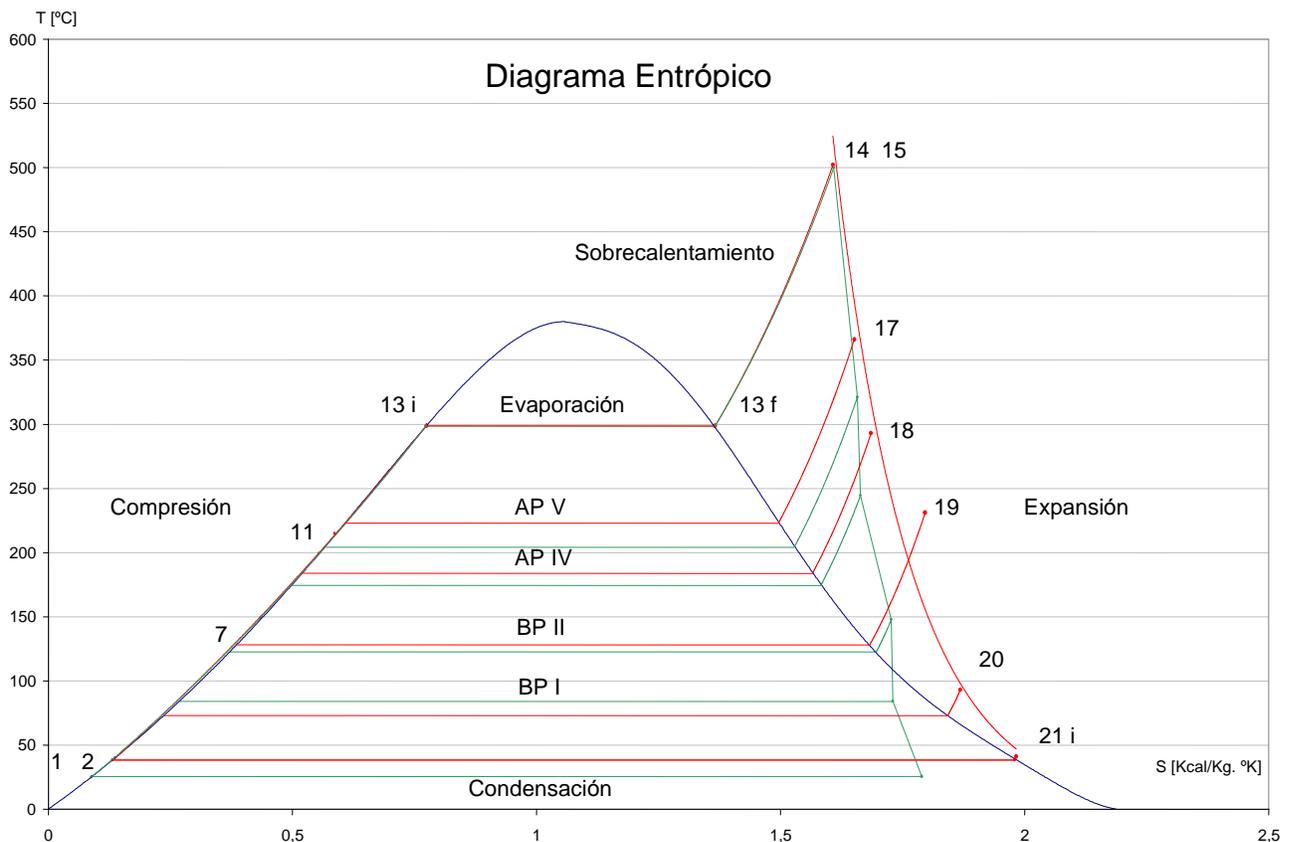


Figura 38. Diagrama entrópico

Cálculos termodinámicos

Se enuncia al rendimiento térmico del ciclo de Rankine como el cociente entre el trabajo neto desarrollado y el calor cedido. El mismo queda cuantificado según la siguiente expresión:

$$\eta_{ter} = \frac{L_N}{Q_c} = \frac{L_T - L_B}{Q_c} = \frac{\text{Trabajo neto desarrollado}}{\text{Calor cedido}}$$

$$L_T = h_e - h_s \rightarrow \text{trabajo desarrollado en la turbina}$$

$$L_b = -\int_e^s v \times dp = v_s \times (p_e - p_s) \rightarrow \text{trabajo de bombeo}$$

$$Q_c = h_s - h_e \rightarrow \text{calor cedido al agua}$$

Referencia:

- e: entrada
- s: salida

En el trabajo de bombeo se simplifica la integral dado que se considera al fluido incompresible, situación teórica aceptable.

Análisis del balance térmico de origen

Calculo del rendimiento térmico

Se procede por calcular el trabajo desarrollado por la turbina y el calor cedido al fluido. Como primera aproximación se desprecia el trabajo de bombeo, puesto que es de influencia relativamente baja. Tampoco se tienen en cuenta las extracciones de vapor.

Resultados:

- $L_T = h_{15} - h_{21} = 809,4 \text{Kcal} / \text{Kg} - 532,94 \text{Kcal} / \text{Kg} = 276,46 \text{Kcal} / \text{Kg}$
- $L_b = 0$
- $Q_c = h_{14} - h_2 = 812,23 \text{Kcal} / \text{Kg} - 25,50 \text{Kcal} / \text{Kg} = 786,73 \text{Kcal} / \text{Kg}$

Con estos se deriva en el rendimiento térmico sin extracciones.

$$\eta_{ter\ s/e\ \%} = \frac{L_T}{Q_c} = \frac{276,46 \text{Kcal} / \text{Kg}}{786,73 \text{Kcal} / \text{Kg}} \times 100 = 35,14\%$$

De la misma forma pero teniendo en cuentas las extracciones de vapor resulta:

- $L_T = (h_{15} - h_{17}) + (h_{17} - h_{18}) \times X_{1^{ex}} + (h_{18} - h_{19}) \times X_{2^{ex}} + (h_{19} - h_{20}) \times X_{3^{ex}} + (h_{20} - h_{21}) \times X_{4^{ex}} =$
 $= (809,4 - 735,9) \text{Kcal} / \text{Kg} + (735,97 - 701,1) \text{Kcal} / \text{Kg} \times 0,94 + (701,1 - 659,80) \text{Kcal} / \text{Kg} \times 0,858 +$
 $+ (659,8 - 606,5) \text{Kcal} / \text{Kg} \times 0,795 + (606,5 - 532,94) \text{Kcal} / \text{Kg} \times 0,728 =$
 $= 237,54 \text{Kcal} / \text{Kg}$
- $L_b = 0$
- $Q_c = h_{14} - h_{11} = 812,23 \text{Kcal} / \text{Kg} - 204,7 \text{Kcal} / \text{Kg} = 607,53 \text{Kcal} / \text{Kg}$

Como producto final se obtiene el rendimiento térmico con extracciones de vapor.

$$\eta_{ter\ c/e\ \%} = \frac{237,54 \text{Kcal} / \text{Kg}}{607,53 \text{Kcal} / \text{Kg}} \times 100 = 39,10\%$$

Si comparamos ambos rendimientos se aprecia que el rendimiento del ciclo con las pertinentes extracciones de vapor es mayor que sin ellas.

$$\text{Incremento} = \eta_{\text{ter } c/e \%} - \eta_{\text{ter } s/e \%} = 3,96\%$$

Este incremento representa un ganancia en el ciclo a nivel porcentual deriva en el siguiente valor.

$$\text{Porcentaje del aumento} = \frac{\eta_{\text{ter } c/e \%} - \eta_{\text{ter } s/e \%}}{\eta_{\text{ter } s/e \%}} \times 100 = 11,27\%$$

Con el fin de lograr resultados con mayor precisión se calculan la potencia desarrollada en turbina, la de bombeo y la aportada por la caldera. Por el mismo motivo se tiene en cuenta las extracciones de vapor. Aquí entra en juego la variable caudal. Se utiliza el factor de conversión calorías-watt hora.

$$N_T [KW] = \dot{m}_v [Kg / h] \times L_T [Kcal / Kg] = \frac{91.000 Kg / h \times 237,54 Kcal / Kg}{860 Kcal / KWh} = 25134,9 KW \cong 25,14 MW$$

$$N_B [KW] = 1395,1 KW$$

$$Q_c [KW] = \dot{m}_v [Kg / h] \times Q_c [Kcal / Kg] = \frac{91.000 Kg / h \times 607,53 Kcal / Kg}{860 Kcal / KWh} = 64285,2 KW \cong 64,3 MW$$

De éstos se desprende el rendimiento térmico el propuesto por el fabricante:

$$\eta_{\text{ter}\%} = \frac{N_T - N_B}{Q_c} \times 100 = \frac{25,14 MW - 1,39 MW}{64,3 MW} = 36,92\%$$

También se calcula la relación potencia eléctrica generada en función de la mecánica desarrollada por la turbina, que representa el rendimiento del alternador.

$$\eta_{\text{alt}\%} = \frac{N_E}{N_T} \times 100 = \frac{24,15 MW}{25,14 MW} = 96,08\%$$

Rendimiento de la instalación

$$\eta_{\text{inst}\%} = \eta_{\text{ter}} \times \eta_{\text{alt}} \times 100 = 0,3692 \times 0,9608 \times 100 = 35,48\%$$

Análisis del balance térmico actual

Como punto de partida de procede de similar manera que lo antes expuesto, resultando:

- $L_T = h_{15} - h_{21} = 811,92 Kcal / Kg - 615,37 Kcal / Kg = 196,55 Kcal / Kg$
- $L_b = 0$
- $Q_c = h_{14} - h_2 = 812,85 Kcal / Kg - 40,27 Kcal / Kg = 772,58 Kcal / Kg$

Se desprende el siguiente rendimiento térmico:

$$\eta_{ter\ s/e\ \%} = \frac{L_T}{Q_c} = \frac{196,55\text{Kcal} / \text{Kg}}{772,58\text{Kcal} / \text{Kg}} \times 100 = 25,44\%$$

Teniendo en cuenta las extracciones resulta:

- $L_T = (h_{15} - h_{17}) + (h_{17} - h_{18}) \times X_{1^{\circ}ex} + (h_{18} - h_{19}) \times X_{2^{\circ}ex} + (h_{19} - h_{20}) \times X_{3^{\circ}ex} + (h_{20} - h_{21}) \times X_{4^{\circ}ex} =$
 $= (811,92 - 756,08)\text{Kcal} / \text{Kg} + (756,08 - 724,85)\text{Kcal} / \text{Kg} \times 0,94 + (724,85 - 700,04)\text{Kcal} / \text{Kg} \times 0,858 +$
 $+ (700,04 - 637,93)\text{Kcal} / \text{Kg} \times 0,795 + (637,93 - 615,37)\text{Kcal} / \text{Kg} \times 0,728 =$
 $= 172,25\text{Kcal} / \text{Kg}$
- $L_b = 0$
- $Q_c = h_{14} - h_{11} = 812,85\text{Kcal} / \text{Kg} - 220,6\text{Kcal} / \text{Kg} = 592,25\text{Kcal} / \text{Kg}$

Como producto final se obtiene el rendimiento térmico con extracciones de vapor.

$$\eta_{ter\ c/e\ \%} = \frac{172,25\text{Kcal} / \text{Kg}}{592,25\text{Kcal} / \text{Kg}} \times 100 = 29,08\%$$

Ganancias en el rendimiento

Si comparamos los rendimientos se aprecia que el rendimiento del ciclo con las pertinentes extracciones de vapor es mayor que sin ellas.

$$\text{Incremento} = \eta_{ter\ c/e\ \%} - \eta_{ter\ s/e\ \%} = 3,64\%$$

Este incremento representa un ganancia en el ciclo a nivel porcentual deriva en el siguiente valor.

$$\text{Porcentaje del aumento} = \frac{\eta_{ter\ c/e\ \%} - \eta_{ter\ s/e\ \%}}{\eta_{ter\ s/e\ \%}} \times 100 = 14,32\%$$

Para el cálculo de las potencias desarrolladas se deben tener en cuenta ciertas hipótesis. La causa fundamental de esto radica en que los caudalímetros instalados en planta arrojan valores sólo referenciales de los cuales no resulta conveniente fiarse para ejecutar los cálculos.

Hipótesis utilizadas:

1. *Disminución relativamente pequeña del rendimiento eléctrico.*
2. *Igualdad de porcentaje de extracción de vapor, en función del caudal total que ingresa a caldera, con respecto a las propuestas por el fabricante.*
3. *Potencia de bombeo correspondiente al consumo interno*
4. *Igualdad entre caudal generado en caldera y caudal de trabajo en turbina.*

El rendimiento de los turbogeneradores de pequeña y mediana potencia se encuentra entre 94 % y 98 %. Para máquinas de 225 MW y superiores, pueden alcanzarse rendimientos de hasta 99 %. Encuadrando al alternador dentro del grupo perteneciente a pequeñas potencias aceptamos un

valor de rendimiento del 95 % levemente inferior al propuesto por el fabricante. Se desprende así que la turbina de vapor debe desarrollar la siguiente potencia mecánica.

$$N_T = \frac{N_E}{\eta_{elec}} = \frac{24250KW}{0,95} = 25526,3KW$$

De acuerdo a la segunda hipótesis se obtiene el caudal de vapor, y el correspondiente a cada extracción (Tabla 8), necesario para desarrollar dicho valor de potencia mecánica.

$$\dot{m}_v = \frac{N_T}{L_T} = \frac{25526,3KW \times 860Kcal / KWh}{172,25Kcal / Kg} = 127446Kg / h$$

Caudal requerido para generar 24,250 MW - Actual	
Caudal	%
127446 – Total	100,000
7689– 1° ext.	6,033
10364– 2° ext.	8,132
8137– 3° ext.	6,385
8487– 4° ext.	6,659

Tabla 8. Caudal de vapor

Con respecto a la potencia de bombeo, se debe aclarar que ésta engloba no solo el consumo eléctrico de las bombas en si mismas, sino que también se debe tener en cuenta que una fracción de lo que se genera también es utilizada por motores varios, iluminación, válvulas y otros. Para cuantificar esta potencia, se toma como base un consumo promedio de servicios interno cercano al 5,5 % de la potencia bruta generada. Dicho valor se desprende de medidor interno.

$$N_B = \text{fraccion decimal} \times N_T = 0,055 \times 24250KW = 1333,75KW$$

La potencia desarrollada por la caldera resulta:

$$Q_c[KW] = \dot{m}_v \times Q_c [Kcal / Kg] = \frac{127446Kg / h \times 592,25Kcal / Kg}{860Kcal / KWh} = 88767,53KW$$

A partir de los valores calculados se obtiene el siguiente rendimiento térmico:

$$\eta_{ter\%} = \frac{N_T - N_B}{Q_c} \times 100 = \frac{25526,3KW - 1333,75KW}{88767,53KW} = 27,56\%$$

Rendimiento de la instalación

$$\eta_{inst\%} = \eta_{ter} \times \eta_{alt} \times 100 = 0,2756 \times 0,95 \times 100 = 26,19\%$$

Relación de rendimiento original-actual

$$\text{Porcentaje de reducción} = \frac{\eta_{inst\%} - \eta_{insto\%}}{\eta_{insto\%}} \times 100 = \frac{26,19\% - 35,48\%}{35,48\%} \times 100 = -26,2\%$$

Debemos destacar nuevamente que para generar cierta potencia eléctrica el generador debe recibir un determinado valor de potencia mecánica. Esta relación permanece prácticamente

invariante, a través del tiempo, en situaciones normales de funcionamiento. El hecho de que el rendimiento térmico de la instalación sea menor que el planteado por el fabricante trae aparejado como consecuencia que se requiera mayor caudal de vapor para dicha potencia mecánica.

$$\text{Porcentaje del aumento} = \frac{\dot{m}_v - \dot{m}_{v0}}{\dot{m}_{v0}} \times 100 = \frac{127446 \text{ Kg/h} - 91000 \text{ Kg/h}}{91000 \text{ Kg/h}} \times 100 = 40,05\%$$

Planillas de Partes diarios

En estas planillas se reúne toda la información diaria de generación energética, consumos auxiliares y de combustible, de cada una de las máquinas emplazadas en planta. Con esta información se puede calcular el rendimiento de la instalación (Fig. 39) con mayor precisión que lo antes expuesto, dado que al ser menor la cantidad de variables utilizadas para el cálculo se reducen las cantidades de incertidumbres a procesar.

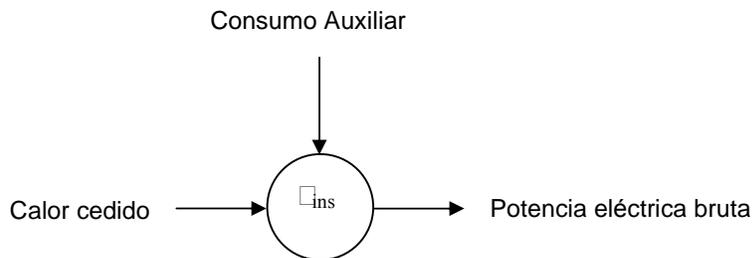


Figura 39. Diagrama en bloque del rendimiento de la instalación.

Con el objeto de hacer el análisis comparable se reúne la información correspondiente al día 17/5.

- $N_E = 24,250 \text{ MW}$
- $N_{Aux} = 1,367 \text{ MW}$

Poder calorífico del fuel-oil □ 9800Kcal/Kg.

$$\bullet \quad Q_c [MW] = Pc [Kcal / Kg] \times \dot{m}_c [Kg / h] = \frac{9800 \text{ Kcal} / \text{Kg} \times 7760 \text{ Kg} / \text{h}}{860000 \text{ Kcal} / \text{MWh}} = 88,428 \text{ MW}$$

Rendimiento de la instalación

$$\eta_{inspd\%} = \frac{24,250 \text{ M} - 1,367 \text{ MW}}{88,428 \text{ MW}} \times 100 = 25,88\%$$

Análisis de errores

$$\text{error}_{\%} = \frac{\eta_{ins\%} - \eta_{inspd\%}}{\eta_{inspd\%}} \times 100 = 1,19\% \rightarrow \text{error en exceso}$$

Comportamiento en función del combustible

Otra de las utilidades que brindan los partes diario es la posibilidad de calcular los rendimientos de la instalación en función del tipo de combustible utilizado, sea gas natural o fuel oil.

Para poder hacer una comparación del rendimiento de la instalación, tenemos en cuenta dos días en los cuales se generó la misma energía bruta pero con distinto combustible.

Funcionamiento a Fuel-oil - 18/05

- $N_E = 24,167MW$
- $N_{Aux} = 1,371MW$

Poder calorífico del fuel-oil \square 9800Kcal/Kg.

$$\bullet \quad Q_c [MW] = Pc [Kcal / Kg] \times \dot{m}_c [Kg / h] = \frac{9800Kcal / Kg \times 7733,3Kg / h}{860000Kcal / MWh} = 88,124MW$$

Resulta como rendimiento de la instalación:

$$\eta_{insfo\%} = \frac{24,167M - 1,371MW}{88,124MW} \times 100 = 25,87\%$$

Funcionamiento a gas natural – 06/04

- $N_E = 24,167MW$
- $N_{Aux} = 1,354MW$

Poder calorífico del gas natural \square 8300 Kcal. /m³

$$\bullet \quad Q_c [MW] = Pc [Kcal / m^3] \times \dot{m}_c [m^3 / h] = \frac{8300[Kcal / m^3] \times 8700[m^3 / h]}{860000Kcal / MWh} = 83,965MW$$

Resulta como rendimiento de la instalación:

$$\eta_{ins\%} = \frac{24,167M - 1,354MW}{83,965MW} \times 100 = 27,17\%$$

Análisis de resultados

Se aprecia que el rendimiento de la instalación para la generación, de una cierta cantidad de energía, es mayor cuando la misma se encuentra funcionando a gas que cuando lo hace a fuel-oil. Esto es netamente cierto y se justifica principalmente por el hecho de que cuando se trabaja con fuel oil se destina parte del vapor generado para la atomización del combustible a la caldera y para su calefacción en tanque de estiba. Esta ventaja del funcionamiento a gas se ve limitada por cuestiones de disponibilidad del mismo, dado que en épocas invernales los consumidores primordiales son las instalaciones domiciliarias.

A continuación se detalla el aumento del rendimiento y su respectivo porcentaje cuando el combustible utilizado es gas natural.

$$Aumento = \eta_{gas\%} - \eta_{fuel-oil\%} = 1,3\%$$

$$Porcentaje\ del\ aumento = \frac{\eta_{gas\%} - \eta_{fuel-oil\%}}{\eta_{fuel-oil\%}} \times 100 = 5,03\%$$

Como se dijo con antelación se requiere menor caudal de vapor cuando se trabajó con gas, lo cual queda cuantificado a través de las siguientes ecuaciones:

$$\Delta Q = Q_{gas} - Q_{fuel-oil} = 4,159 MW$$

$$Variación\ porcentual = \frac{Q_{gas\%} - Q_{fuel-oil\%}}{Q_{fuel-oil\%}} \times 100 = -4,719\%$$

El valor de la diferencia de potencia desarrollado por la caldera, en funcionamiento a fuel oil, se traduce en el siguiente caudal de vapor.

$$\dot{m}_v = \frac{\Delta Q [MW]}{Q_c [Kcal / Kg]} = \frac{4,159 MW \times 860000 Kcal / MWh}{172,25 Kcal / Kg} = 6039,1 Kg / h$$

De este se destina aproximadamente 326 Kg./h para atomización, una fracción para calefacción y la diferencia restante puede ser justificada como error propio del cálculo.

Análisis técnico-económico

Hasta aquí todo lo expuesto está basado en rendimientos térmicos de la instalación. Otra de las diferencias fundamentales entre la utilización de los distintos combustibles propuestos radica en los costos de generación.

Para este análisis tomamos como precio del combustible a los valores vigentes a la fecha de confección del informe.

$$Gas = 0,21 \$ / m^3$$

$$Fuel - oil = 1,205 \$ / Kg.$$

La comparación se hace para los parámetros de los días 18/5/07 (Fuel oil) y 06/04/07 (Gas natural) de igual generación de energía.

$$Costo_{gas} [\$ / MWh] = \frac{0,21 \$ / m^3 \times 8700 m^3 / h}{24,167 MW} = 75,6 \$ / MWh$$

$$Costo_{fueloil} [\$ / MWh] = \frac{1,205 \$ / m^3 \times 7733,3 m^3 / h}{24,167 MW} = 385,6 \$ / MWh$$

Podemos apreciar una vez más la conveniencia de la utilización de gas natural como combustible del turbogruppo, al margen del rendimiento térmico. Los costos de generación con el combustible líquidos se quintuplican con respecto al gaseoso. Destacamos nuevamente que la no utilización de este último esta fuertemente ligada a cuestiones de disponibilidad.

Los costos calculados se corresponden a los valores establecidos por CAMME S.A. a la fecha de cálculo.

Discusión

Se reconoce técnicamente que el rendimiento térmico, de grupos de vapor similares a los emplazados en planta, varía entre 30 a 35 %.

De acuerdo a los datos aportados por el fabricante se obtuvo que dicho rendimiento es levemente superior al 35 %. Esto nos da indicios de que el cálculo obtenido es una buena aproximación ya que podemos contemplar al turbogruppo dentro del rango reconocido.

Pero actualmente el TV N° 8, el cual fue estudiado, posee un rendimiento aproximado del 27 % lo cual no puede atribuirse a una pérdida de rendimiento por cuestiones de antigüedad.

Esto motivo al análisis de posibles fallas y el dato más representativo es el bajo vacío, prácticamente el doble de lo deseados que es de poco más de una pulgada. Esto indicaría una posible falla en la fuente fría, o sea el condensador. Puede ser que haya una entrada de aire en algún sector que opere con presión menor que la atmosférica. Esta es la teoría más fuerte, respaldada por experiencia, que justifica la gran disminución del rendimiento por lo que se estudiará inundar con agua el condensador en la próxima parada.

Otras de las teorías analizadas fueron la de maniobras incorrectas y la de baja calidad del fluido de trabajo, pero quedaron descartadas rápidamente. La primera debido a que se opera de la misma forma que cuando la maquina funcionaba correctamente y la segundo por los análisis químicos que se hacen para detectar la calidad del agua.

También fueron revisados los eyectores, los cuales son otras de las posibles fuentes d error, pero se comprobó su correcto funcionamiento y estado de las juntas calibradas.

Programación y seguimiento

Introducción teórica

Mediante la técnica de programación (planificación) se trata de ordenar las actividades, de un proyecto, de forma tal que se puedan apreciar las relaciones temporales lógicas entre ellas. Por lo tanto la programación consiste en fijar de modo aproximado, los instantes de inicio y terminación de cada actividad. Algunas pueden tener holguras y otras ser críticas.

La técnica de seguimiento es utilizada para verificar temporalmente el modo en que se están ejecutando las actividades, previamente programadas. Es de gran utilidad para toma de decisiones durante la ejecución del proyecto o bien al finalizar el mismo para hacer una comparación entre la situación estimada y la real.

Ambas técnicas se pueden plasmar en el software Microsoft® Project. Para esto se debe tener noción general de diagramas de Gantt, precedencia y de Red, Camino crítico e hitos.

La programación de un proyecto puede ser tan extensa como se quiera, pero su extensión va de la mano de la cantidad de controladores disponibles para realizar el seguimiento de la misma.

Diagrama de Gantt

Diagrama en el cual se permite visualizar la distribución temporal del proyecto, detallando las fechas de inicio y fin de las actividades que lo componen. Físicamente es un diagrama de barras bidimensional, donde las abscisas obedecen a tiempos y el eje vertical a las actividades.

Hito

Es un evento claramente verificable, el cual no posee duración en el tiempo sino que indica un instante en el mismo. Por ejemplo, instante de inicio de las actividades de mantenimiento.

Diagrama de Red

Red es la herramienta con que se vinculan actividades e hitos con el fin de reflejar sus dependencias.

Diagrama de Precedencias

Por naturaleza hay actividades que deben realizarse antes que otras, o sea, cada actividad condiciona el orden lógico de la secuencia a ejecutarse. Esto engloba el significado de precedencia. Por ejemplo, no se puede retirar el rotor de baja presión sin que se haya retirado la correspondiente tapa.

Camino Crítico

Es la sucesión de actividades (críticas) que da el máximo tiempo acumulativo y el más corto que se puede tardar en realizar el proyecto, si se dispone de todos los recursos.

Diagrama de tiempos con interdependencias.

De la conjunción de estos cinco conceptos se construyen diagramas de tiempos con interdependencias mediante la asistencia de software antes mencionado. Siendo el camino crítico el elemento de presión para la ejecución a tiempo del proyecto, sin descuidar los caminos con holguras puesto que pueden transformarse en críticos retrasando el proyecto más de lo pensado.

Los pasos básicos para la construcción del diagrama son los siguientes:

- 1- Listar todas las tareas.
- 2- Estimar duración de cada tarea y secuencia lógica.
- 3- Indicar hitos

Por último el software se encarga de graficar y realizar cálculos pertinentes.

Cálculo de camino crítico

A pesar que el cálculo lo realiza el programa de computadora, es de utilidad conocer sus cimientos.

Actividades	Duración
A	5 días
B	4 días
C	3 días
D	4 días
E	2 días
F	2 días
G	1 día

Proyecto compuesto por ocho actividades hipotéticas (Tabla 9). Llegado al paso 3, o sea finalizadas las actividades A y B se puede proceder con el inicio de las C y D. Dado que D es de duración mayor a C, se presenta holgura entre finalización de C y comienzo de F que es posterior a la secuencia D-E. En este ejemplo se aprecia que el camino crítico (Fig. 40) esta dado por la secuencia A-B-D-E-F-G, pues que no presenta holgura. La duración estimada de este proyecto es de 18 días.

Tabla 9. Actividades hipotéticas

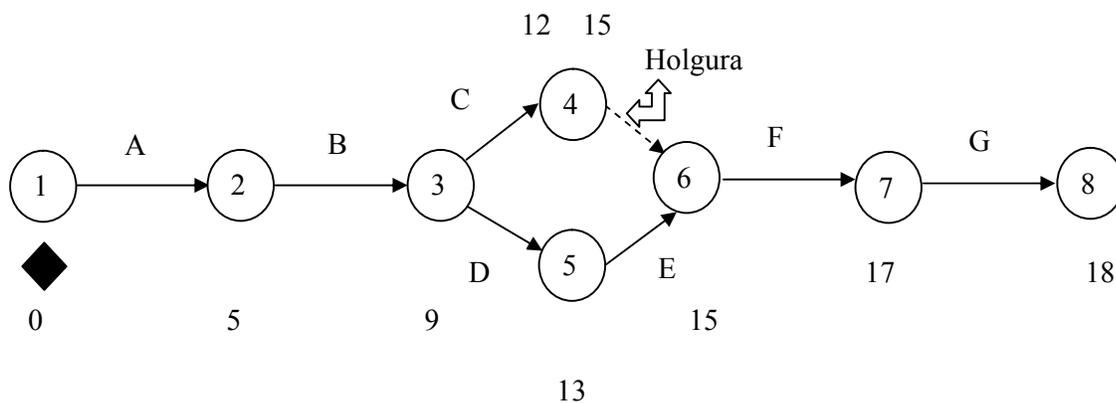


Figura 40. Cálculo de camino crítico

Recursos

Para realizar un proyecto se necesitan recursos los cuales consideramos totalmente disponibles. Esto no implica que puedan ser usados todos al mismo tiempo, puesto que todo proyecto tiene una secuencia lógica a respetar.

Un proyecto puede ser encarado de dos formas: con o sin superposición de tareas. Sin superposición de tareas implica que hasta que no termine una, no se comienza con la siguiente y así sucesivamente hasta concluir el proyecto. En el otro caso se superponen tareas, donde la naturaleza de las mismas lo permita, aumentándose la población que trabaja simultáneamente pero reduciéndose el tiempo de finalización del proyecto.

Como antes se menciona, el hecho de que aumente la población hace que disminuya el tiempo de finalización, pero la cantidad de horas hombres requeridas, en principio, se mantienen invariantes. La cuestión de incrementar la cantidad de personas para terminar rápidamente, tiene otro tope aparte de la secuencia lógica. Este otro lo determina la improductividad que causa la súper-población, donde parte de los ejecutantes tiene que ceder espacio a otros, quedando al margen de la actividad. El principal efecto de esto es la disminución de rendimiento y esto conlleva a que se requiera más cantidad de horas hombres sin ganancia en el tiempo de finalización.

Aunque en teoría la diferencia entre ambos casos es clara, en la práctica se debe analizar todas las variantes posibles y las condiciones impuestas para la selección del criterio de ejecución del proyecto.

Para apreciar esta situación se puede analizar, a modo de ejemplo, un proyecto compuesto por cuatro actividades (Tabla 10) que suman un total de 6000 Hh. Cada una de las actividades se subdivide a su vez en etapas. Por cada 1000 Hh se requieren 20 operarios.

	Etapas	Hh	Operarios
Actividad 1	2	1000	20
Actividad 2	4	2000	40
Actividad 3	2	1000	20
Actividad 4	4	2000	40
Total		6000	120

Tabla 10. Recursos requeridos por actividades

Si tomamos al proyecto sin superposición, este concluirá al cabo de doce etapas. Pero si lo queremos concluir al término de nueve etapas aparecerá aquel fenómeno. En las siguientes gráficas (Fig. 41) se visualiza la situación planteada.

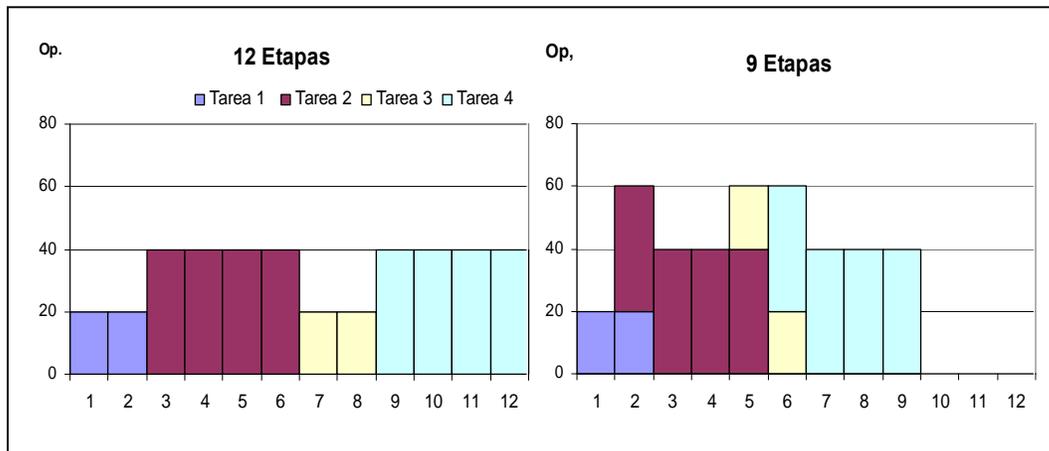


Figura 41. Comparación de proyectos según distribución de actividades

Donde hay superposición de tareas se aprecia que el período de finalización es menor con picos mayores pero el área por debajo de la curva, que representa la cantidad de Hh requeridas, se conserva invariante.

¿Qué es el Software Microsoft® Project?

Es Software Microsoft® Project es una de las herramientas incluidas en el paquete de Microsoft® Office el cual ofrece innovadoras características que facilitan sustancialmente la planificación, administración y comunicación de cada una de las fases de cualquier tipo de proyecto.

Establecido un proyecto se puede comparar la situación real con la original estimada, lo que sería llevar a cabo el seguimiento del mismo. Esto es de gran utilidad para el gerenciamiento de cambios con eficacia o bien futuras planificaciones.

Los informes se pueden personalizar en Calendarios, Diagramas de Gantt y de Pert. Consta de un poderoso administrador de recursos. También posee una gran variedad de herramientas que hacen a la fácil comprensión del proyecto como a la estética del mismo.

Mantenimiento programado

El mantenimiento que se hace sobre las turbinas de vapor es esencialmente preventivo, comúnmente denominado programado. No obstante presenta características de mantenimiento predictivo. La combinación forma parte de lo que se da a llamar "mantenimiento Científico". Los citados se definen de la siguiente manera:

- *Mantenimiento preventivo*: Son las inspecciones y trabajos de mantenimiento realizados periódicamente, obedeciendo a un programa cíclico, o según necesidad verificada por tales inspecciones a fin de evitar la materialización inesperada de fallas, averías o defectos operativos mediante acciones programadas de detección precoz y corrección oportuna, mientras las anomalías detectadas se encuentran todavía en estado de incubación comprobable. Las acciones típicas de este sistema son:

- Limpieza
- Ajustes
- Reaprietes
- Regulaciones
- Lubricación
- Cambio de elementos utilizando el concepto de vida útil indicada por el fabricante
- Reparaciones propias pero programadas

- *Mantenimiento predictivo*: Son los trabajos de mantenimiento cuya necesidad de realización se puede prever y programar en función del seguimiento (inspecciones) de parámetros de performance o mecánicos cuya tendencia de deterioro constituye un indicio que permite predecir la oportunidad en que los respectivos trabajos de corrección serán convenientemente necesarios desde el punto de vista técnico-económico. Las inspecciones pueden ser de dos tipos:

- 1) Monitoreo discreto: en el cual las inspecciones se realizan con cierta periodicidad, en forma programada
- 2) Monitoreo continuo: se ejerce en forma constante, con aparatos montados sobre las máquinas. Este tiene la ventaja de indicar la ejecución de la acción correctora, lo más cerca posible al fin de su vida útil.

Por medio del mantenimiento se supone asegurar que todo activo, en este caso el Turbogruppo, continúe desempeñando las funciones deseadas y la competitividad de la empresa por medio de:

- Asegurar la disponibilidad y confiabilidad planeadas de la función deseada
- Cumpliendo con todos los requisitos del sistema de calidad de la empresa
- Cumpliendo con todas las normas de seguridad y medio ambiente
- Al máximo beneficio global

Para un mejor estudio del mantenimiento de la turbina es necesario contar con los siguientes elementos indispensables:

- 1) Datos del fabricante del objeto y precedentes de mejoras en series posteriores
- 2) Manuales
- 3) Planos
- 4) Estándares de tasa de fabricación o servicio
- 5) Experiencia acumulada ya sea escrita o bien transmitida oralmente por el personal
- 6) Sugerencias de mejoras aportadas por los mismos, anotadas y estudiadas detenidamente

La periodicidad del "Mantenimiento Programado", también conocido como "Barrida completa", se mide en horas de funcionamiento de la turbina y equivale a 35.000 horas. Considerando un funcionamiento de servicio continuo aquel valor se traduce en 4 años. Pero en la práctica dicha cantidad de horas se cumple en un plazo de 5 años, esto se debe a que se realizan

paradas programadas para ejecución de tareas de mantenimiento en auxiliares o bien ensayos sobre la turbina misma.

Originalmente se programaban las tareas cada 50.000 horas de acuerdo a lo establecido por el fabricante. Con el tiempo se fue modificando este patrón hasta llegar al que se utiliza hoy en día. Una de las causas obvias es que con el transcurso del tiempo el desgaste se manifiesta con mayor intensidad por lo que la máquina requiere mayor atención; pero fundamentalmente la periodicidad se redujo por la dificultad del desmontaje de las partes que están sometidas a altas temperaturas. De esto último se desprende que si hipotéticamente pudiéramos predecir que la máquina no necesitara ajuste alguno igualmente se ejecuta el "Mantenimiento Programado".

El periodo conveniente, para la ejecución de este mantenimiento, indica una fecha de comienzo correspondiente al fin de la temporada veraniega (mediados de marzo) y una de finalización previa al inicio de la misma. Esto se debe a que en la temporada estival se registran los mayores valores de consumos energéticos y el compromiso es abastecerlo por lo que sería una decisión errónea que se planifiquen tareas para esa época.

Con respecto a la extensión del "Mantenimiento Programado" podemos afirmar que promedia los cinco a seis meses de trabajo con jornadas con horas extras. Este dato está basado en la experiencia obtenida a raíz del tiempo. No tiene en cuenta imprevistos mayores en la máquina o de recursos humanos.

Además del personal que aporta la mano de obra existe un punto fundamental que es la persona que liderará el proyecto, o sea el Jefe de Mantenimiento. El éxito o fracaso del proyecto le corresponde a todo el personal involucrado en forma directa o indirecta y no solo a dicho líder. Otra de las cuestiones a destacar es que no todo el personal de los distintos sectores se dedica exclusivamente a las tareas propias sobre la turbina, sino que también a trabajos sobre los distintos auxiliares y a las tareas periódicas del otro grupo (en servicio). En caso de que surja una escasez de personal se pueden utilizar recursos de otros sectores de mantenimiento como el correspondiente a Caldera y a Turbogas.

Previamente a la ejecución del mantenimiento se deben realizar una cantidad de tareas con el fin de evitar inesperados, durante su transcurso del mismo, que lleven a la dilatación de la finalización del mismo. A continuación se enumeran las más relevantes:

1. Verificar la disponibilidad de repuestos
2. Verificar la disponibilidad y correcto funcionamiento de equipos involucrados
3. Asegurar la disponibilidad del personal
4. Iniciar gestiones de los trabajos a contratar
5. Iniciar gestiones de compra de repuestos, herramientas y otras faltantes.
6. Sistematizar el mantenimiento mediante software
7. Delegar responsabilidades y confeccionar grupos de trabajo
8. Hacer análisis de costos del mantenimiento
9. Estudiar los resultados de las inspecciones de los parámetros de performance
10. Estudiar la realización de las tareas que poseen menor frecuencia de ejecución que el "Mantenimiento Programado"

Destacamos que todas las decisiones y acciones tomadas (y/o a tomar) deben ser aprobadas por gerencia de planta; para asegurar la ejecución del mantenimiento sin objeciones posteriores.

Para la sistematización del mantenimiento se debe tener en cuenta que las tareas están ligadas temporalmente por los trabajos sobre los cuerpos de AP y BP de turbina y el regulador. Se debe diagramar en paralelo las acciones sobre el alternador y la excitatriz, poniendo riguroso énfasis en el tiempo de utilización del puente grúa, puesto que al ser único es uno de los elementos críticos presentes. El proceso posee un punto de inflexión que es el correspondiente a la alineación de los ejes rotóricos de AP, BP y alternador. Una vez concluida esta actividad el personal eléctrico dispone del alternador en su totalidad para los trabajos predeterminados. A partir de este punto se trabaja en paralelo sobre todos los bloques de la máquina coordinado los grupos de trabajos y el puente grúa de forma tal de no cometer errores de superposición de estos recursos que conlleven la imposibilidad de la ejecución de las tareas.

Planificación del Mantenimiento Programado

Programación

Para la planificación fue elegida la versión 4.0, del ya citado software Microsoft® Project. No corresponde a la versión más reciente pero posee las herramientas deseadas para este fin.

Se planificó teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Jornadas laborales de 10 horas netas de trabajo; en el entorno del programa 1 hora equivale a "0,1 día"
- La unidad temporal elegida es el día puesto que la mayoría de los trabajos son de éste orden de duración
- El calendario utilizado corresponde a semanas de trabajo de lunes a viernes
- No se tiene en cuenta una fecha de iniciación ya que es un plan general del cual interesa su extensión estimada
- No se contemplan feriados dado que solo influyen en su extensión de acuerdo a cuantos sean tomados como no laborales durante el mantenimiento
- El entorno utilizado es el correspondiente a diagramas de Gantt
- Por cada tarea se abre una voz (fila)
- Se programa de acuerdo a la secuencia lógica (predecesoras), focalizándose en la asignación de recursos humanos y por sobretodo en el de la grúa
- Se programa también evitando superposición de tareas sobre un mismo sector de la máquina
- Para la asignación de recursos se eligieron las letras M, E y G correspondientes al personal mecánico, eléctrico y al operador de la grúa respectivamente
- No se hizo una subdivisión de cada recurso según categoría (montador, ayudante, etc.)
- En primera instancia se programó teniendo en cuenta los recursos sin utilizar las herramientas de gestión de los mismos
- Las herramientas de gestión de recursos se usaron al finalizar el proyecto para la corrección de posibles inconvenientes como sobreasignación

Además debemos resaltar que el proyecto en cuestión representa la situación general y estimada del mantenimiento que se realiza sobre las turbinas de vapor. Se desea que los resultados de un futuro seguimiento avalen en un ciento por ciento lo planificado. Por diversos motivos, programables o no, esta situación teórica no se va a cumplir en su totalidad. Pero esto no desmerece la planificación confeccionada puesto que es una buena aproximación de lo real que puede ser modificada durante el transcurso del mantenimiento. Esto se ve favorecido al gran dinamismo que posee el programa Project. Igualmente se debe tener cuidado al gestionar cambios dado que tareas no críticas pueden pasar a serlo; o se puede producir superposición de tareas que conlleven a inconvenientes como falta de personal y/o equipos; o bien problemas de improductividad.

Para una mejor comprensión detallaremos fragmentos del programa confeccionado.

La ventana de trabajo esta comprendida por dos secciones. Una izquierda (Fig. X) la cual posee columnas y filas, como las que contiene el conocido programa Excel, destinadas para la

información del proyecto; y una derecha (Fig. 42) donde se visualiza el diagrama de Gantt correspondiente, el cual se construye automáticamente a partir de la información ingresada. Generalmente el programador lo acondiciona de acuerdo a la información, escala temporal y colores que desee visualizar en el diagrama.

Cada fila representa una tarea y a esta se le asignan columnas de acuerdo a la información de conveniencia elegida por el programador. Para ejemplificar dicha situación tomamos la tarea de la fila N° 44: “Aflojar bridas de cañerías (x4) – entrada vapor”. Esta tiene una “Duración” de 2 días (20 horas), debe ser llevada a cabo por dos integrantes del personal mecánico, según se aprecia en la columna “Nombres de los recursos”, lo que se traduce en un costo equivalente a 40 horas-hombres.

En la columna “predecesoras” se ingresa el/los número/s de las tareas que deben concluir para poder comenzar con la tarea en cuestión. Esto significa que no se pueden aflojar las bridas hasta que no se retiren los restos de aislamiento de los cuerpos de AP y BP como lo establece la tarea (fila) N° 10.

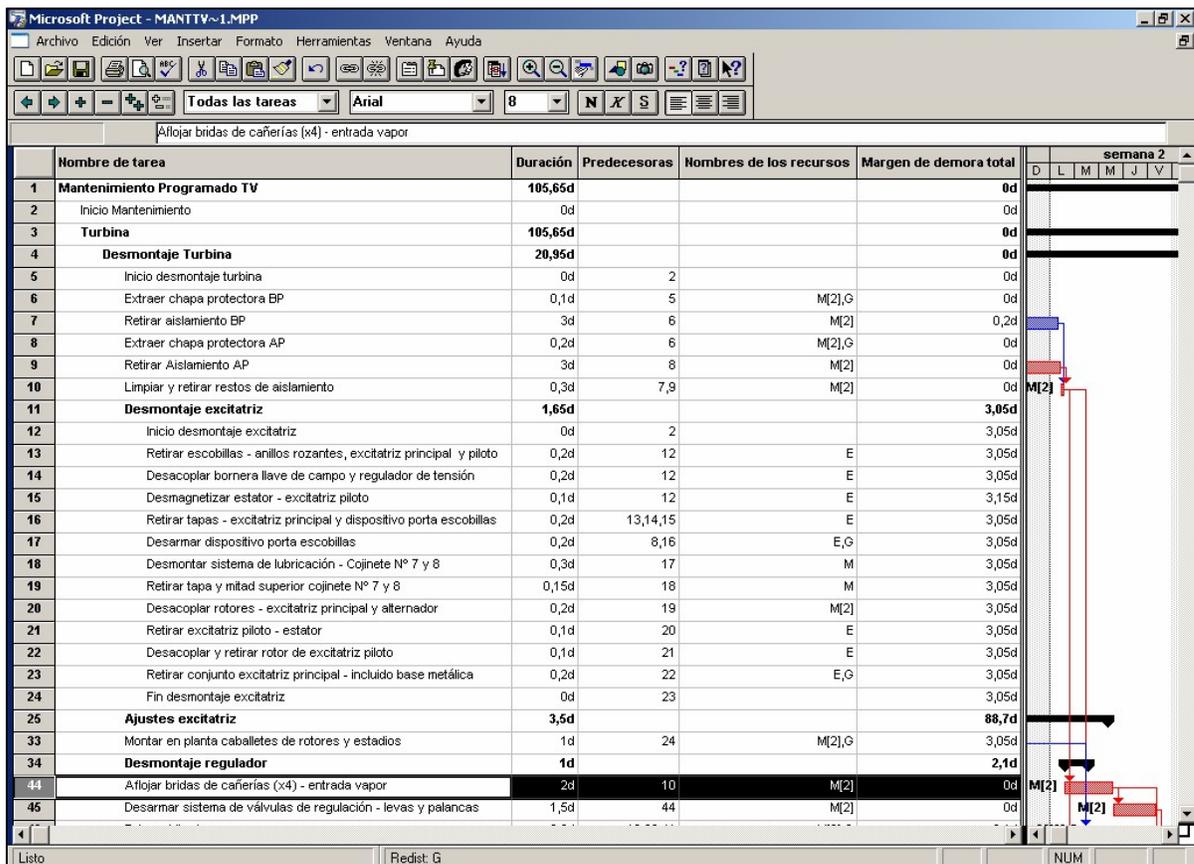


Figura 42. Área de Trabajo – Detalle ingreso de tareas.

La última columna elegida es la de “Margen de demora total”. Dicha demora es calculada por el programa y se expresa en días. Expresa la cantidad de días que se puede demorar el comienzo de la ejecución de la tarea en cuestión. La certeza en el cálculo depende de la correcta vinculación de todas tareas. En el caso de la tarea N° 44 dicho margen es nulo por lo tanto es de carácter crítico. Se entiende que si el tiempo estipulado de duración es excedido, durante su ejecución, se va a reflejar en una dilatación del proyecto de ese lapso.

Hay tareas que conglomeran un grupo de tareas, por ejemplo: “Desmontaje excitatriz” correspondiente a la fila N° 11 (Fig. 42). Esto se hace ante la necesidad de hacer una descripción más minuciosa de dicha actividad. Hay que tomar el recaudo de colocar hitos de inicio y fin para poder vincular a la misma con el resto del proyecto. Esto se debe a que este tipo de tareas (resaltadas en negro) no necesitan el ingreso de la información correspondiente al resto de las columnas utilizadas, ya que el programa se encarga de colocarla automáticamente, por ende deben estar correctamente “Linkeadas” (unión entre tareas) a fin de evitar errores.

Retomando a la sección destinada al área destinada para el trazado del diagrama de Gantt (Fig. 43) de nuestro proyecto se eligió la escala temporal en semanas de trabajo sin destacar fechas por ser el proyecto de carácter general. Se optó por discriminar las tareas de acuerdo a su criticidad, en azul barras de tareas con holguras y en rojo tareas críticas. A la izquierda de cada barra se dispuso el tipo y cantidad de recursos de cada tarea. Los hitos se identificaron con rombos negros. Y las tareas que agrupan a otras se caracterizaron con barras negras.

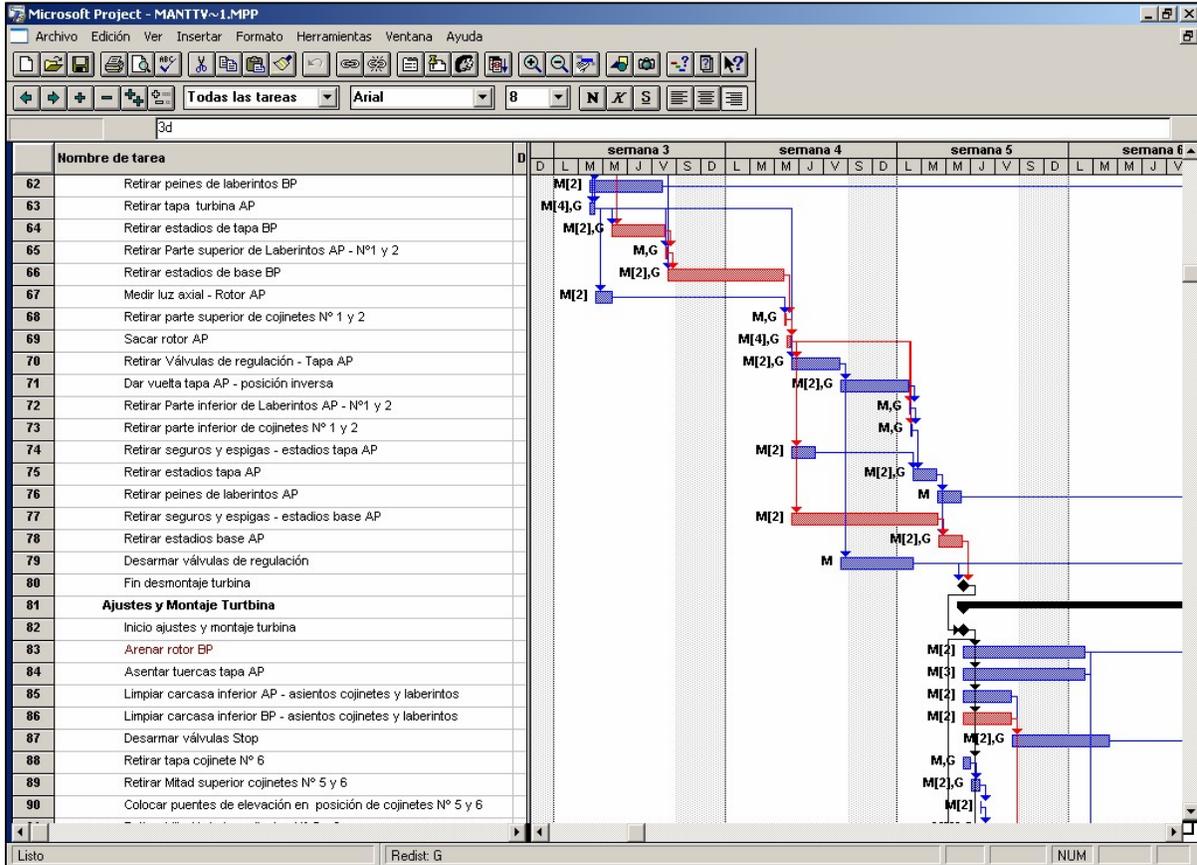


Figura 43. Área de Trabajo – Diagrama de Gantt

Existen varias columnas de gran utilidad que por no ser necesario o no aplicar en este proyecto se ha descartado su uso. Igualmente citamos algunas de ellas: *Comienzo* y *Fin* de cada tarea; *Tareas Críticas* indica la condición de criticidad de cada tarea; Columnas varias de *Costos* y *Seguimiento*; y otras tantas.

Otra de las herramientas es la utilizada para la asignación de recursos (Fig. 44). Debe definirse previamente el nombre y la cantidad máxima disponible de los mismos. Una vez hecho esto se debe asignar recursos tarea por tarea colocando la cantidad cada uno en la columna unidad del cuadro de asignación.

Para la gestión de los recursos existen tres ventanas de gran utilidad: gráfico de recursos, hoja de recursos y uso de recursos.

La ventana “gráfico de recursos” (Fig. 45) otorga información por defecto de la cantidad de cada recurso utilizada por día y los discrimina según estado se asignación (asignado y sobreasignado). Dicha cantidad corresponde a la máxima que se utilizará al mismo tiempo durante

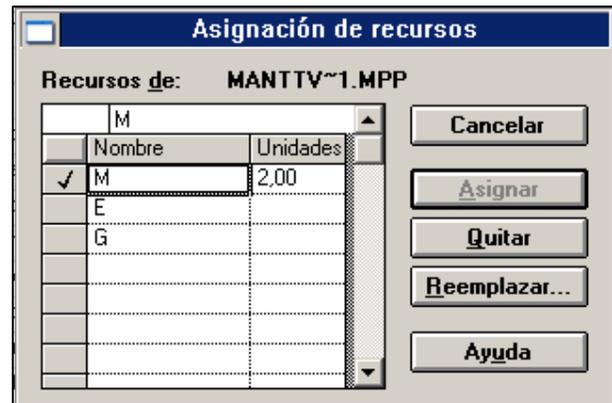


Figura 44. Asignación de recursos.

el día. Por ejemplo, el primer día de trabajo se requerirán cinco integrantes del grupo conformado por los mecánicos. Puede ser que solo requiera de estos durante una sola hora y el resto del día se precise menos, pero de antemano se sabe que en algún momento se necesitarán cinco. Esto no quita que ante la disponibilidad se destinen más recursos pero siempre poniendo énfasis en la improductividad. También puede graficarse variantes como costos, trabajo acumulado entre otros.

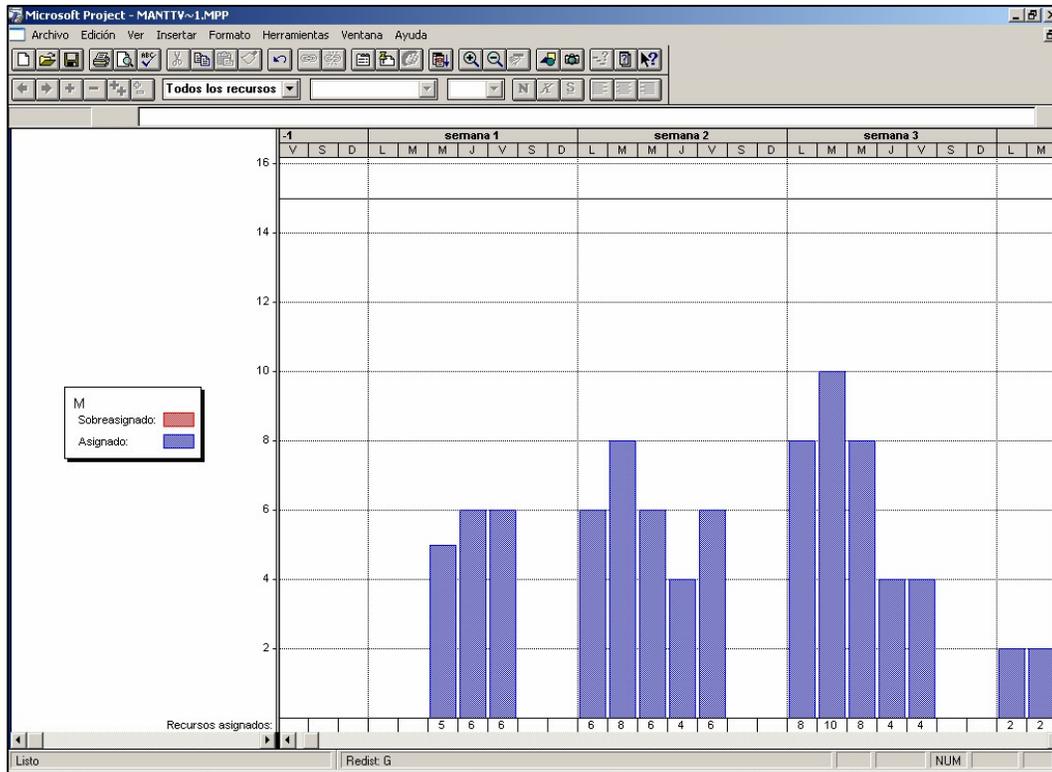


Figura 45. Grafico de recursos

La ventana “uso de recursos” (Fig. 46) brinda la información del total de horas que sumaran los recursos durante el día; lo que es conocido como Horas/Hombre. Siguiendo el ejemplo anterior en el primer día dicho valor asciende a las 42 horas (4,2 días). De este valor se deduce que las cinco personas, que se precisarán ese día, no estarán abocadas exclusivamente al mantenimiento de la turbina dado que en este caso el valor seria de 50 horas. Pueden detallarse en este tipo de tablas las mismas variantes que en la ventana “gráfico de recursos”.

Nombre del recurso	Trabajo	Semana 1							Semana 2							Semana 3					
		L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J		
1 M	529,3d			4,2d	5,15d	5,3d			3,8d	6,6d	4,8d	4d	5,2d					6,4d	8,4d	5,5d	4d
2 E	88,2d			0,9d	0,95d	1d			1d	1d	0,15d										
3 G	81,35d			0,5d	0,55d	0,65d			0,2d	1d			0,9d					1d	0,9d	0,95d	1d
4																					
5																					
6																					
7																					
8																					

Figura 46. Uso de recursos

La ventana “Hoja de recursos” no fue tenida en cuenta para este proyecto. Posee un formato similar a la de “Uso de recursos” pero difiere en su funcionalidad. La misma se utiliza básicamente para el cálculo de costos.

Discusión

Terminado el proyecto, a pesar de que se programó haciendo hincapié en los recursos, cuando se recurrió a la utilización de las herramientas de gestión de estos y se encontró el mencionado problema de sobre-asignación (Fig. 47).

El inconveniente se presentó en el personal mecánico y la grúa. Mediante una redistribución manual corrigió esto. La consecuencia principal es el aumento de la duración total del proyecto.

Los recursos humanos no presentan mayores problemas de redistribución, en cambio, como se consta de una sola grúa se hace más dificultosa la coordinación requerida para su uso. El proyecto final quedo con algunos días con sobre-asignación del recurso grúa pero se decidió dejarlo así. Esto se justifica por el hecho de que hay tareas que precisan la grúa en un porcentaje de su duración total y como no se programo aisladamente en función a los movimientos de la grúa el programa no tiene la posibilidad de discernir en que porcentaje de cada tarea se utiliza la misma. Por este motivo no se utiliza la herramienta de redistribución automática brinda el programa. Ésta redistribuye de forma tal que elimina la sobreasignación pero extiende el proyecto más de lo estimado. Destacamos que no es un error propio del programa sino es una opción de programación elegida concientemente dado que si se aislaran las tareas correspondientes a los movimientos de la grúa aumentarían significativamente la cantidad de veces extendiéndose el proyecto con información que excede los propósitos buscados.

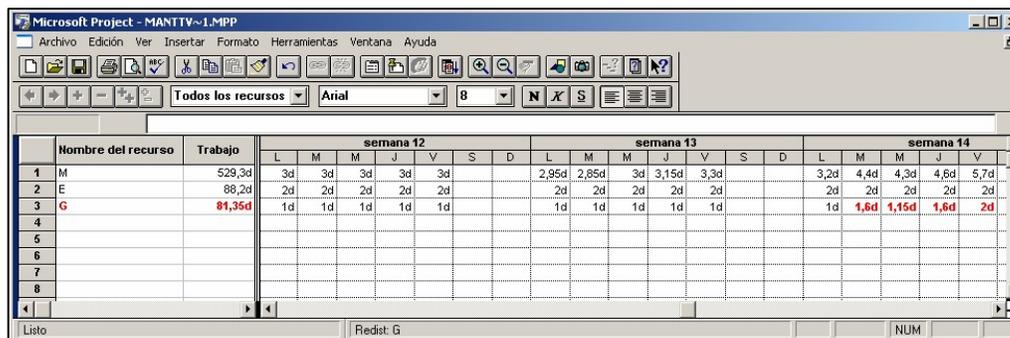


Figura 47. Uso de recursos – Sobreasignación de grúa

Como ejemplo citamos la tarea que involucra “Montar definitivamente mitad superior cojinetes N° 3 y 4” la cual dura dos horas y media de duración. En este caso la grúa se precisa la disponibilidad de la grúa durante 30 minutos. Si quisiéramos se podría dividir la tarea en varias voces ya que el montaje implica limpieza, apriete y traslado en grúa pero se prefiere aunar todas en una sola tarea dado que se entiende lo que implica dicho montaje.

Resultado final

El proyecto del “Mantenimiento Programado” resultante posee las siguientes características:

- Duración equivalente a 106 días (1060 horas) hábiles de trabajo
- Período equivalente a 21 semanas consecutivas de trabajo
- Desmontaje turbina 21 días
- Su descripción consta 287 voces
- 5269 horas neta de recursos mecánicos – asignación máxima □ 15 M
- 882 horas neta de recursos eléctricos – asignación máxima □ 4 E
- 801 horas neta de utilización de grúa
- Extensión física equivalente a 66 (11 x 6) hojas A4 □ escala temporal al 200 %

Nota: Se anexaran fragmentos del proyecto al final del informe. La extensión total se entrega en formato digital por cuestiones de comodidad de manipulación.

Descripción de tareas

Se describirán algunas de las tareas, realizadas durante el “Mantenimiento Programado” sobre las turbinas de vapor. Cabe aclarar que las elegidas no todas corresponden a las de mayor duración ni las más complejas ni críticas sino las que a nuestro criterio son las más relevantes para el presente informe. Así, dicho capítulo no pretende citar la totalidad de las tareas que se efectúan durante dicho mantenimiento. La descripción es de carácter cualitativa asumiendo que los tiempos de duración y los recursos necesarios están establecidos en el entorno del Project.

Se discernirán los trabajos correspondientes a cada uno de los cuatro bloques componentes del grupo, es decir: Turbina, Regulador, Alternador y Excitatriz.

Turbina

Dispuesta la máquina para la ejecución del mantenimiento se comienza las tareas pertinentes en forma secuencial, agrupando al mismo en cuatro grandes grupos: desmontaje, ensayos, ajuste y montaje.

Se comienza por el desmontaje de las tapas protectoras de los cuerpos de AP y BP para luego retirar todo el aislamiento térmico de los mismos. Finalizada esta tarea, nunca antes, se procede al desarme completo de sendos cuerpos y del bloque de maniobras. Este proceso implica el desmontaje de sistema virador; tapa de cola y base media; sistema de levas; válvulas de regulación; válvulas "Stop"; tapa de AP y BP junto a los respectivos estadios; rotores de AP y BP previamente desacoplados; cojinetes N° 1, 2, 3 y 4; cajas de sellos laberínticos; estadios de bases BP y AP.

A medida que se va desarmando la turbina se lleva a cabo la limpieza y arenado de los elementos disponibles de acuerdo a la prioridad. En primera instancia se debe limpiar asientos de cojinetes para poder realizar el ajuste con apriete a los mismos y se debe arenar rotores de BP y AP. Esto está motivado en que se debe alinear, lo antes posible, los ejes de AP, BP y alternador para que quede disponible este último a efectos de proceder a su desmontaje.

Al mismo tiempo se prosigue con el arenado de estadios, tapas y laberintos. Este es uno de los requerimientos para poder hacer los ensayos no destructivos (END). Finalizados estos los rotores quedan disponibles para ser balanceados, tarea que no es posible obviar dado que en ellos se manifiesta mayoritariamente el desgaste propio de las horas de funcionamiento.

En paralelo se realizan controles dimensionales de los estadios para cuando sean montados poder interpretar correctamente la lectura de los comparadores. Esta etapa de alineación corresponde a la que se ejecuta sin los ejes correspondientes. Para esto se utiliza un sistema de eje postizo elevadamente ingenioso. El mismo se centra a los cojinetes, ya alineados, para con esto poder centrar carcasa de AP y todos los estadios.

Lograda la alineación final se procede al montaje definitivo de los cuerpos de AP y BP, base media y de cola; y bloque de maniobras. Este último paso no se ve afectado por las tareas que se estén ejecutando sobre el alternador y el bloque excitatriz.

Las tareas no tenidas en cuenta, en el presente informe, para una descripción detallada, se nombraron sólo a efecto del seguimiento secuencial de las tareas que se efectúan, para así arribar a la descripción detallada de las tareas seleccionadas. De esta manera se pondrá énfasis en la descripción de las siguientes tareas:

- Medición de diámetro de cojinetes
- Ajustes cojinetes
- Alineación de Rotores
- Medición diafragmas de AP y BP
- Alineación de "eje postizo"
- Apriete espárragos de tapa AP y BP
- Balanceo de rotores
- Ensayos no destructivos (ENDs)

Cabe aclarar que ha medida que se extiende el "Mantenimiento Programado" de la turbina, se realizan en forma progresiva los ensayos no destructivos sobre cada uno de los componentes principales que requieren la verificación de su vida útil y/o reparación o reposición.

Medición de diámetro de cojinetes

La medición se realiza con micrómetro para interiores (Fig. 48). El diámetro vertical se mide en forma directa; y el horizontal se realiza tomando dos mediciones cruzadas y simétricas respecto de la superficie de contacto, para luego calcular dicho diámetro a través del promedio de éstas. Esto está motivado en el hecho de que si se midiera horizontalmente, el instrumento apoyaría sobre la superficie de encastre de las dos mitades del cojinete y en consecuencia sería difícil tomar una medida correcta.

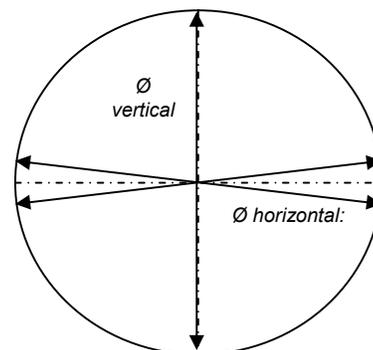


Figura 48. Medición diámetro de cojinetes

Se debe tener en cuenta el carácter de “limón” que poseen los cojinetes, sabiendo que el huelgo vertical existente entre el cojinete y el gorrón es 0,15 % del diámetro de éste último, y el horizontal sea de 0,4 %, como se explicó con antelación.

Ajustes cojinetes

Previamente a la primera etapa de alineación se deben hacer ensayos no destructivos sobre los cojinetes N° 1 al 6 como tarea prioritaria. Lo mismo debe hacerse sobre los dos restantes pero puede dejarse para cuando se hagan los ensayos sobre rotores, estadios y demás. Se destacan los siguientes ensayos:

- Tintas penetrantes: se efectúa sobre la superficie del material antifricción para analizar posibles fisuras.
- Ultrasonido: el objetivo es detectar discontinuidades en el volumen del material antifricción y verificar la correcta adherencia de este con el material del cuerpo del cojinete.

De encontrarse desvíos se puede remetalar (renovación del material antifricción) el cojinete o bien reemplazar por uno de reversa dispuesta en almacén. El proceso de remetalado demanda alrededor de una semana de trabajo por lo que puede resultar conveniente elegir esta opción debido a cuestiones de asentamiento del cuerpo del cojinete. La consecuencia directa es la reprogramación de las tareas de mantenimiento teniendo en cuenta los recaudos ya conocidos.

Sobre los cojinetes se hacen también dos tipos de ajustes relacionados con el apoyo:

1. Ajuste de asientos de cojinetes – anterior a alineación
2. Ajustes de apoyo de ejes sobre cojinetes – posterior a alineación

El primero esta relacionado con el apoyo de los “panes” sobre su respectivo asiento en los cuerpos de las turbina o pedestales según sea el caso. Para esto, una vez retirado el cojinete se hace la limpieza del mismo, de su asiento con tela esmeril y solvente Stodard. Se pintan el asiento con tinta “Azul de Prusia” y se monta nuevamente el cojinete con el apriete correspondiente. Luego es retirado para verificar la huella inscripta sobre los “panes”. De acuerdo a esto se debe colocar, quitar o dejar los suplementos según corresponda.

Para el segundo se debe tener montado con apriete los cojinetes y el respectivo rotor. Los gorriones deben ser pintados previamente con azul de prusia. Se gira el eje una vuelta aproximadamente, en seco (sin lubricación), para marcar el metal antifricción de cada uno de los cojinetes. Un buen apoyo corresponde a una fina línea recta con un espesor de unos 40 mm que abarque por lo menos un 70 % de la longitud del cojinete (Fig. 49) marcada en la parte inferior del metal blanco.

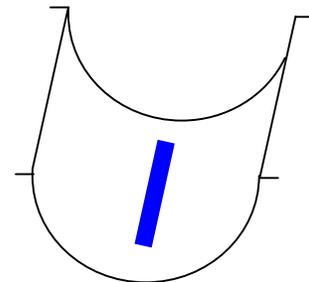


Figura 49. Apoyo aceptable

Puede suceder que el apoyo tenga una longitud menor a la mínima o haya diferencias en el ancho. Esto se corrige con el uso de rasqueta trabajando sobre la zona marcada.

Otro caso que puede presentarse corresponde a un apoyo de ancho y largo correcto pero con remoción excesiva del metal blanco. Esto se lee como un apoyo tal que el gorrón se hunde en el cojinetes acarreado un aumento del diámetro vertical (Fig. 50). Si este no esta fuera de medida se puede trabajar con rasqueta.

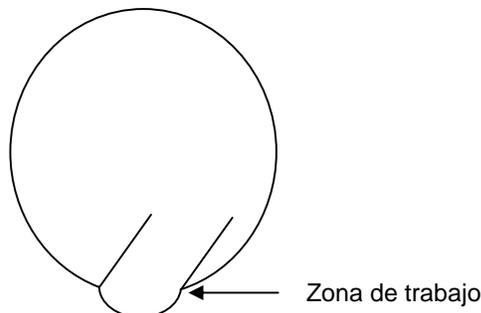


Figura 50. Perfil de apoyo incorrecto

Alineación de Rotores

Para la alineación de los ejes AP, BP y del alternador se procede de la siguiente manera:

1. Se considera al eje AP como el eje de referencia debido a las restricciones radiales y axiales impuestas por el engranaje de la bomba mecánica de aceite (IMO).
2. Desacoplados los respectivos ejes, con sus cojinetes montados y debidamente apretados, se colocan topes en eje BP y del alternador para evitar el desplazamiento axial producto de los giros realizados durante el proceso de alineación. Hay que recordad que estos dos ejes no poseen cojinetes de empuje axial, a diferencia del eje de AP. El apriete de los cojinetes es tal que al hacer esto el eje baje una centésima de milímetro registrada por medio de comparador (Fig. 51).



Figura 51. Comparador.

A partir de este ítem solo tendremos en cuenta la alineación que se realiza entre los ejes de AP y BP, dejando de lado el rotor del alternador debido a que el procedimiento es idéntico.

3. Se colocan tres comparadores: dos axiales y uno radial; las respectivas bases magnéticas se apoyan, por conveniencia, sobre la brida del eje que se van a modificar los suplementos de los cojinetes y el vástago móvil del instrumento se apoya sobre la brida del otro eje (Fig. 52). Los comparadores axiales se ubican separados entre sí a 180° mientras que el radial a 90° de aquellos.

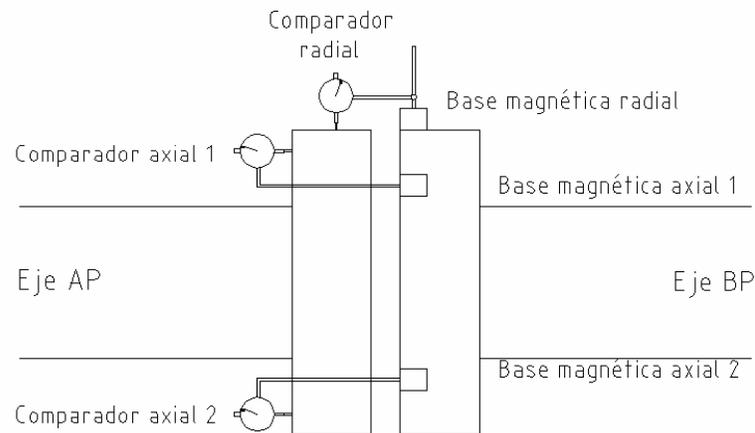


Figura 52. Posición de comparadores sobre brida de acople eje AP

4. Se giran los ejes, desacoplados, hasta que coincida el punto de referencia inscripto en cada una de las bridas de acoplamiento. Este punto indica la correcta posición relativa de acople de ambos ejes. Todo movimiento de giro debe ser realizado con la asistencia de la bomba principal de aceite y de la levanta eje.
5. Se acoplan con guía y se cargan los comparadores una cierta cantidad de vueltas, o sea milímetros (generalmente 3 mm) y se coloca la aguja de la escala centesimal en cero. Se gira de a un cuarto de vuelta y se registran los valores obtenidos en los instrumentos (Fig. 53). Al mismo tiempo se verifica el libre desplazamiento de dicha guía.

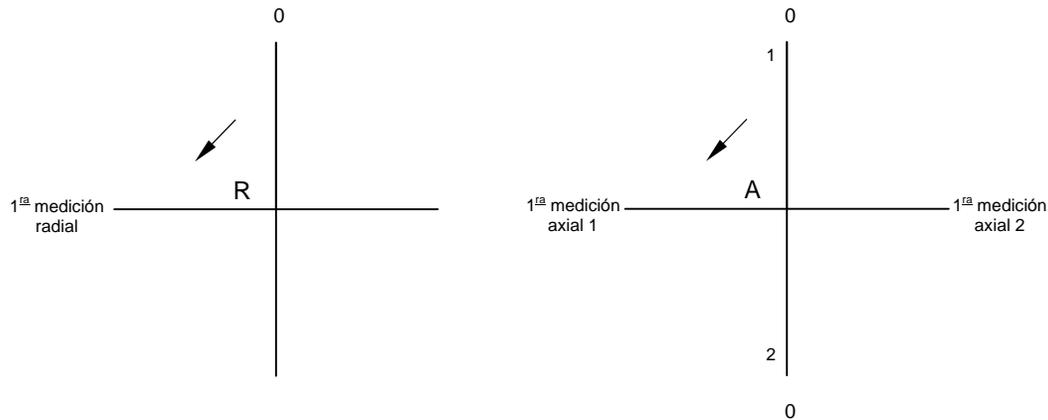


Figura 53. Valores medidos en el primer giro cuarto de vuelta

6. Se giran los ejes otro cuarto de vuelta y se registran nuevamente los valores en los comparadores.
7. Se repite este procedimiento hasta completar una vuelta completa, es decir dos cuartos de vuelta más. Al finalizar, en el comparador radial se debe leer la misma lectura de la cual se inicio el procedimiento. Caso contrario se deben repetir las mediciones puesto que esto da lugar a sospechar que se movió el comparador o se incurrió en algún otro error. Con respecto a los comparadores axiales es posible que no retomen el valor de inicio y esa diferencia se justifica en el posible corrimiento del eje.
8. Se obtienen finalmente los valores del giro completo (Fig. 54)

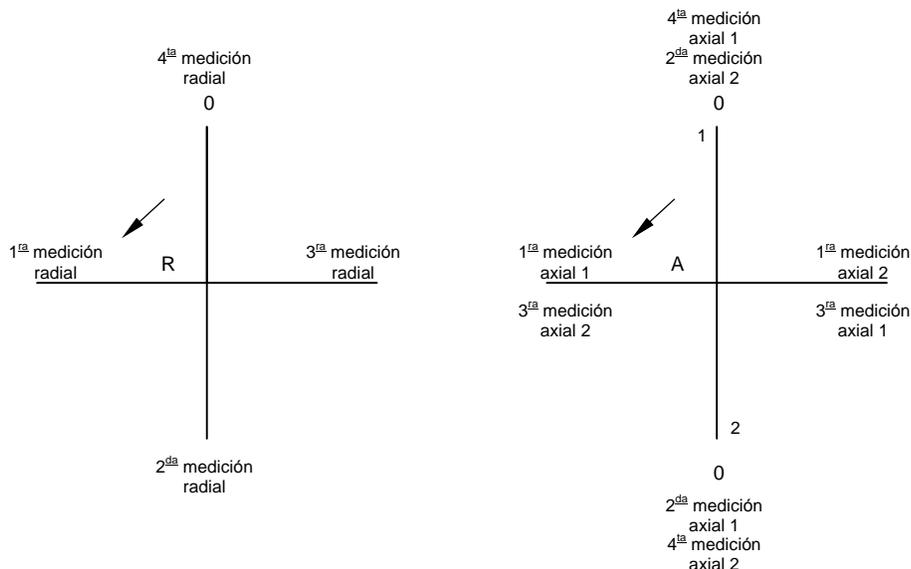


Figura 54. Valores medidos por los comparadores en una vuelta completa

9. Se realizan los promedios de las mediciones axiales. Esto está motivado en que al girar los rotores se verifica un desplazamiento axial a pesar de la existencia de los topes. Promediando dichos valores se elimina la fuente de error que presentaría la medición con un único comparador en posición axial.
10. Entre los puntos opuestos, se toma como el cero de referencia el menor (con su signo) y se hace la diferencia entre su opuesto y el mismo, obteniéndose la desalineación radial y axial del eje. De esta forma se logra trabajar con valores positivos, para omitir el signo negativo que puede dificultar la interpretación de los valores registrados.
11. Se analizan los datos conociendo la tolerancia de desalineación: 0,05 mm en el radial y 0,01 mm en el axial. En este último caso se busca que la desalineación sea lo menor posible o casi nula.
12. Para la corrección de la alineación se realizan cálculos trigonométricos. Con estos se obtienen las modificaciones requeridas a efectuar sobre suplementes de cada uno de los panes de los cojinetes. En el horizontal no se agregan ni se quitan suplementos sino que se intercambia la posición de los mismos entre cada "pan", para no alterar el apoyo de estos a sus respectivos asientos. En el vertical el trabajo es distinto ya que se agregan o quitan suplementos según requerimiento.

Cálculos trigonométricos

Los cálculos utilizados para la alineación de los ejes tienen sus bases matemáticas en la trigonometría. Sólo tienen validez para pequeños ángulos, lo que equivale a decir que:

$$\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$$

Se considera al eje a corregir compuesto por tres líneas rectas (1 eje + 2 bridas) el cual puede "pivotar" en dos puntos correspondientes a sus respectivos cojinetes. Debido a las hipótesis adoptadas, este cálculo es una aproximación de la realidad, aunque presenta una elevada precisión, obteniendo resultados satisfactorios, avalados en el tiempo.

Como guía se cuenta con un esquema de los parámetros involucrados: distancias, radios de bridas, desalineación axial y radial. El mismo se utiliza para correcciones en el plano horizontal y el vertical. En esta oportunidad detallamos el esquema correspondiente al rotor BP (Fig. 55) tomando como "pivote" al cojinete N° 3.

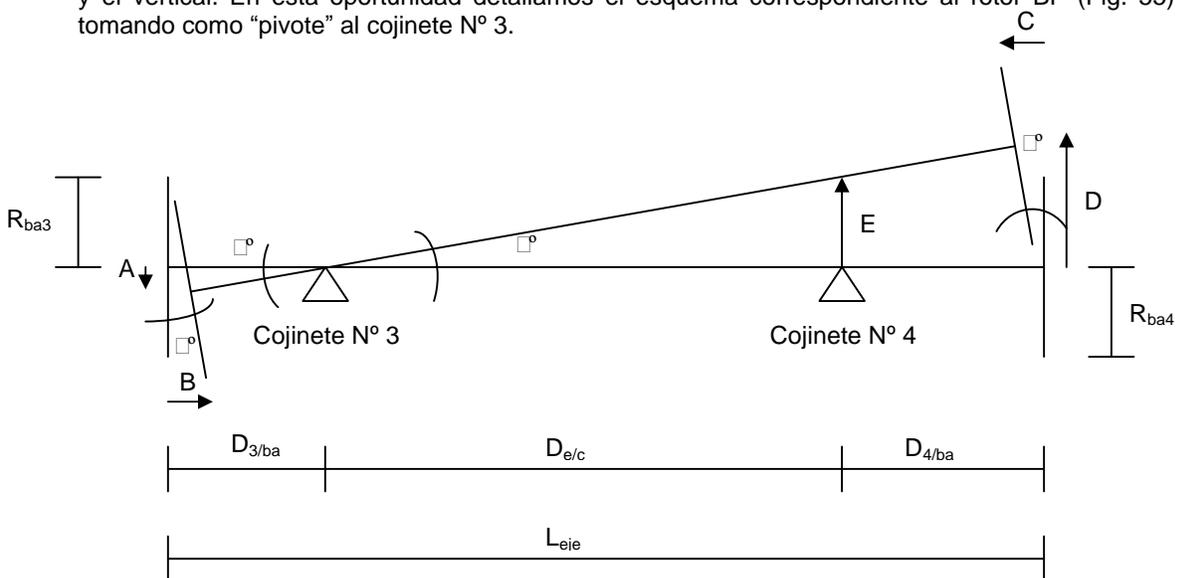


Figura 55. Cálculos trigonométricos para alineación

De aquél deriva la siguiente expresión matemática:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{E}{D_{e/c}} = \frac{D}{D_{e/c} + D_{4/ba}} = \frac{A}{D_{3/ba}} = \frac{B}{R_{ba3}} = \frac{C}{R_{ba4}}$$

Donde:

Variables de alineación	Dimensiones necesarias - Rotor BP
• A □ diferencia radial brida 3	• $D_{e/c}$ = 3260 mm □ distancia entre cojinetes
• B □ diferencia axial brida 3	• $D_{3/ba}$ = 675 □ distancia cojinete N° 3 a brida
• C □ diferencia axial brida 4	• $D_{4/ba}$ = 870 mm □ distancia cojinete N° 4 a brida
• D □ diferencia radial brida 4	• R_{3ba} = 200 mm □ radio brida acoplamiento 3
• E □ modificación cojinete	• $R_{4/ba}$ = 240 mm □ radio brida acoplamiento 4
• □ □ ángulo de desvío	• L_{eje} = 3935 mm □ longitud eje BP

La utilización de la expresión implica establecer en cuanto se desea corregir la desalineación, o sea manipulando las variables A, B, C y D, las cuales fueron obtenidas por medio de los comparadores. Con esto se calcula el valor E, o sea, en cuanto se deben modificar los suplementos de los cojinetes. Es muy probable que este último número no corresponda a un espesor de suplemento estandarizado. Por este motivo se debe seleccionar una chapa de espesor conocido y cercano a dicho valor - E - para luego calcular los efectos que produce la utilización de ésta sobre las primeras variables. La alineación no sólo implica modificaciones sobre un sólo cojinete, por lo que se debe repetir el procedimiento usando como pivote el otro cojinete. Los movimientos son lineales, por lo que utilizando el principio de superposición se puede trabajar sobre sendos cojinetes por separado, para después verificar el efecto final óptimo sobre en el posicionamiento del eje. A esta condición se llega a partir de sucesivas iteraciones realizadas para encontrar la mejor combinación de suplementos a fin de cumplir con las tolerancias establecidas.

La variantes se analizan a través de planilla de cálculo (Excel) diseñada por el Jefe de Mantenimiento" la cual posee los parámetros dimensionales de cada uno de los ejes.

Por último destacamos dos cuestiones: la conveniencia de fijar, en principio, valores nulos de desalineación axial y luego analizar el efecto sobre los parámetros radiales. Esto se justifica por el hecho de que las diferencias axiales se manifiestan con mayor intensidad de vibraciones en régimen de funcionamiento.

EJEMPLO: Alineación Rotor BP de Turbina de Vapor N° 7 correspondiente al 15/06/2007

1. Se comenzó presentando los tres comparadores sobre la brida de acople de los ejes AP – BP con la base magnética apoyada en este último. Se realizó una precarga de 3 vueltas (3 milímetros) sobre los mismos.

Nota: El lenguaje utilizado se traduce en centésimas de milímetro.

2. Siguiendo el procedimiento explicado se obtuvieron, luego de una vuelta completa, todas las mediciones necesarias (Fig. 56) para verificación del grado de desalineación. Claramente queda apreciado que el comparador radial y el axial N° 1 retornaron a su valor inicial, mientras que el axial N° 2 sufrió una variación de una centésima de milímetro.

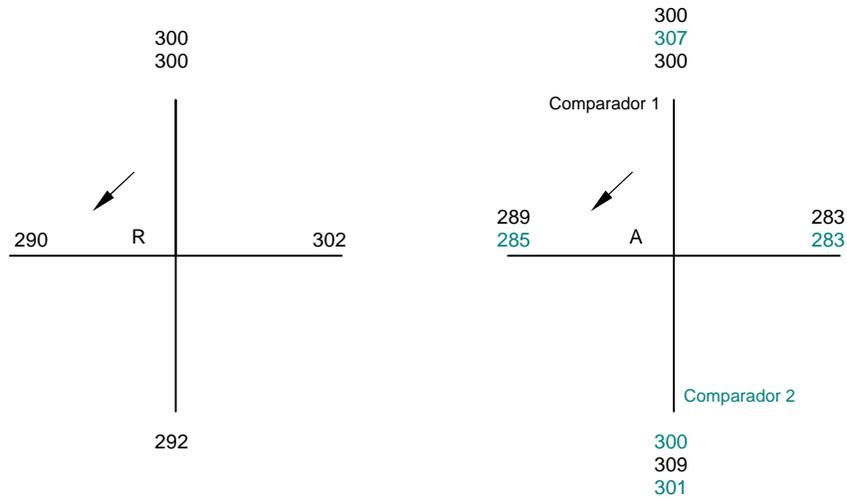


Figura 56. Valores medidos por los comparadores en una vuelta completa

- Se realizaron los promedios de los valores obtenidos, por cada comparador axial, correspondiente a los extremos de la cruz (Fig. 57).

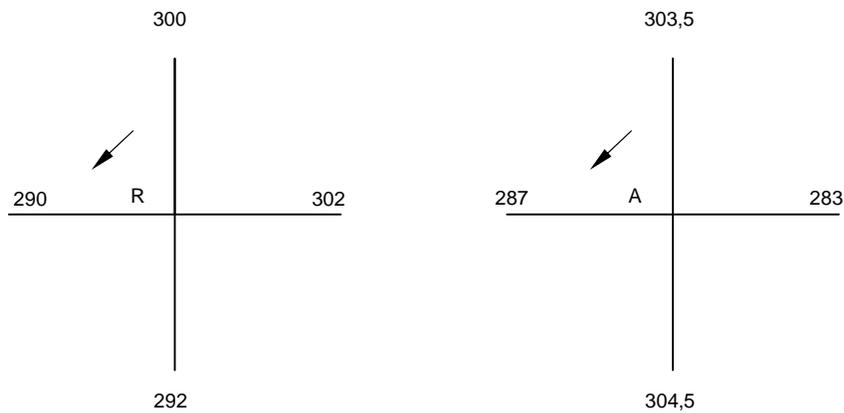


Figura 57. Promedios obtenidos

- Se tomó como referencia el menor de los dos valores y se calculó la diferencia entre su opuesto y aquél (Fig. 58), con lo cual se llegó a la desalineación final relativa entre los ejes.

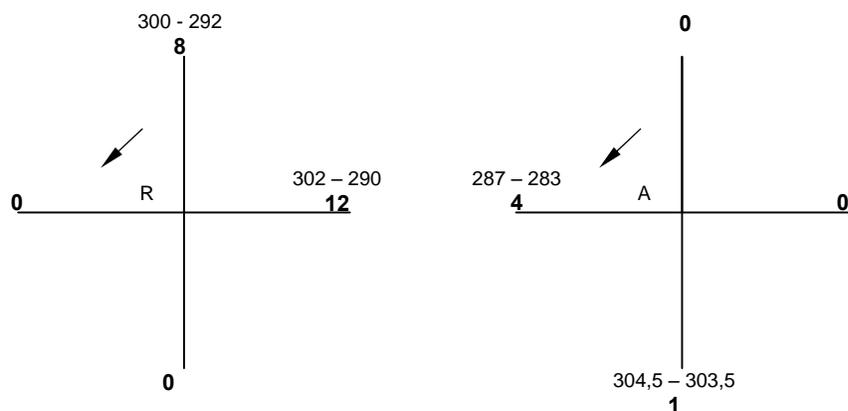


Figura 58. Posición final relativa de los ejes

Una vez que se obtuvieron dichos valores finales se procedió a la interpretación de los resultados obtenidos. Para ellos se tuvo en cuenta el extremo sobre el cual se apoyaron los vástagos móviles de cada comparador, de manera de conocer la condición de carga o descarga de los mismos según el lado sobre el cual se encontraba apoyado, y así deducir la orientación relativa de los ejes.

5. Conociendo éstas variables, se interpretaron los valores obtenidos de la siguiente manera

Alineación radial

En el vertical se observó una carga neta de 0,08 mm sobre el extremo superior del eje AP, lo cual significa que el éste se encontraba más alto que el eje BP.

En el horizontal se observó una carga neta de 0,12 mm sobre el lado derecho visto desde cuerpo AP, lo cual significó que el eje BP se encontraba desplazado radialmente hacia la izquierda.

Alineación axial

En el vertical se obtuvo una carga neta de 0,01 mm sobre el extremo inferior del eje AP, lo que significó que el eje BP estaba abierto en dicho valor sobre el extremo inferior, considerando al eje AP en posición puramente vertical.

En el horizontal, se observó una carga neta de 0,04 mm sobre el lado izquierdo visto desde cuerpo AP, lo que significó que el eje BP estaba abierto en ese valor sobre aquél lado, considerando el eje AP horizontal.

Todos los valores resultantes se reunieron para una mejor interpretación de los resultados (Fig. 59). La lectura se realizó observando los valores desde el cuerpo de AP hacia el BP.

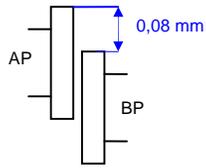
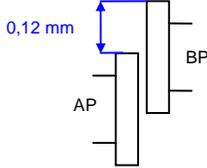
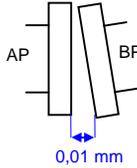
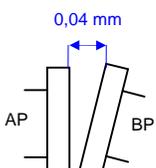
Alineación	Plano vertical	Plano horizontal
RADIAL		
AXIAL		

Figura 59. Posición relativa entre rotores AP - BP

Corrección

Con respecto a la corrección hay que aclarar que los valores medidos y las correspondientes tolerancias indican el grado de desalineación y no las modificaciones que se deben realizar sobre los suplementos.

De esta manera, se hacen las correcciones sabiendo que el valor de desalineación total se considera referido a un cero colocado en uno de los extremos, por lo que el movimiento de corrección corresponde a la mitad del grado de desalineación.

Se dice que: "Para anular un grado de desalineación de 10, debo corregir en 5".

En aquella oportunidad los parámetros fuera de tolerancia fueron los correspondientes al radial horizontal y vertical; y al axial horizontal. Por ende se debió proceder a la corrección pertinente.

6. Se realizó el cálculo de suplementos a colocar y/o extraer en los panes verticales de los cojinetes N° 3 y 4; y el cálculo de la variación de la posición de los suplementos correspondientes a los panes laterales. Para esto se tuvo en cuenta el largo total del eje, distancia entre cojinetes, distancias de los cojinetes a las bridas de acople, y los diámetros éstas.

Por cuestiones geométricas, una corrección radial incide de manera proporcional sobre la alineación axial, siendo ésta última más notoria a medida que es mayor la distancia al punto de corrección.

Luego de que se realizaron las correcciones derivadas de los cálculos, se tomó nuevamente la medición de alineación de los ejes, y se comprobó que los valores finales quedaron por debajo de los valores máximos admisibles.

Medición diafragmas de AP y BP

Al igual que en los cojinetes, los diámetros interiores de los diafragmas de AP y BP son verificados mediante micrómetro para interiores, para así también tener una referencia de la deformación de los mismos (Fig. 60). Todos los valores se registran con el fin de poder reproducir los mismos, en la etapa de alineación de los estadios, con el eje postizo.

Los diafragmas se apoyan sobre pedestales metálicos prefabricados.



Figura 60. Medición vertical diafragma rueda N° 12 - BP

La medición de los diámetros que se realiza mediante el micrómetro para interiores (Fig. 61) responde al mismo procedimiento de medición que se lleva en los cojinetes. Se apoya el instrumento sobre el peine o pan de acuerdo al diseño del sello en cuestión.

Otra de las verificaciones que se hacen, es la del correcto apoyo entre ambas mitades de los diafragmas. Mediante sondas se verifica la inexistencia de luz y en caso de que esta exista se debe eliminar. Para esto se utilizan limas y telas esmeriles. Las posibles diferencias que podrían aparecer son del orden de las centésimas de milímetro.



Figura 61. Posición del micrómetro

Alineación con "eje postizo"

Como se expresó precedentemente, se coloca un "eje postizo" para el centrado de la carcasa de AP y de los diafragmas (estadios en Project) de los cuerpos de AP y BP.

El dispositivo está compuesto por un caño hueco, en el cual se apoya la base magnética del comparador. El caño o postizo se apoya en sus extremos sobre bases de sujeción. Estas están provistas de rodamientos para facilitar el giro del postizo.

El objetivo es centrar el eje postizo en la misma posición que ocuparía el eje real de AP o BP según sea el caso; mejor dicho en la posición sobre la cual se alinearon los tres ejes característicos de la turbina. Esto está motivado por la imposibilidad de hacer esta tarea directamente con los ejes reales.

Para cumplir este objetivo se tiene como referencia los cojinetes N° 1 al 4. Se debe reproducir en el postizo las mediciones registradas entre gorriones y cojinetes para asegurar que el postizo esté centrado. Hay que recordar que la toma de alineación se hace con el gorrón del eje apoyado sobre su cojinete (Fig. 62), por ende las lecturas que se deben hacer sobre el comparador dispuesto radialmente para asegurar el centrado son las siguientes:

- 0 (cero) \square lectura inferior
- Similar valor \square lecturas horizontales
- Luz total \square lectura vertical

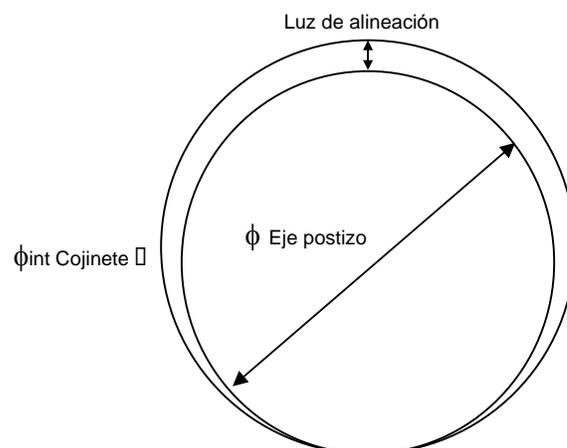


Figura 62. Medición diámetro de cojinetes

Una vez centrado el eje en función de la posición de los cojinetes se hacen los siguientes trabajos:

- Se alinean los estadios a bases.
- Se registran los valores, que otorga el comparador, sobre las bocas de carcasa (Fig. 63);
- con éstos se alinea la carcasa de AP;
- y también se alinea el eje postizo a las tapas de AP y BP para montar los respectivos estadios.
- Otra de la utilidad es para el posicionamiento de las cajas laberínticas (Fig. 64).



Figura 63. Registro de valores sobre boca de AP



Figura 64. Centrado laberintos AP

Para el posicionamiento final de los estadios a sus respectivos cuerpos (Fig. 65) se cuenta con “tetones”, que son salientes de material. Cada estadio posee cuatro de dichos puntos de apoyo a los cuales se les puede cambiar su altura (lima o relleno de soldadura) según sea requerido. En función de los movimientos necesarios para la alineación de los estadios se verifica el correcto apoyo de los tetones mediante tinta “Azul de Prusia”

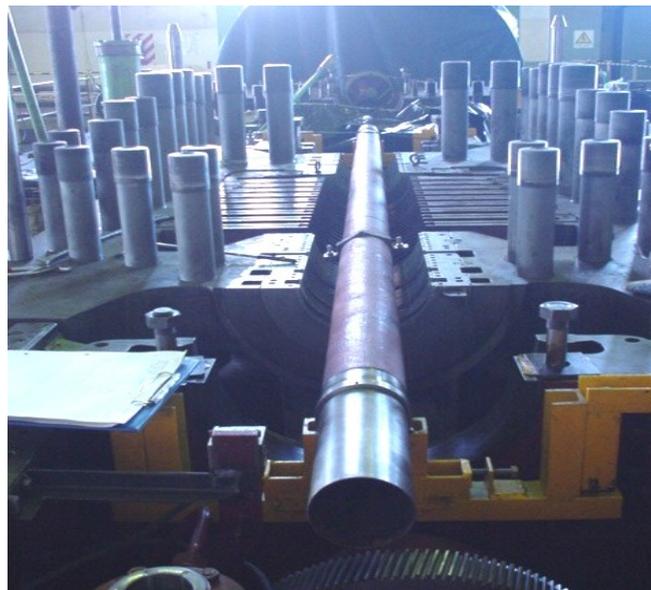


Figura 65. Centrado diafragmas (base) de AP

Apriete espárragos de cuerpos de AP y BP

El apriete de los espárragos de los cuerpos de AP y BP (parte caliente), debe hacerse en caliente, debido a la condición de hermeticidad que se requiere, a causa de que éstos trabajan a una elevada temperatura. De esta manera, calentando dichos espárragos, se llega al ajuste necesario para cumplir con la compacidad requerida.

Considerando que la unión espárrago y junta debe tener una perfecta hermeticidad, la misma deberá tensarse previamente. Para esto se aprieta el espárrago con una determinada fuerza de apriete o preajuste F_a , dicha fuerza se supone que no excede el rango elástico, provocando una deformación positiva en el espárrago y una deformación negativa (comprimiendo) sobre la junta, dependiendo éstas de los módulos de Young de ambos elementos.

Las mismas se pueden graficar, aplicando la carga F_a , sobre un diagrama Carga en función de la Deformación (Fig. 66).

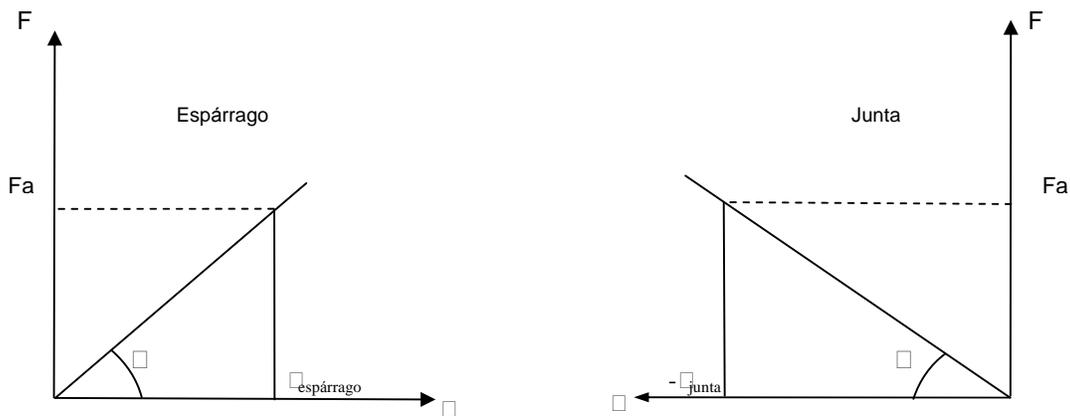


Figura 66. Diagrama Carga – Deformación espárrago y junta

Cuando la turbina entra en servicio, la carga adicional P que reciben los espárragos y la junta son evidenciados produciendo una deformación positiva adicional sobre el espárrago $\Delta_{\text{espárrago}}$ y una deformación positiva Δ_{junta} igual a la anterior, es positiva ya que las juntas tienden a separarse debido a dicha carga. Por ello pueden superponer ambas curvas en un mismo gráfico (Fig. 67).

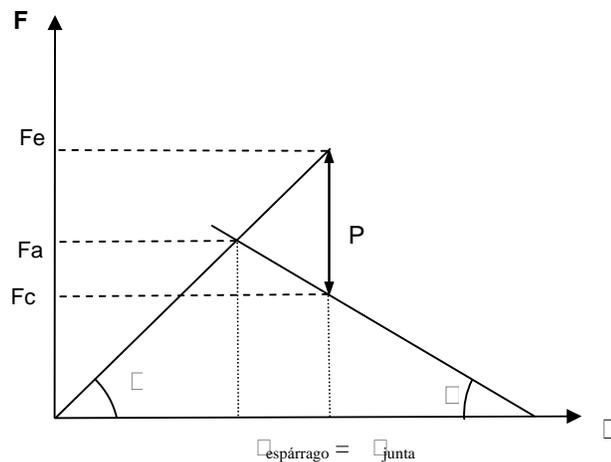


Figura 67. Diagrama Carga – Deformación de espárragos y junta

Como se observa, la fuerza adicional se suma a la fuerza de preajuste, obteniendo la fuerza total F_e . También se observa que la fuerza que subsiste en la unión luego de la deformación es F_c , llamada fuerza permanente.

El hecho de calentar los espárragos, provoca la disminución de la tensión de fluencia del material de los mismos, provocando también el incremento del módulo de elasticidad o módulo de Young, por lo que la deformación será mayor (Fig. 68). Así, se consigue una fuerza de apriete mayor sobre los espárragos ($F_{a\text{caliente}} > F_a$), aumentando también la fuerza permanente sobre los mismos luego de aplicada la carga P que tiende a separar a las tapas de sus respectivas bases ($F_{c\text{caliente}} > F_c$).

En el momento de soltarlos, se deben calentar también debido a dicho ajuste.

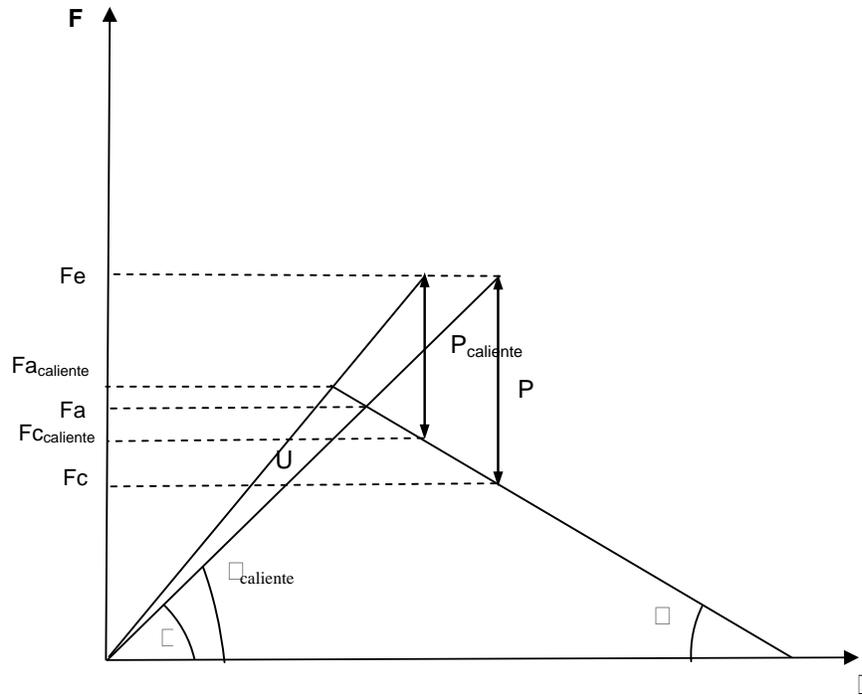


Figura 68. Variación del módulo de Young del espárrago. Aumento de F_a y F_c

El apriete de tornillos bajo carga puede ocasionar en ciertos aceros la corrosión de la rosca. También, en un perno requerido por la tracción, se puede traspasar el límite de fluencia a causa de las importantes tensiones de torsión, que se sobreponen al efectuar el apriete. Por estos motivos, todos los tornillos de material resistente al calor (12 % Cr), de más de 30 mm. de diámetro, así como todos aquellos fabricados con aceros de baja aleación, de más de 90 mm. de diámetro, deberán calentarse antes de apretarlos y de soltarlos.

De esta manera, el apriete de los espárragos de los cuerpos de AP y BP (parte caliente), se realiza en función de los siguientes ítems:

1. Un dispositivo de calentamiento
2. Un dispositivo de medición
3. Apriete necesario de los espárragos

1. Dispositivo de calentamiento

Este dispositivo (Fig. 69) se encuentra alimentado con aire comprimido circulando por una serpentina que es calentada mediante autógena. El aire caliente se introduce por medio de una tobera en el orificio de medida del tornillo.

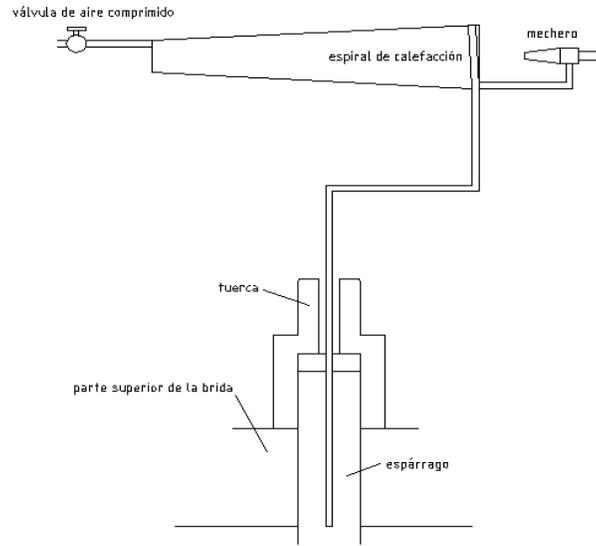


Figura 69. Dispositivo de calentamiento

2. Dispositivo de medición

Este dispositivo (Fig. 70) consta de un comparador fijado a un vástago de medición, así como un casquillo, que se atornilla en el orificio del espárrago.

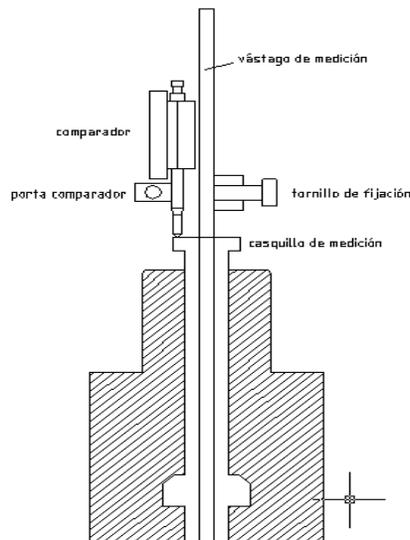


Figura 70. Dispositivo de medición

3. Apriete necesario de los espárragos

Para esto se tiene en cuenta la dilatación de los tornillos expresada por la siguiente fórmula:

$$Dilatación = \frac{l + (d/2)}{1000}$$

Donde

l = medida teórica para la dilatación (espesor de la brida + arandela)
 d = diámetro exterior de la rosca del espárrago

De acuerdo a la dilatación necesaria por los espárragos, se calcula el paso circunferencial sobre la tuerca que se debe apretar para aquella dilatación necesaria. Entonces se obtiene según las dimensiones de los espárragos y tuercas los pasos circunferenciales a apretar sobre las tuercas de AP (Tabla 11) y de BP.

Nº tuerca	Diámetro [mm]	Largo a estirar [mm]	Radio más largo [mm]	Estiramiento [mm]	Giro sobre la tuerca [mm]
1 a 5	69,5	224	224+35,75=258,75	0,26	49
6	69,5	240	240+34,75=274,75	0,28	60
7	79,5	245	245+39,75=284,75	0,29	65
8	79,5	292	292+39,75=331,75	0,34	70
9	79,5	295	295+39,75=334,75	0,34	70
10-11-12	99,5	341	341+49,75=390,75	0,39	95
13-14	99,5	317	317+49,75=366,75	0,37	90
15-16	99,5	340	340+49,75=389,75	0,39	95
17	79,5	294	294+39,75=333,75	0,34	70

Tabla 11. Apriete de tuercas tapa AP

Para el ajuste necesario de cada uno de los espárragos se comienza apretando a mano todas las tuercas a sus respectivos espárragos, con la asistencia llave de golpe. Previamente se coloca sobre la rosca de los espárragos grasa resistente a las altas temperaturas. Luego, se aflojan y se vuelven a ajustar pero golpeando con masa la llave de golpe. Terminada esta etapa se sigue el ajuste mediante la llave hidráulica HYTORC, sabiendo el giro necesario que se debe realizar sobre cada espárrago. El mecanismo utilizado para verificar dicho giro es el siguiente:

- Se cuenta con anillos que tienen la función de abrazar circunferencialmente a la tuerca, los cuales cuentan con un brazo que sirve de guía sobre la tuerca contigua
- Sobre dicha tuerca se marca el giro circunferencial necesario a recorrer por la guía, colocando la punta del brazo en el comienzo de la marca realizada
- Se coloca la llave hidráulica HYTORC sobre la tuerca a apretar, para comenzar con el ajuste
- Se observa el giro necesario, verificando que el brazo del anillo recorra el giro señalado en la tuerca contigua

Balanceo de Rotores

Uno de los requerimientos necesarios del "Mantenimiento Programado" de la turbina, es el balanceo de los rotores AP y BP. En estos dos se manifiesta fuertemente el desgaste producto de las horas de funcionamiento. Caso contrario es el del alternador, que sólo requiere de este trabajo bajo ciertas condiciones que luego serán abordadas posteriormente.

Dicho trabajo es tercerizado generalmente a empresas capitalinas. La duración total del trabajo es de dos semanas laborales aproximadamente, incluyendo el transporte de cada uno de los rotores y contemplando trabajos adicionales sobre éstos. Como ejemplo de dichos trabajos citamos la rectificación de las "chapas jotas" de sellos laberínticos.

Se hará una breve introducción del balanceo y luego se explicará el método utilizado, denominado "Método de los dos planos".

Introducción

El desbalanceo puede ser definido como la no coincidencia del eje de rotación y el eje longitudinal principal de inercia del rotor. Este eje, une todos los centros de gravedad de cada una de las infinitas secciones transversales que componen al rotor, que al no coincidir con el eje de rotación podrán inducir cuatro tipos de desbalanceo, en virtud de los cuales habrá que decidir cómo balancear el rotor.

Los tipos de desbalanceo son (Fig. 71):

- Desbalanceo estático
- Desbalanceo par
- Desbalanceo casi estático
- Desbalanceo dinámico

a) Desbalanceo estático

El eje longitudinal principal de inercia del rotor está desplazado paralelamente con respecto al eje de rotación.

b) Desbalanceo par

El eje longitudinal principal de inercia del rotor intercepta al eje de rotación en el centro de masas del propio rotor.

c) Desbalanceo casi estático

El eje longitudinal principal de inercia del rotor intercepta al eje de rotación en un punto arbitrario, o sea, un punto que no coincide con el centro de masas del propio rotor.

d) Desbalanceo dinámico

El eje longitudinal principal de inercia del rotor intercepta al eje de rotación y tampoco es paralelo a éste.

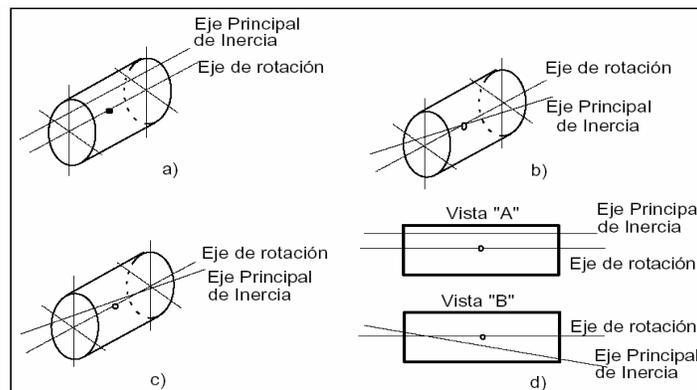


Figura 71. Tipos de Desbalanceo.

El desbalanceo produce vibraciones que aceleran el desgaste en los cojinetes y se transmiten a otras partes del equipo donde también pueden provocar fallas.

El mismo se produce como consecuencia de una distribución desigual en la masa de los elementos rotantes. Se logra agregando o quitando masas en ciertas posiciones angulares sobre el rotor disminuyendo así la carga dinámica sobre los cojinetes y aumentando la vida útil de la máquina, es decir que a través del agregado o extracción de pequeños pesos de corrección, se pueden reducir las fuerzas de inercia y obtener una rotación sin generación de vibraciones excesivas en los cojinetes.

La calidad del balanceo depende de tres factores:

1. capacidad de la máquina balanceadora
2. configuración del rotor
3. diseño de las herramientas

De esta manera, las ventajas al mejorar la calidad del balanceo son:

- reduce el desgaste interno de sellos y cojinetes de la turbina
- reduce la probabilidad de fallas por fatiga en los cojinetes
- reduce la transmisión de vibraciones a fundaciones
- reduce los requerimientos de robustez estructural

Como se ha mencionado anteriormente, los rotores AP, BP, y el del alternador se balancea según el "Método de los dos planos".

Método de balanceo en dos planos

Como los rotores tienen su masa distribuida longitudinalmente, se debe hablar de balanceo en dos planos, el cual se presenta bajo dos formas:

- a) desbalanceo de rotores rígidos
- b) desbalanceo de rotores flexibles

El rotor puede considerarse como rígido o flexible según sea su velocidad de rotación. Para $\omega \geq 50\%$ de la primera velocidad crítica de un rotor, la distribución de masa del mismo es posible que tienda a deformarlo de manera flexible.

En este caso, considerando que la velocidad de rotación de los ejes en régimen es de 3000 RPM y según datos técnicos de la máquina, se tiene que:

Rotor	$\omega_{crítica}$ [RPM]
• Alta Presión □	2483
• Baja Presión □	2319
• Alternador □	1710

Se deduce que se debe balancear de acuerdo al criterio de rotores flexibles.

En este caso la distribución axial de desbalanceo tiende a excitar diferentes formas modales del rotor dependiendo de la velocidad del mismo, y de la forma y rigidez del soporte.

En los talleres donde se envían los rotores a balancear, se balancean en máquinas balanceadoras a $\omega = 300$ RPM, por lo que aquí se estaría por debajo del 50% de la velocidad de rotación crítica, se consideraría al rotor como rígido. Cuando la máquina alcanza la velocidad de régimen se desbalancea, entonces habrá que corregir el balanceo para esta condición.

El procedimiento seguido en el taller es:

1. Se coloca el rotor en la máquina balanceadora, teniendo en cuenta la velocidad de la misma a la cual se balanceará el mismo.
2. Se eligen dos planos de balanceo, planos I y II (Fig. 72)
3. Se mide vibraciones en módulo y fase en ambos planos sin peso de prueba

4. Se coloca un peso de prueba en el plano I y se mide la amplitud de velocidad de vibración y fase en ambos planos.
5. Se coloca el peso de prueba en el plano II y se toma la amplitud de velocidad de vibración y fase en ambos planos.

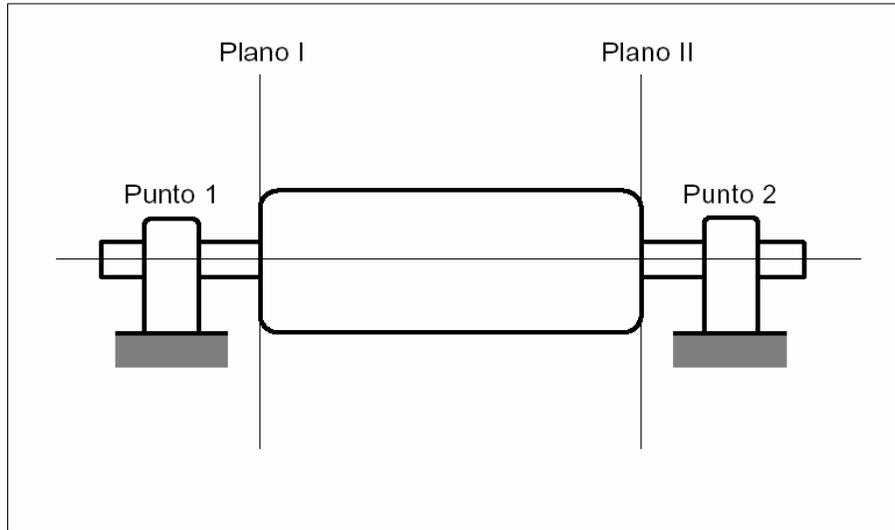


Figura 72. Planos de Balanceo y puntos de medición

Se obtienen seis pares de valores de amplitud y fase de vibración (Tabla 12), tres por cada uno de los planos según masas de pruebas.

MASA DE PRUEBAS	MEDICIÓN DE VIBRACIONES							
	PLANO I				PLANO II			
NINGUNA	V 1,0		α 0,1		V 2,0		α 0,2	
PLANO I	V 1,1		α 1,1		V 2,1		α 1,2	
PLANO II	V 1,2		α 2,1		V 2,2		α 2,2	

Tabla 12. Pares de valores medidos sobre los planos I y II

Actualmente las empresas dedicadas al balanceo de máquinas rotativas disponen de procesadores DSP (procesador digital de señales) y otros, que procesan automáticamente la señal, la filtran dejando pasar solamente el desbalanceo, hace controles de coherencia de valores, y los almacena automáticamente. Luego de efectuar las seis lecturas mencionadas, muestra el resultado del cálculo automáticamente:

- Peso a colocar
- Ángulo de ubicación de los pesos sobre cada uno de ellos

Una vez obtenidos los valores dados por el programa en cuanto al peso y ángulo a colocar en cada plano se verifica el desbalanceo, para ello se debe inferir si el mismo se encuentra dentro de un nivel aceptable.

Por ello, existen una serie de recomendaciones para aceptar como normales las vibraciones producidas por el rotor con cierto grado de desbalanceo. Los fabricantes de máquinas o los usuarios de éstas generalmente indican los límites permisibles para la condición de desbalanceo, pero en ausencia de estas recomendaciones, se utilizan las llamadas normas de severidad.

Existen tablas para la determinación del grado de calidad del balanceo según el tipo de máquina dadas por las normas ISO 1940/1, VDI 2060, ASME, etc. (tabla 13).

CALIDAD DEL BALANCEO	$(e_{per} \times \omega)$ en [mm/s]	TIPO DE ROTOR
G4000	4000	Cigüeñales de motores (diesel) marítimos de bajas revoluciones, montados sobre soportes rígidos y con un número de cilindros impar.
G1600	1600	Cigüeñales de motores de dos tiempos montados sobre soportes rígidos.
G630	630	Cigüeñales de motores de cuatro tiempos montados sobre soportes rígidos. Cigüeñales de motores (diesel) marítimos montados sobre soportes elásticos.
G250	250	Cigüeñales de motores (diesel) de cuatro cilindros y de alta velocidad, montados sobre soportes rígidos.
G100	100	Cigüeñales de motores (diesel) de seis o más cilindros y de alta velocidad. Cigüeñales de motores de combustión interna (gasolina, diesel) para carros y ferrocarriles.
G40	40	Ruedas y llantas de carros. Cigüeñales de motores de cuatro tiempos de alta velocidad (gasolina, diesel) sobre soportes elásticos y con seis o más cilindros.
G16	16	Ejes de propelas, ejes de transmisiones cardánicas. Elementos de máquinas agrícolas. Componentes individuales de motores (gasolina, diesel) para carros y ferrocarriles. Cigüeñales de motores de seis o más cilindros bajo requerimientos especiales.
G6.3	6.3	Elementos de máquinas procesadoras en general. Engranajes para turbinas de usos marítimo. Rodillos para máquinas papeleras. Ventiladores. Rotores de turbinas para la aviación. Impelentes para bombas. Máquinas herramienta. Rotores de motores eléctricos.
G2.5	2.5	Turbinas de gas y de vapor. Rotores rígidos para turbo generadores. Discos para computadoras. Turbo compresores. Bombas operadas por turbinas.
G1	1	Grabadoras de cinta magnética y tocadiscos convencionales. Máquinas trituradoras.
G0.4	0.4	Discos compactos, brocas, barrenas. Giróscopos.

Tabla 13. Grado de calidad del balanceo según ISO 1940/1

Como la máquina balanceadora gira a una velocidad de 300 RPM, habrá que tener en cuenta la corrección para 3000 RPM, ya que es la velocidad de régimen de la turbina. De esta manera, se ingresa al gráfico de desbalanceo residual admisible vs. Velocidad máxima en RPM, procediendo de la siguiente manera:

1. conociendo la velocidad de régimen de la turbina, se ingresa teniendo en cuenta el grado de calidad según el tipo de máquina. En el caso de una turbina de vapor es G2.5.
2. en el punto donde corta con la recta de grado de calidad, y proyectando sobre el eje de ordenadas, se obtiene el desbalanceo residual admisible por masa del rotor.
3. se verifica que el módulo del vector resultante de desbalanceo se encuentre dentro del valor máximo aceptable de desbalanceo residual admisible.

Esto significa que si el vector resultante de desbalanceo es menor que el vector de desbalanceo residual admisible, el rotor se encuentra balanceado dentro de los valores admisibles y se encuentra balanceado correctamente.

Ejemplo Balanceo Rotor de Baja Presión Turbina de Vapor N° 7

El trabajo fue realizado por una empresa de Capital Federal, correspondiente a una reparación efectuada en rotor BP de TV N° 7, el día 8/06/2007. La misma se encarga se emitir el certificado de balanceo (Fig. 73) a fin de constatar los resultados. Igualmente el trabajo es supervisado por personal de planta.

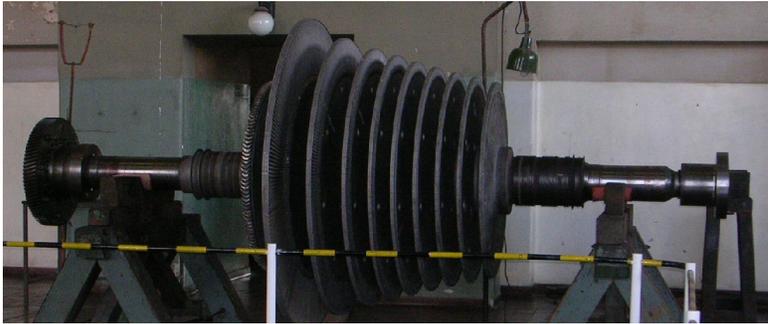
CERTIFICADO DE BALANCEO				
ROTOR A BALANCEAR : TURBINA DE BAJA PRESION				
DISPOSITIVO : A		EMPRESA : Centrales de la Costa Atlántica S.A		O / R :
BALANCEADORA : SCHENCK – H 60 – UV				
TOLERANCIA DE BALANCEO: ISO / TC 108 (Q. Grado G-2,5) = 2200 grs. pulgada total				
VELOCIDAD DE BALANCEO :				300 R.P.M
DIBUJO DEL CONJUNTO A BALANCEAR				
				
PLANO	DESBALANCEO	PESO AGREGADO	POSICIÓN ÁNGULO	DESBALANCEOS RESIDUALES
# 1	1792 grs. pulg. 179 grados	80 grs.	179 grados	56 grs. pulg. 330 grados
# 2	11677,05 grs. pulg. 155 grados	693 grs.	155 grados	25,27 grs. pulg. 320 grados
REALIZADO POR :			CERTIFICADO POR :	
.....			
FECHA : 8/06/2007.....				

Figura 73. Certificado de balanceo – Rotor BP TV N° 7

Marca: BROWN BOVERI – ESCHER WYSS
 Modelo: VTH 800 + 3018
 Peso aproximado: 7360 Kg.
 Velocidad: 3000 RPM

NOTA: PESOS EXISTENTES EN PLANO # 2: 1332,5 grs. a 117 grados. LOS MISMOS FUERON EXTRAÍDOS. SE MODIFICÓ ÁNGULO Y SE COLOCARON 693 grs. SOLAMENTE A 115 grados.

En base a los pesos a agregar obtenidos se verificará que los desbalances residuales sobre los planos # 1 y # 2, sean menores que los admisibles según normas ISO / TC 108, con grado de calidad G 2,5.

Dicha verificación se realiza ingresando en el gráfico dado por la norma ISO / TC 108 (Máxima velocidad de rotación vs. Desbalanceo residual admisible por unidad de masa del rotor).

De esta manera, el desbalanceo (\bar{D}) [$gr.mm./Kg.$]. se obtiene a partir de la velocidad de régimen de la turbina (3000 RPM), interceptando a la recta G 2,5. Proyectando sobre el eje de ordenadas se lee dicho desbalanceo. Según gráfica, para $n = 3000RPM$ y $G = 2,5$ se obtiene (Fig. 73):

$$\bar{D} = 8 \frac{gr.mm}{Kg} = 0.315 \frac{gr.inch}{Kg}$$

Conociendo el peso del rotor de baja presión de 7360 Kg. \Rightarrow el desbalanceo residual admisible es:

$$\bar{D} = 0.315 \frac{gr.inch}{Kg} \times 7360 Kg. \quad \bar{D} = 2318,4 gr.inch$$

En primer instancia, se puede apreciar que la medición del desbalanceo dio valores inadmisibles sobre el plano # 2, superior a \bar{D} .

Entonces, luego de efectuar el balanceo, los resultados superan a los valores resultantes arrojados en el balanceo, por lo tanto se balanceó el rotor dentro de las tolerancias admisibles.

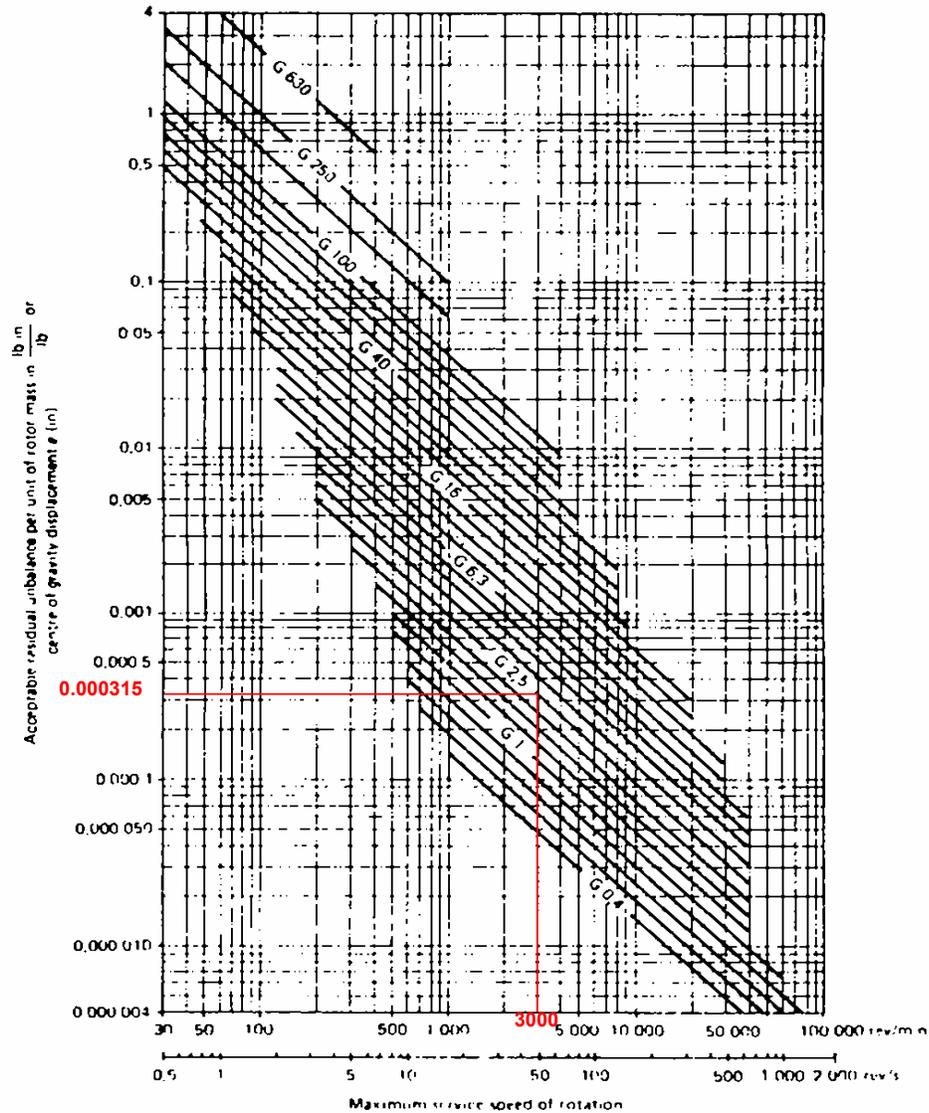


Figura 73. Máxima velocidad de rotación vs. Desbalanceo residual admisible

Ensayos no destructivos

Los métodos de Ensayos No Destructivos (END) permiten obtener información de piezas o partes de una estructura metálica o no metálica, sin alterar sus condiciones de utilización o aptitud de servicio; es decir no provocan daños en el material, ni perjudican o interfieren con el uso futuro de las piezas o partes inspeccionadas.

Los métodos de END se aplican en diferentes etapas del proceso productivo, ya sea en el control de materia prima, durante el proceso de fabricación, así como en el ensayo final del producto y control en servicio.

De igual manera se puede decir, que si se aplica un método de END empleando un procedimiento inapropiado, puede generar condiciones que provoquen daños en las piezas inspeccionadas.

Los END que se realizan, sobre componentes de las turbinas de vapor, son tres:

- Tintas penetrantes
- Partículas magnetizables
- Ultrasonido

A continuación se explicará brevemente los principios de éstos ensayos. Luego se detallará el tipo de ensayo realizado sobre cada uno de los componentes principales de la turbina de vapor.

Tintas penetrantes

La inspección por tintas penetrantes es utilizada para hacer que los defectos superficiales se vuelvan visibles en el material. Un líquido, el penetrante, es aplicado sobre la superficie de la pieza, dejando que se introduzca en las discontinuidades del material, esto ocurre debido al fenómeno de la capilaridad, que es la propiedad de penetración de un líquido en lugares extremadamente pequeños debido a sus características físico-químicas, tal como la tensión superficial de el líquido mencionado. Una vez removido el exceso, el penetrante atrapado en las discontinuidades es forzado a salir por medio de otra sustancia, el revelador, de esta manera se forma una indicación, que puede ser visualizada bajo luz común, si la tinta utilizada es de color rojo (inspección visible), o bajo luz ultravioleta (luz negra) si el líquido utilizado es fluorescente (inspección fluorescente). El análisis por tintas penetrantes permite distinguir fisuras del orden de 0,03 mm.

Como condición general, las piezas evaluadas y los elementos utilizados deben estar a una temperatura entre los 10 °C y los 38 °C.

La secuencia de ensayo puede dividirse en seis etapas u operaciones.

1- Limpieza y secado previo: es necesaria la limpieza previa de la superficie antes de la aplicación de la tinta, es decir que se encuentre libre de pintura o recubrimientos, y esté limpia, libre de arena, grasa óxido y aceite. Si la superficie de la pieza estuviera conteniendo aceites, grasas u otras suciedades que puedan obstruir la abertura de la fisura, la tinta no conseguirá penetrar en la fisura cuando es aplicada en la superficie.

La norma ASTM E 165 lista los siguientes métodos de limpieza:

- Detergentes
- Solventes
- Vapor
- Decapado (alcalino)
- Ultrasonido

Luego de la limpieza, se debe proceder al secado de la pieza a evaluar, para evitar la presencia de líquido en la fisura que pueda evitar el ingreso del penetrante en la discontinuidad o bien diluirlo.

2- Aplicación de la tinta penetrante: puede ser aplicada de varias maneras, es decir:

- Con pincel, para piezas grandes (ensayo total o parcial)
- Pulverización, para piezas grandes (ensayo total o parcial)
- Inmersión de la pieza, se utiliza en piezas pequeñas y normalmente se aplica en procesos de producción en serie.

Como se mencionó precedentemente, los líquidos ingresan en los defectos por capilaridad, por lo tanto necesitan un bajo ángulo de contacto y una adecuada tensión superficial. Las tintas penetrantes son diseñadas para obtener la máxima penetración, con ángulos de contacto próximos a cero.

Debe estar sobre la superficie por un período denominado tiempo de penetración, que es el tiempo necesario para que la tinta penetre en el interior de la fisura. Este tiempo en promedio varía entre 10 y 30 minutos.

3- Remoción del exceso del penetrante: luego la tinta debe ser removida de la superficie de inspección en forma completa para reducir el background. El modo como es realizada la remoción también es una forma de clasificación del tipo de tinta penetrante:

- lavable al agua: se remueve el exceso de líquido penetrante de la superficie a través de un lavado con agua. Este tipo de penetrante ya posee en su composición un aditivo emulsionante que facilita su remoción cuando entra en contacto con el agua.
- post emulsificable: el emulsificador tiene la función de tornar el penetrante lavable al agua, para entonces luego remover el mismo con agua de la superficie de inspección. Es el tipo de penetrante más sensible y más utilizado en el sector aeronáutico.
- removible al solvente: con la utilización de paños secos se remueve gran parte del exceso de la tinta, y luego con el mismo tipo de paño humedecido con solvente se remueve el resto del exceso. Este penetrante se torna bastante sensible cuando se aplica en superficies planas.

4- Revelación: es la etapa en que se forman las indicaciones sobre la superficie en inspección. La función del revelador es la de absorber hacia la superficie el resto del líquido penetrante que quedo contenido dentro de la discontinuidad (fisura) después de la etapa de remoción del exceso. Se presentan en cuatro formas básicas:

- reveladores en polvos secos
- reveladores acuosos
- reveladores húmedos no acuosos
- reveladores en película líquida

Siendo el más sensible el revelador no acuoso. Cuando el penetrante es del tipo rojo, se utiliza un revelador que forme una película bien blanca y más espesa, pues así el color rojo de la indicación revelada forma un excelente contraste con la película blanca del revelador. Cuando la tinta es del tipo fluorescente, el revelador utilizado (seco o acuoso) forma una película menos espesa, pero altamente absorbente, ya que el contraste visual en el momento de la inspección (realizado bajo luz ultravioleta y en cámara oscura) se debe dar entre la superficie de ensayo (levemente azulada) y el color bajo luz ultravioleta del penetrante que formó la indicación.

5- Inspección e interpretación final: la misma puede ser realizada bajo luz blanca o visible cuando la tinta es del tipo rojo, en este caso la incidencia de la luz visible en el punto de la inspección debe tener una intensidad luminosa de no menos de 1000 lux, según la recomendación de la norma ASTM E 1417.

En el caso del uso de tintas fluorescentes, la inspección final debe ser realizada bajo luz ultravioleta (negra) y en cabina oscura exenta de luz visible (luz común). En este caso la intensidad de la luz ultravioleta mínima exigida por la norma ASTM E 1417 es de 1000 uW/cm².

Ante la aparición de una indicación de falla, la misma debe ser clasificada y evaluada (tipo, tamaño, ubicación, orientación) para ser considerable aceptable o no aceptable. La señal aparece y crece, principalmente en ancho. Es posible evaluar con cierta precisión el largo de fisuras, pero es muy difícil evaluar las dimensiones restantes del defecto.

Naturaleza de los defectos: el tipo de defecto influye en su probabilidad de detección. El largo de la fisura se utiliza para definir el tamaño de defecto, sin embargo es el volumen de defecto lo que determina si éste será detectado. Si el volumen es suficientemente grande, la cantidad de penetrante atrapada producirá una indicación suficientemente grande como para hacer detectable o superar el umbral de fluorescencia.

Clasificación de los defectos: los defectos pueden ser clasificados de acuerdo a la norma ASTM E 433. Ésta provee los criterios de clasificación de defectos, los cuales pueden ser utilizados como referencia para criterios de aceptación, especificaciones o la realización de esquemas.

Los defectos son clasificados según tipos y clases de la siguiente manera:

Tipos

- **Tipo I:** en los que ninguna dimensión es mayor a 3 veces la otra
- **Tipo II:** en los que una dimensión es mayor a 3 veces la otra

Clases

- **A:** Simple
- **B:** múltiple desalineado
- **C:** múltiple alineado
- **D:** en intersección de superficies

6- Limpieza final de la superficie: el paso final es la limpieza del componente para eliminar los restos del penetrante y revelador que pudieran afectar procesos posteriores de fabricación o el servicio. Debe prestarse importancia a la posibilidad de corrosión producida por combinación del penetrante con otros elementos. La limpieza puede realizarse mediante enjuague con agua, vapor, solvente, baño ultrasónico, etc.

Partículas magnetizables

La técnica de partículas magnetizables (PM) es un método utilizado para la detección de defectos superficiales y sub-superficiales. La técnica utiliza campos magnéticos y pequeñas partículas magnetizables, comúnmente de hierro, para detectar defectos en elementos de máquina. El único requerimiento para realizar la inspección es que el material del componente sea ferromagnético, tal como hierro, níquel, cobalto y algunos otros.

El magnetismo es la propiedad de los materiales de atraer otras sustancias, tal es el caso de los imanes permanentes, en los cuales se distingue la presencia de un campo magnético que posee un polo norte y un polo sur, desde los cuales emanan las líneas de campo. La misma cantidad de líneas de campo que salen de un polo llegan al otro, y éstas no pueden ser cortadas por ningún medio.

Si una barra magnética se corta en porciones se obtienen tantos imanes pequeños como porciones. Si estos imanes más pequeños son vueltos a unir, los nuevos polos no desaparecen y se produce lo que se denomina "campo de fuga", el cual se origina en que la unión de los polos no es perfecta y, por lo tanto, el área de contacto real es menor que la aparente. La reducción de sección hace que las líneas de campo saturan los puntos de unión y aparezcan campos de fuga, producidos por las líneas de campo que no logran acomodarse en las áreas de contacto.

Una situación similar ocurre cuando un material magnético presenta una disminución de sección parcial producida por la presencia de una fisura. Si se depositan partículas de hierro sobre una superficie que posee un campo de fuga, las partículas serán atraídas hacia los polos generados en torno a las fisuras, esto da origen a la indicación, la cual es mucho más fácil de observar que la fisura misma, siendo ésta la base de la inspección por PM.

En general las piezas evaluadas por PM no son imanes permanentes, por lo tanto, para generar un campo de fuga a partir de las discontinuidades geométricas de una pieza es necesario magnetizarla. Para esto se debe disponer de un campo magnético en cual puede ser permanente (imán) o generado a partir de una bobina.

Detectabilidad de discontinuidades: para una correcta inspección debe considerarse la orientación relativa entre las líneas de campo y el defecto. La base del ensayo consiste en generar un campo de fuga, el cual debe ser puesto en evidencia por las partículas magnéticas.

La mayor distorsión de las líneas de campo o campo de fuga se produce cuando el defecto ocasiona la mayor disminución de sección al paso de las líneas de campo. Cuando la

orientación del mismo es paralela a las líneas de campo, no se producirá campo de fuga y el defecto no será detectado (figura x).

Esta característica hace que durante la inspección por PM la magnetización deba realizarse en diferentes direcciones, al menos dos ortogonales.

Medio revelador: El medio revelador es el elemento que permite observar la presencia de discontinuidades por acción de los campos de fuga. Los reveladores son pequeñas partículas de hierro y óxido de hierro a los cuales se les añaden pigmentos. Un buen medio revelador debe reunir las siguientes características:

- Propiedades magnéticas, alta permeabilidad y baja retentividad.
- Buena movilidad, aportada por una geometría adecuada, mezcla de partículas redondeadas y alargadas.

Las partículas magnéticas están disponibles en mezclas secas o húmedas.

I. Aplicación de las partículas.

- **Método residual:** se coloca la pieza en un campo y se retira. Luego, aprovechando el magnetismo residual se aplica el medio revelador y se observan las indicaciones.

- **Método continuo:** si la inspección se realiza con partículas secas se magnetiza y se coloca el medio revelador simultáneamente.

- II. **Inspección e interpretación:** luego de la magnetización y aplicación de las partículas magnéticas, debe observarse si existen indicaciones de falla. Todas las indicaciones deben ser clasificadas como relevantes o no-relevantes. Las indicaciones relevantes deben ser comparadas con el criterio de aceptación / rechazo empleado.

Las mismas pueden ser registradas por diversos métodos, siendo el más sencillo el escrito, en el cual se realiza con la ayuda de un esquema.

- III. **Limpieza final y desmagnetización:** después de la inspección todas las piezas deben ser limpiadas, desmagnetizadas y protegidas contra la corrosión.

En cuanto a la desmagnetización, existen dos formas, con corriente alterna, donde se aplica un valor de campo mayor al utilizado en la inspección y luego se disminuye hasta cero.

Con corriente continua, se aplica un valor de campo mayor que es utilizado en la inspección y en la misma dirección. Luego se invierte la corriente, reduciendo su valor máximo de manera de cerrar el ciclo de histéresis hasta un valor suficientemente bajo de magnetismo residual.

Cuando sea posible, las piezas que fueron sometidas a magnetización circular deben ser magnetizadas en forma longitudinal antes de la desmagnetización. Luego de la desmagnetización el campo magnético no debe ser superior a 3 G o 240 A/m.

Limpieza: puede realizarse mediante solvente, aire, etc. Debe asegurarse que no hay residuos de partículas magnéticas en las discontinuidades geométricas de la pieza, que pudieran afectar procesos de fabricación posteriores o el comportamiento en servicio.

Ultrasonido

El ultrasonido es una vibración mecánica con un rango mayor al audible por el oído humano que se transmite a través de un medio físico y es orientado, registrado y medido en Hertz con ayuda de un aparato creado para ese fin. Dicho método utiliza ondas sonoras para inspeccionar el interior de componentes que ofrecen una trayectoria continua a la propagación de las ondas sonoras.

Principios que se aplican:

- La impedancia acústica es la resistencia que oponen los materiales al paso de una onda ultrasónica.
- Ondas acústicas iguales a las ondas sónicas.
- Transmisión de energía entre partículas que propicia el oscilamiento.
- El número de oscilaciones son de acuerdo al tipo de onda que se trata.
- Se propagan en todos los medios elásticos donde exista fracciones de materia (átomos o moléculas capaces de vibrar).
- La vibración depende de la separación de las partículas.

A continuación se muestra un esquema comparativo (Tabla 14) entre dichos ensayos no destructivos a fin de visualizar su utilización según el tipo de imperfecciones, aplicaciones típicas, ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

Método	Imperfecciones típicas detectadas	Aplicación típica	Ventajas	Desventajas
Tintas Penetrantes	Grietas, porosidad, traslapes y fisuras abiertas a la superficie	Piezas fundidas, forjadas, conjuntos de partes soldadas y componentes sometidos a agrietamiento por corrosión, por esfuerzo o por fatiga	Poco costoso, fácil de aplicar, portátil, de fácil interpretación.	La imperfección debe ser abierta a una superficie accesible, el nivel de detectabilidad depende del operador
Partículas Magnetizables	Grietas, huecos, porosidad e inclusiones	Piezas fundidas, piezas forjada y piezas extrusionadas	Sencillo, poco costoso, detecta imperfecciones subsuperficiales poco profundas, así como defectos superficiales	Sólo para materiales ferromagnéticos, se requiere preparar la superficie, con frecuencia suceden indicaciones irrelevantes, depende del operador
Ultrasonido	Grietas, huecos, porosidad, inclusiones y deslaminaciones	Piezas de metal compuesto, forjadas, fundidas y conjuntos de partes soldadas	Excelente profundidad de penetración, buena sensibilidad y resolución, puede proporcionar registros permanentes	Requiere el acoplamiento acústico con el componente, lento, difícil de interpretar

Tabla 14. Esquema comparativo de los distintos ENDs

Los ENDs que se llevan a cabo sobre los componentes involucrados (Tabla 15) se hacen luego de concluida la etapa de alineación de los ejes de la turbina de vapor. También se debe recordar el tema de la limpieza destacándose la correspondiente a los rotores de turbina. Estos se arenan con dos tipos de partículas: óxido de aluminio y arena de río. Las primeras se usan exclusivamente sobre los álabes mientras que las segundas para el resto del cuerpo. Este procedimiento se hace también sobre los estadios.

Con respecto a los cojinetes hay que aclarar que personal de planta puede realizar ensayos de tintas penetrantes con antelación a la mencionada etapa de alineación. Esto va a depender del análisis de los resultados de monitoreo de temperaturas y/o de la inspección visual.

Componente	END			
	Inspección visual	Tintas penetrantes	Partículas magnetizables	Ultrasonido
Carcasa AP				
• Superior (Tapa)	X		X	
• Inferior (Base)	X		X	
Carcasa BP				
• Superior	X		X	
• Inferior	X		X	
Ruedas distribuidoras AP (10)				
• Cuerpo	X		X	
• Álabes fijos (1 a 7)	X	X	X	
• Álabes fijos (8 a 10)	X		X	
• Radio exterior	X			
Ruedas distribuidoras BP				
• Cuerpo	X		X	
• Álabes fijos (11 a 20)	X		X	
• Radio exterior	X			
Rotor AP				
• Cuerpo	X			
• Álabes móviles (1 a 7)	X	X		
• Álabes móviles (8 a 10)	X		X	
• Flejes (bandaje)	X			
Rotor BP				
• Cuerpo	X		X	
• Álabes móviles (11 a 20)	X		X	
• Flejes (bandaje)	X			
Espárragos AP	X		X	X
Espárragos BP	X		X	X
Cojinetes (8)	X	X		X
Válvulas				
• Stop	X	X		
• Asiento válvula parcializadora	X	X		

Tabla 15. Tipo de ENDs realizados sobre los distintos componentes

Regulador

Concluida la etapa de extracción del aislante térmico de los cuerpos de AP y BP se puede comenzar a desmontar el bloque de maniobras y los distintos elementos correspondientes a la regulación de entrada de vapor. Hay que destacar que el desgaste producto de las horas de funcionamiento es menor que el producido en la propia turbina, por lo que este bloque demanda menor atención.

Principalmente las tareas que gobiernan al bloque de maniobras están vinculadas con la limpieza de todo el conjunto y revisión del estado estructural de los componentes. La limpieza implica la remoción de todo el anaeróbico y el aceite de lino usado en las juntas de unión, con su posterior esmerilado. Trabajo similar al que se hace sobre todas las juntas de la turbina.

También se hace una revisión del funcionamiento del péndulo y el estado de los anillos excéntricos sobretodo de la condición en que se encuentran sus resortes de acción centrifuga. Se controla que los mismos no estén trabados, o sea, que posean libertad de movimiento.

Se efectúan ensayos de tintas penetrantes en cuerpo de válvulas "Stop" y asientos de válvulas parcializadoras. También se verifica el correcto contacto, en posición de cierre de las parcializadoras, mediante tinta "Azul de Prusia".

Pero se destacan los siguientes dos trabajos:

1. Construcción de curva de regulación
2. Revisión de luces en varillajes

Construcción de curva de regulación

Ésta se encuentra realizada por el fabricante para las condiciones óptimas de apertura de las cuatro válvulas parcializadoras, en función de la apertura de la válvula N° 1 (Fig. 74).

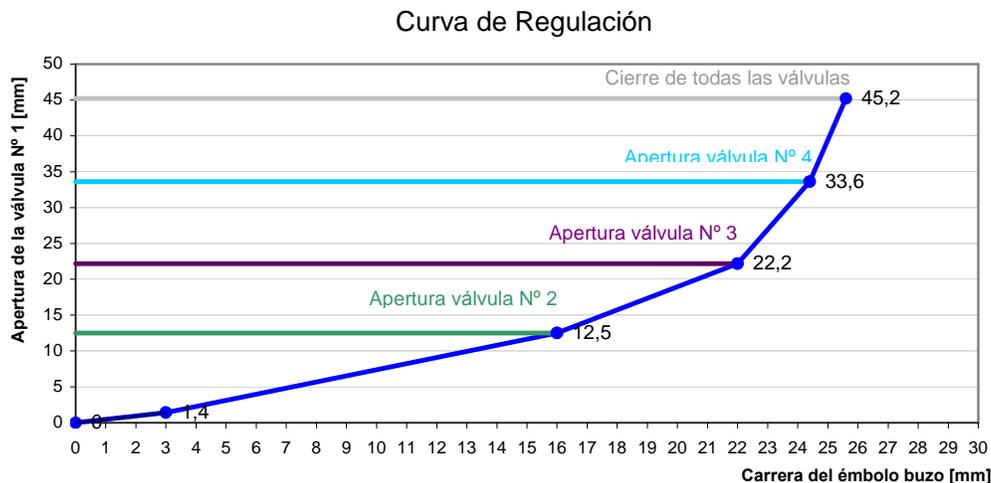


Figura 74. Curva de Regulación dada por el fabricante

Por lo tanto, la misma está realizada en función de dos parámetros característicos de la regulación de admisión del vapor en la turbina, ellos son:

- Carrera del émbolo de la válvula de distribución o émbolo buzo.
- Carrera del émbolo de la válvula parcializadora N° 1.

De esta manera, una vez finalizado el montaje final del bloque de maniobras, se procede a efectuar la regulación de dichas válvulas parcializadoras. Para ello se procede a la construcción de la mencionada curva, la cual debe reproducir los resultados impuestos por el fabricante.

A continuación se describe el modo de realizar la curva mencionada lo que en la planta se conoce como “Levantar las Curvas de Regulación”

Con las cuatro válvulas parcializadoras cerradas, o sea en su punto inferior, se comienza el procedimiento apoyando un comparador sobre el émbolo buzo (Fig. 75).

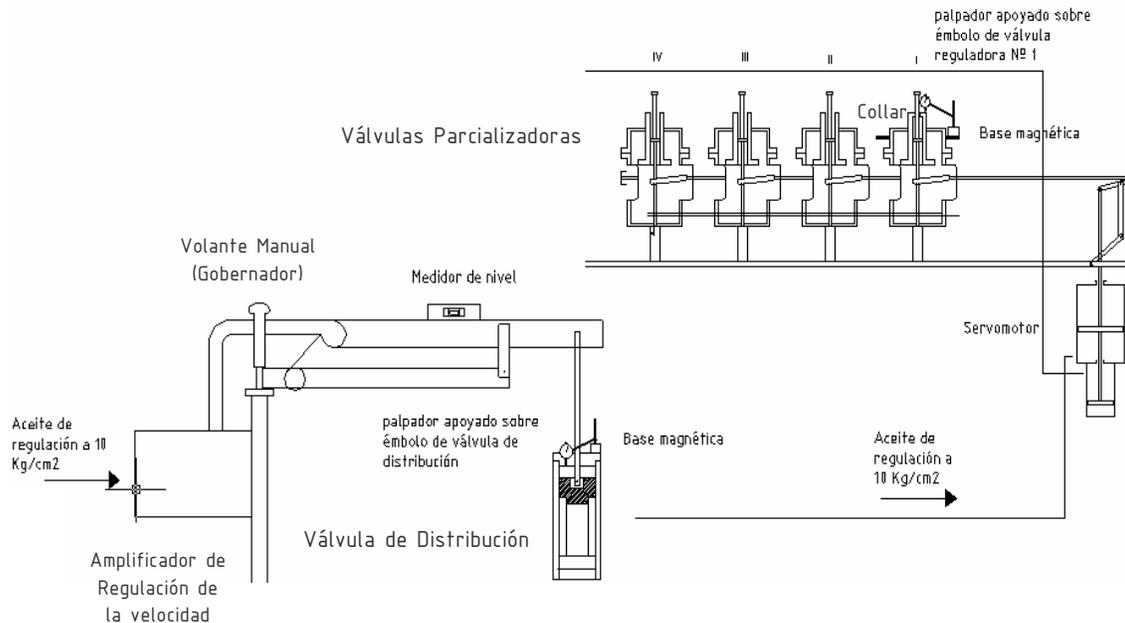


Figura 75. Disposición de los comparadores sobre las válvulas

Al mismo tiempo, se coloca un comparador sobre el émbolo de la válvula parcializadora N° 1. La base magnética asociada a este comparador se encuentra apoyada sobre un collar dispuesto a lo largo del contorno de la válvula. También se debe verificar que la palanca relacionada al émbolo buzo se encuentre en posición horizontal, lo que se asegura mediante un medidor de nivel. Alcanzado este objetivo, se gira el tornillo regulador de la válvula N° 1 hasta que el comparador allí colocado acuse el movimiento, a partir de ese punto, comenzará la apertura de ésta. Aquí se obtiene el punto de origen de la curva que sería el conocido como cero del émbolo buzo y cero del émbolo de la válvula parcializadora N° 1.

Posteriormente se bombea aceite de regulación con una presión de 10 Kg./cm².

A partir de allí, se gira el volante manual (el cual simula un aumento de la velocidad de la turbina) que se encuentra relacionado al amplificador de regulación de la velocidad. El giro de éste se traduce en un movimiento de la palanca, relacionada al émbolo buzo, sobre un pivote. Así, dicho émbolo también se desplaza, en forma descendente. Éste descenso es acusado por el vástago del comparador apoyado sobre él.

El descenso provoca la abertura de las lumbreras, permitiendo el pasaje del aceite de regulación, que se dirige al servomotor, y luego hacia la válvula parcializadora N° 1 produciéndose el desplazamiento de su émbolo. Este movimiento es registrado por el comparador allí dispuesto. Se obtiene otro punto de la curva de regulación.

El varillaje de retorno emite la señal para el envío del aceite nuevamente hacia el servomotor para dirigirse otra vez hacia la válvula de distribución. Como resultado se obtiene el descenso de las camisas, cerrándose las lumbreras que se encontraban abiertas. Así es como se regula la admisión del vapor de la turbina.

Girando nuevamente el volante manual, se repite el proceso de regulación y obteniéndose otro punto. Es decir, que girando tantas veces dicho volante, se obtendrán tantos puntos de la curva como se deseen. Para lograr una curva continua se debe tomar una cantidad infinita de puntos, pero en la práctica se levanta la curva en forma discreta mediante la unión de 25 puntos aproximadamente.

Respecto a la apertura de la válvula parcializadora N° 2, la misma deben abrir, en la posición del émbolo buzo y émbolo de la válvula N° 1 correspondiente según la curva del fabricante. De esta manera, para su calibración, se coloca sobre ésta, el comparador mediante el

mismo dispositivo que se utilizó con la primera de ellas, y en dicha posición, se gira el tornillo regulador hasta que el comparador allí colocado acuse el movimiento y comience su apertura.

Para las válvulas restantes, se repite el mismo procedimiento, llegando a la calibración final de las cuatro válvulas.

Ejemplo: *Trazado de curva de regulación Turbina de Vapor N° 8*

Se realizó el trazado de la curva de regulación siguiendo el procedimiento mencionado, registrando los valores en los comparadores, lo que dio como resultado en primera instancia la curva formada por los puntos discretos **naranjas** (Fig. 76). La curva dada por el fabricante se representa en color **azul**.

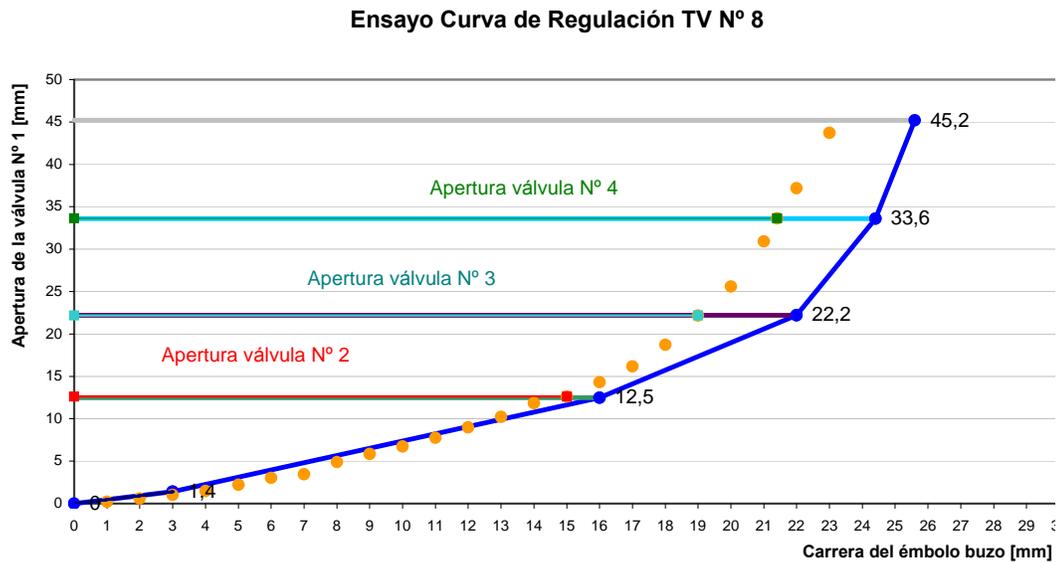


Figura 76. Trazado de la curva de Regulación TV N° 8

En el ensayo se graficaron los momentos de apertura de las válvulas N° 2, 3 y 4 en función del desplazamiento del émbolo de la válvula N° 1. Allí se observa que la apertura de dichas válvulas, se encontraba desfasada respecto a los valores de los parámetros correspondientes dados por el fabricante. Para modificar dicha curva, de modo de que la misma se aproxime a la del manual, la palanca asociada al émbolo buzo cuenta con los llamados “tetones” ya mencionados, que son salientes de material., sobre los cuales se puede modificar su altura (lima o relleno de soldadura) de acuerdo a los requerimientos necesarios para cumplir con lo mencionado.

A partir de los primeros resultados, se procedió a la calibración final (Fig. 77) de la apertura de válvulas, llevando a cabo el procedimiento ya mencionado.

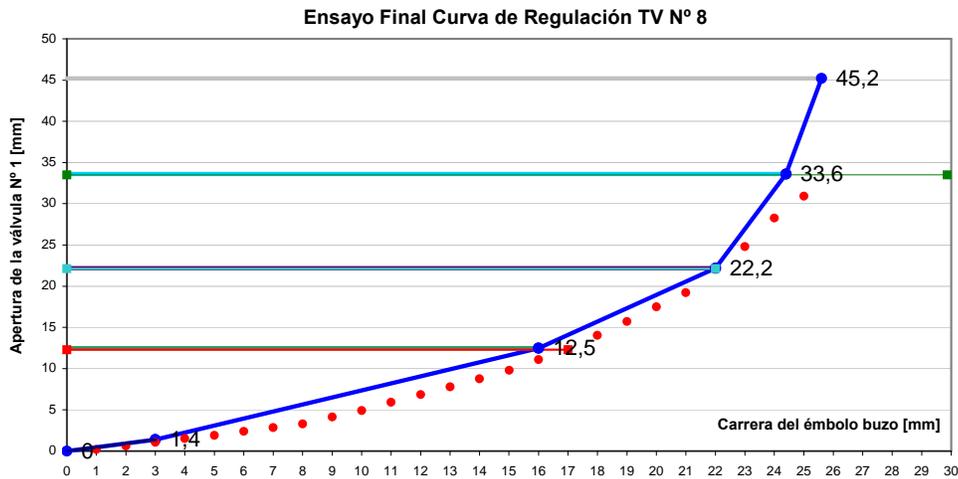


Figura 77. Trazado de la curva de Regulación final TV N° 8

Revisión de luces en varillajes

Por medio de esta tarea se busca eliminar las luces de todo el sistema de varillaje de distribución, energía y retorno. Esto implica un cambio, si es necesario, de bulones o bujes de unión de dichas varillas con el fin de mejorar el tiempo de respuesta de este sistema de control. Cabe aclarar que los movimientos efectuados por éste son prácticamente imperceptibles a la vista por lo que la presencia de luces afecta en gran cuantía su correcto funcionamiento.

Alternador

Los trabajos sobre el alternador comienzan cuando se haya concluido la etapa de alineación de los ejes de AP, BP y de aquel. Una vez esto el personal eléctrico dispone de la máquina para hacer todos los trabajos necesarios. El tiempo de duración de estos puede influir en la criticidad temporal del mantenimiento pero no en los trabajos pertinentes a la turbina, es por esto que el personal mecánico puede concluir sus tareas aunque falten ajustes en el alternador. Se trabaja en paralelo coordinando los tiempos de utilización del puente grúa.

En primera instancia se desmonta el rotor del alternador según procedimiento establecido por fabricante. Con antelación se debe tener desmontado el bloque excitatriz. Se extraen las tapas (externas), semi-tapas (internas) y sellos de la carcasa estatórica. Se retiran los cojinetes N° 5 y 6; y el pedestal de este último. Se extraen las paletas del ventilador, de ambos lados del rotor. Estas suman un total de cuarenta y cuatro; se debe tomar el recaudo, al montarlas nuevamente, de conservar la posición y orientación establecida original. De lo contrario se invertiría el rol de los ventiladores, o sea, se transformarían en extractores y como consecuencia directa se reduciría la eficiencia de refrigeración. Retirados los cojinetes, para mantener al eje en nivel se utiliza el puente grúa y el de sujeción. Una vez esto se monta el dispositivo para deslizar el rotor; el cual esta comprendido por un carrito (pipper) y su respectiva vía carrilera del lado excitatriz. También se colocan patines engrasados que se interponen entre el rotor y las chapas magnéticas del estator. Con asistencia de malacate tipo tiffor se tira horizontalmente hasta su extracción.

Una vez extraído el rotor y montado sobre caballetes se procede a la limpieza de este y del estator. Durante la misma se hace inspección visual de cuñas y se controla que no estén flojas. La probabilidad de que haya cuñas flojas es muy baja no por esto debe ser descuidada esta tarea. Refiriéndonos nuevamente a la limpieza debemos aclarar que esta es fundamental ya que revela defectos que debajo de ella se esconden y al mismo tiempo elimina contaminantes que afecten la resistencia de aislación de la máquina. La correspondiente al estator se lleva a cabo según el siguiente procedimiento:

1. Remoción de suciedad en seco con trapos
2. Limpieza con trapos embebidos en Stoodard Tens
3. Pulverización de aire seco.
4. Secado con trapos secos
5. Pulverización a presión de Saf-Sol
6. Remoción seca de suciedad de agujeros de ventilación con baquetas
7. Ídem 5 con baquetas embebidas en Saf-Sol
8. Pulverización de aire seco

El rotor se limpia de manera similar, respetando la secuencia seca y líquida, pero solo con Saf-Sol.

El estator se debe mantener calefaccionado durante la limpieza, y mientras se encuentre abierto, mediante fuente externa (calo-ventor) por sobre la temperatura de rocío. El rotor es calentado mediante la inyección de corriente continua (150 a 200 A) a través de los anillos rozantes, siempre y cuando sea necesario levantar el valor de resistencia de aislación, es decir para secarlo. Para el mantenimiento de la temperatura deseada, se cubre al rotor con carpa de lona y se coloca un caloventor en su interior. Con esto se logra que no condense el aire en su interior lo cual acarrea disminución de la resistencia de aislación y degradación de la máquina.

Los solventes de limpieza presentan las siguientes características:

- Stoodard Tens: es un detergente industrial removedor de manchas grasas, aceitosas, pelusas y partículas livianas entre otros. Es de gran volatilidad, posee rigidez dieléctrica baja y es de menor calidad que el Saf-Sol.
- Saf-Sol: es un solvente que actúa químicamente removiendo la suciedad, grasas, contaminantes y otros con gran eficiencia. Posee gran rigidez dieléctrica por ende puede usarse en máquinas en funcionamiento. Es no tóxico, evapora en forma lenta y uniforme y no es inflamable en su punto de ebullición.

Seguidamente a la limpieza, tanto del rotor como del estator, se inician las actividades de ensayos y ajustes sobre ambos. Las mismas pueden llevar a cabo en forma paralela.

Ensayos del Alternador

Los ensayos realizados al alternador son esencialmente de carácter eléctrico y se dividen en dos grupos, de acuerdo a la siguiente clasificación:

- Ensayos de planta: ejecutados por personal de mantenimiento de planta
- Ensayos de terceros: ejecutados por empresas contratadas

Los del segundo grupo son motivados por la no disponibilidad de instrumental de última tecnología, personal no calificado por norma para su ejecución o bien por la necesidad de certificado (garantía) de calidad.

Ensayos Estatóricos

Estado de aislación estatórica

Mayoritariamente son ejecutados por terceros y están ligados a establecer el diagnóstico del estado de la aislación estatórica mediante las siguientes mediciones:

1. *Resistencia de aislación – parámetros dieléctricos*
2. *Ensayo de saltos de tensión*
3. *Capacidad y tangente $\tan \delta$ en función de la tensión*
4. *Carga integrada y energía de las descargas parciales con el método del lazo*
5. *Descargas parciales como carga máxima aparente*
6. *Localización de descargas parciales con detector ultrasónico*

Normas de aplicación: IEEE 43-2000, REM 500, ASTM D3382, IEC 270.

Todos estos son de corta duración, del orden de horas. No son leyes ni condiciones necesarias y suficientes para la toma de decisiones como la declaración de la obsolescencia o rebobinado de la máquina, solo son criterios de evaluación que deben ser estudiados cuidadosamente antes de proceder a reparación u otros. Los distintos valores que de estos se desprenden no se consideran como absolutos sino que deben verse como relativos a ellos mismos y a los obtenidos en ensayos anteriores. Es por esto que es importante conocer la “partida de nacimiento” y los antecedentes o “historia clínica” del sistema de aislación antes de establecer conclusiones. La frecuencia de ensayo vigente es por lo menos un ensayo entre mantenimiento programados, además del que se debe hacer durante el transcurso de este. No necesariamente hace falta el desmontaje del rotor para su ejecución, salvo para la localización con detector ultrasónico de descargas parciales en ranuras. Puesto que se construye un historial con los resultados de los ensayos es recomendable que el prestatario del servicio sea único.

Los ensayos 1 y 2 se hacen con tensión continua de 5000 V que es el valor estandarizado para máquinas de tensión nominal mayor a 3300 V. Los electrodos del equipo de medición se conectan al borne de salida de la fase a ensayar (Terminal +) y a un bulón colocado en la carcasa (Terminal -).

Los ensayos 3, 4, 5 y 6 se hacen con tensión alterna de valores predefinidos e inferiores a la tensión nominal de ensayo. Esto se debe a que a tensión nominal la máquina podría sufrir un deterioro adicional al que recibe en servicio. Igualmente la misma norma establece para máquinas que no son nuevas, valores de ensayo conservadores para no provocar un envejecimiento adicional al que ya posee la aislación por su vida útil. A pesar de ser ensayos a tensión reducida los resultados que se obtienen son valederos a fin de establecer el estado del aislamiento. La tensión alterna se aporta a través de un circuito (Fig. 78) comandado por transformadores, variac e instrumento de medición.

La tensión máxima de ensayo equivale a la tensión de fase que es 7621 V la cual corresponde al 60 % de la tensión nominal de la máquina (13,2 KV). Durante las pruebas se regulan los valores de tensión con el variac y su valor se controla mediante voltímetro asociado a un transformador de medida con una relación de espiras de 120, por lo que para el valor máximo de ensayo se debe registrar una tensión de 65 V aproximadamente en el instrumento.

Se utiliza un amperímetro en el cable común para registrar los valores de intensidad de corriente de fuga, la cual no debe superar los 400 mA. A raíz de esto puede que la tensión de ensayo se deba limitar a valores inferiores a los deseados. Es poco común esto, pero puede pasar si la máquina no se encuentra libre de humedad o bien existiera un cortocircuito.

Otro de los instrumentos que se coloca es un amperímetro por cuestiones de protección del variac disponible en planta. Se debe limitar la intensidad de corriente a 13 A.

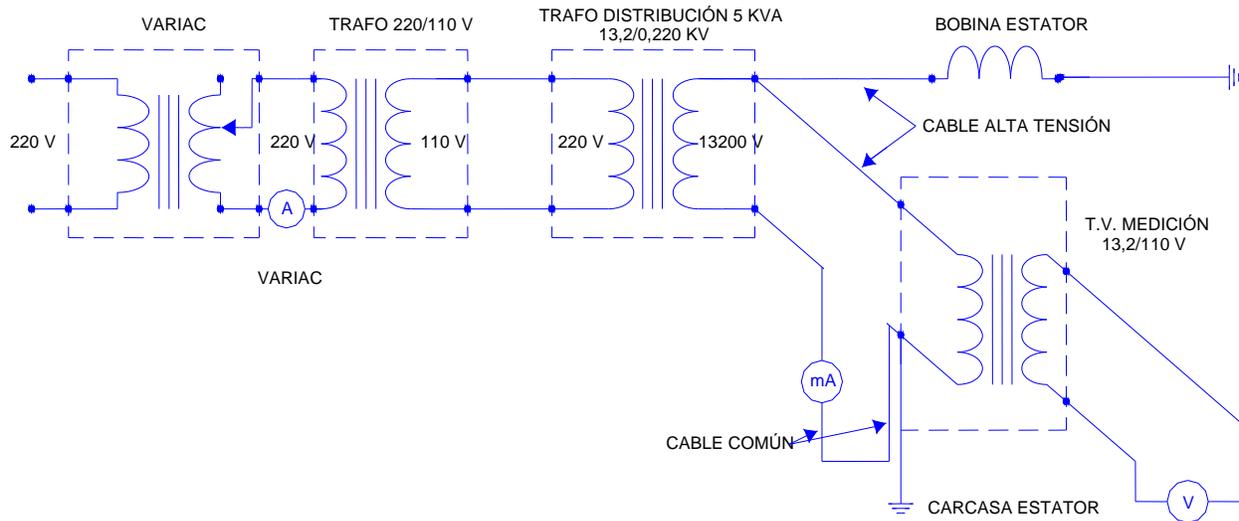


Figura 78. Circuito de alimentación para ensayos en C.A.

A continuación se hará una descripción, de cada uno de los ensayos, basada en los realizados por la empresa de Ingeniería en Mediciones CONIMED S.A., al alternador de la Turbina N° 7 correspondientes al 24 de septiembre del año 2003. En ese entonces los equipos de medición utilizados fueron:

- Megómetro AVO Megger modelo S1-5010 (Fig. 79) □ ensayos 1 y 2
- Analizador de pérdidas dieléctricas Conimed modelo DLA 16 (Fig. 80) □ ensayos 3, 4 y 5
- Detector ultrasónico Robinson Hostick □ ensayo 6



Figura 79. AVO Megger – S1-5010



Figura 80. Analizador DLA 16

1. Resistencia de aislación – parámetros dieléctricos

Consiste básicamente en la medición de la resistencia de aislación de cada una de las fases estáticas respecto a tierra. Con dichos valores se obtiene diversos parámetros dieléctricos para su comparación con estándares establecidos por norma. También se deben tener en cuenta las condiciones climáticas como temperatura y humedad ya que son magnitudes de influencia del ensayo.

El procedimiento de medición consiste en registrar los valores de resistencia para lapsos de 15'' durante el primer minuto y luego de 1' hasta los 10'. Se deben referir los mismos a la temperatura normalizada de 40° C (otra opción normalizada es de 20 °C) para su comparación con los estándares. También se registra el valor de capacidad. Este último es registrado una solo vez dado que el sistema aislante es asimilable a un condensador real, y como tal, presenta una capacidad que es prácticamente constante en el tiempo.

Para un mejor entendimiento del ensayo definimos los siguientes conceptos y parámetros:

Resistencia de aislación (R_{ais}): tras la aplicación de un escalón de tensión continua (E) es aquella resistencia que se opone al paso de la corriente total de pérdidas. Su valor se obtiene de acuerdo a la ley de Ohm como:

$$R_{ais} [M\Omega] = \frac{E[V]}{I[mA]}$$

Cabe destacar que esta resistencia esta fuertemente ligada a los procesos de conformación del material aislante, tipo Micadur clase F en sendos alternadores, y a su geometría. En los procesos de extrusión o moldeado de los aislantes, no siempre es posible evitar la presencia de burbujas o discontinuidades causadas por diversos factores difícilmente controlables. Las cavidades (vacuolas) pueden producirse también por esfuerzos de flexión a raíz del transporte y/o instalación del mismo. Dicha resistencia varía directamente con el espesor e inversamente proporcional con el área de la superficie conductora; y es dependiente de la temperatura, humedad y de la presencia de contaminantes. Normalmente el valor se expresa en millones de Ohms [M] dado que la corriente total que toma el aislante es del orden de los miliamper [mA]. Esta corriente esta compuesta por la suma de cuatro componentes dos de carácter constantes y dos que tienden a cero con el tiempo. Por este motivo es ensayo se basa en obtener la característica de R_{ais} en el tiempo

- **Índice de polarización (IP):** es un parámetro adimensional que se obtiene por el cociente entre las resistencias de aislación de 10' y 1'.

$$IP = \frac{R_{ais10'}}{R_{ais1'}}$$

- **Índice de absorción (I_{abs}):** es un parámetro adimensional que se obtiene por el cociente entre las resistencias de aislación de 1' y 30''.

$$I_{abs} = \frac{R_{ais1'}}{R_{ais30''}}$$

- **Constante de tiempo:** es el producto de la capacidad y la resistencia de aislación de 1'. Se expresa en segundos.

$$Cte\ de\ tiempo[seg] = R_{ais1'} \times C$$

Los dos primeros parámetros son indicativos del grado de sequedad (humedad), integridad física y limpieza (contaminación) del aislamiento. El tercer parámetro permite evaluar la

velocidad de crecimiento de la R_{ais} en el proceso de polarización del dieléctrico. El de mayor utilización es el IP.

Conocidos estos conceptos procedemos a ejemplificar la situación propuesta para la cual los datos generales de ensayo son los siguientes:

- Tensión de ensayo = 5000 V
- Tensión final 5062 V
- Temperatura ambiente = 17,4 ° C
- Temperatura elemento = 40 ° C
- Humedad relativa = 61,1 %
- Temperatura de rocío = 9,9 ° C

Los valores de resistencia de aislamiento y capacidad (Tabla 16); y los parámetros dieléctricos (Tabla 17) son procesados por el mismo equipo de medición, Megger S1-5010. Éste ejecuta las pruebas de forma automática, almacena los resultados, realiza los cálculos y las graficas de interés. Puede ser conectado a PC para la descarga de mediciones o bien para su visualización en tiempo real.

Tiempo		Resistencia [M]		
		Fase R	Fase S	Fase T
1° min.	15 seg.	1930	743	708
	30 seg.	736	727	712
	45 seg.	1070	1050	1080
	60 seg.	1390	1380	1390
2 min.		2550	2420	2560
3 min.		3570	3310	3570
4 min.		4470	4090	4480
5 min.		5320	4810	5310
6 min.		6070	5450	6070
7 min.		6820	6040	6750
8 min.		7540	6570	7410
9 min.		8210	7130	8050
10 min.		8880	7600	8650
Capacidad [μ F]		0,22	0,21	0,21

Tabla 16. Mediciones registradas – Fases estáticas TV N° 7

Parámetros dieléctricos	R	S	T
Índice de polarización	6,39	5,51	6,22
Índice de absorción	1,89	1,90	1,95
Constante de tiempo	305,8	289,8	291,9

Tabla 17. Parámetros dieléctricos

El diagnostico del estado de las distintas fases estáticas se hace según las siguientes clasificaciones normalizadas:

Clasificación de estado - IP			Clasificación de estado - Iabs		
	Peligroso	<1		Peligroso	<1,1
1<	Cuestionable	<1,5	1,1<	Cuestionable	<1,25
1,5<	Aceptable	<2	1,25<	Aceptable	<1,4
2<	Bueno	<3	1,4<	Bueno	<1,6
3<	Muy bueno	<4	1,6<	Muy bueno	
4<	Excelente				

Cuanto mayor sea el valor de la constante de tiempo mejor será el estado del sistema de aislación y se clasifica de la siguiente manera:

Estado del Sistema de aislación

	Malo	< 100''
100'' <	Satisfactorio	< 2000''
2000'' <	Bueno	

Otro dato de referencia para el análisis del sistema de aislación de máquinas de tensión nominal entre 13 a 16 KV arroja una constante de tiempo entre 113 a 902 segundos. Este resulta de un estudio, a nivel mundial, de generadores a lo largo de 30 años.

También se especifica el valor mínimo de resistencia de aislación para la puesta en servicio que es de 100 MΩ correspondiente a un tiempo de ensayo de 10' y referido a 40 ° C. Este valor es establecido, en protocolo, por el fabricante y es superior al propuesto por las normas vigentes que establecen un mínimo de 14,2 MΩ de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R_{ais} [M\Omega] = 4 \times (13,2KV + 1) \rightarrow a 20^{\circ}C$$

Para referir este valor al correspondiente a 40 ° C se lo debe afectar por un coeficiente de corrección cuyo valor es de ¼ según ábaco.

La diferencia de valores esta basada esencialmente en que las normas apuntan a garantizar la seguridad de las personas y el fabricante pone mayor énfasis en el equipo.

Es muy importante que el valor de R_{ais} medido sea superior al mínimo puesto que de no ser así no se podría hacer una lectura correcta de los índice dieléctricos. Al ser estos del tipo cocientes adimensionales se podrían obtener parámetros dentro los aceptables pero con valores de R_{ais} bajos con lo que se incurriría a un peligroso error si se aceptara un buen estado de la aislación solo a partir de dichos parámetros.

A su vez se grafica la relación entre el cociente de las resistencias de aislación y la de 1' en función del tiempo (Fig. 81), para el análisis de la tendencia temporal de dicho cociente. El aislamiento se encuentra en buen estado cuando el diagrama es una línea recta que aumenta apreciablemente con el tiempo de ensayo. El deterioro propio, carbonización, excesiva humedad y/o contaminación conducen a una recta de suave pendiente con tendencia a aplanarse en el transcurso del ensayo. Se asume que este aplanamiento es real pero a partir de los diez minutos o más debido a la anulación de las corrientes que dependen del tiempo.

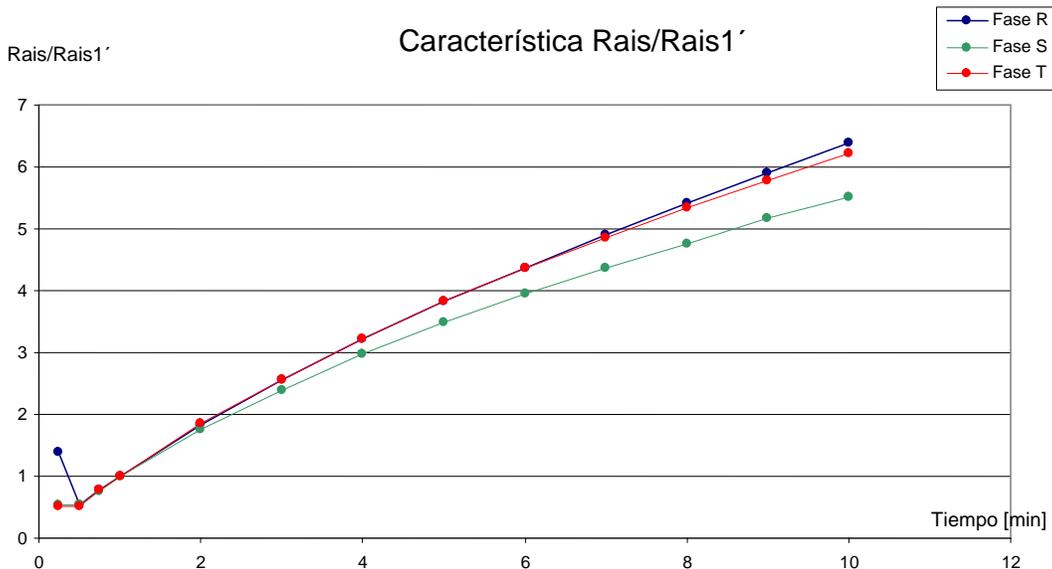


Figura 81. Característica Rais/Rais1' - arrollamiento estático TV N° 7

Análisis de resultados

- La resistencia de aislación mínima fue superada ampliamente en cada una de las fases y además fue del orden de los Giga Ohm que es lo que se espera de estas clase de máquinas
- Los parámetros IP e I_{abs} fueron los óptimos en todos los casos
- Los valores de constante de tiempo están dentro del rango satisfactorio
- La tendencia de la grafica fue de pendiente positiva sin insinuación al aplanamiento
- La fase R presento una anomalía en el inicio de la medición, pero fue atribuida a una falla en el método de medición, dado que los valores siguientes respetaron la tendencia esperada

De acuerdo a estos criterios la máquina soporto las pruebas con éxito, concluyéndose que estaba seca al momento del ensayo. Por esto se dedujo que los posteriores ensayos no se verían afectados por el factor humedad.

2. Ensayo de saltos de tensión

Esta prueba depende del principio que establece que un aislamiento ideal producirá lecturas idénticas de resistencia de aislamiento para todas las tensiones. Es un ensayo que se realiza en forma automática, por el AVO Megger S1-5010, y consiste en el aumento de la tensión de ensayo en intervalos discretos de 1000 V por minuto hasta llegar a 5000 V. Se registra la R_{ais} por cada quince segundos por cada intervalo de tensión.

Para este ensayo las magnitudes de influencia fueron las mismas que en el ensayo de resistencia de aislación. Los valores obtenidos (Tabla 18) se grafican (Fig. 82) para una mejor interpretación de los resultados. Solo se detallan los correspondientes al minuto de aplicación del escalón de tensión.

Medición de resistencia de aislación [$M\Omega$]			
Tensión [V]	Fase R	Fase S	Fase T
1000	1390	1140	5170
2000	1660	1520	2980
3000	1900	1810	2880
4000	2150	2050	2890
5000	2350	2260	2990

Tabla 18. Mediciones registradas

La teoría establece que un aislamiento que presente puntos débiles, presenta valores inferiores a tensiones más elevadas, esto se traduce en una pendiente negativa de recta graficada.

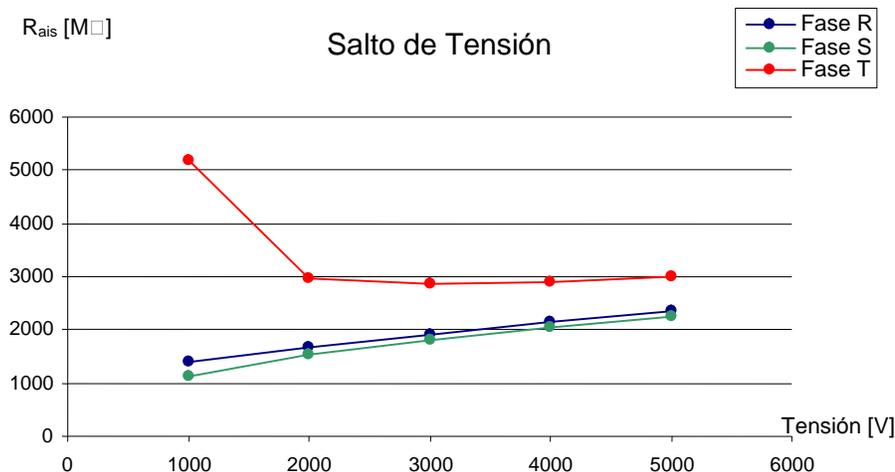


Figura 82. Diagrama de salto de tensión - arrollamiento estático TV N° 7

Análisis de resultados

- La resistencia de aislación mínima fue superada ampliamente en cada una de las fases y además fue del orden de los Giga Ohm
- La fase T presenta valores de resistencia mayores a las otras dos pero contrariamente tiene una tendencia a disminuir a más altas tensiones
- El valor de R_{ais} correspondiente a 1000 V fue muy elevado pero se atribuyo esto a una falla en el método de medición

Según este criterio la aislación de la fase T entró en degradación a pesar de que conserva una elevada resistencia de aislamiento.

3. Capacidad y tangente δ en función de la tensión

Las pérdidas dieléctricas están definidas como la pérdida de potencia eléctrica a través de los aislantes. Por este fenómeno se verifica la existencia de una corriente de fuga la cual calienta al material aislante derivando en la disminución de su resistencia.

En conductores, máquinas y demás artefactos eléctricos el caso más favorable de aprovechamiento de la potencia disponible se obtiene cuando:

$$P = U \times I \times \cos \varphi = U \times I \rightarrow \cos \varphi = 1 \rightarrow 0^\circ$$

Esto es decir que la tensión y la intensidad de corriente están en fase.

En un aislante se deduce por idéntica razón que el caso más favorable es aquel en que la potencia perdida a través del dieléctrico es nula, o sea:

$$P = U \times I \times \cos \varphi = 0 \rightarrow \cos \varphi = 0 \rightarrow 90^\circ$$

Éste caso corresponde a la idealización que se manifiesta solo en el vacío. En la práctica se producen pérdidas cuyo valor es muy reducido y es proporcional a la $\text{tg } \delta$. Los ángulos δ y α son complementarios (Fig. 83). Al ángulo δ se lo denomina ángulo de pérdidas y se deduce que $\text{tg } \delta = \cos \alpha$.

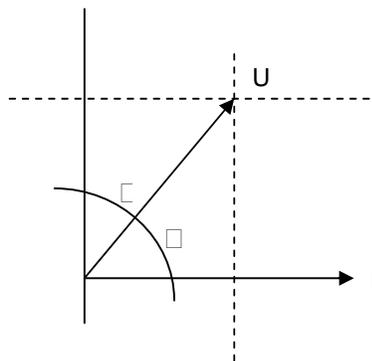


Figura 83. Factor de pérdidas

La $\text{tg } \delta$ es otra de las medidas de las pérdidas eléctricas del sistema aislante. Por medio de esta se evalúa su condición y calidad; revela contaminación, fracturas y perforaciones; y defectos propios del envejecimiento. En un material aislante interesa que las pérdidas dieléctricas sean mínimas por ende el valor de la $\text{tg } \delta$ debe ser lo más pequeño posible.

A bajas tensiones se puede determinar el envejecimiento y estado del aislante. A medida que se va aumentando la tensión las pronunciadas variaciones de la $\text{tg } \delta$ indican generalmente la presencia de descargas parciales en el volumen del material, también podrían llegar ser superficiales de misma intensidad. Se hace hincapié en que los valores obtenidos (Tabla 19) deben ser considerados como relativos a otros; es por esto que se calculan las variaciones de los mismos para las distintas tensiones de ensayo predefinidas.

Fase	Tensión		Capacidad y tangente δ			
	U/Un	U	C	C/C	tg δ	tg δ
			[nF]	[%]	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$
R	0,2	2640	187,0	/	48,3	/
	0,4	5280	190,2	1,71	58,4	10,1
	0,6	7920	193,0	3,21	64,3	5,9
S	0,2	2640	185,8	/	46	/
	0,4	5280	189,0	1,72	56,4	10,4
	0,6	7920	192,2	3,44	63	6,6
T	0,2	2640	185,0	/	50,2	/
	0,4	5280	188,3	1,78	60,8	10,6
	0,6	7920	192,0	3,78	67,7	6,9

Tabla 19. Capacidad y tg δ

El valor más representativo del ensayo es el de tg δ y sobretodo su variación con la tensión (Fig. 84). También se deben tener en cuenta los valores obtenidos en ensayos anteriores. Para este tipo de máquina los valores típicos son:

- tg δ al 20% de Un $\approx 40 \times 10^{-3}$
- δ tg δ del 20% al 60% Un $\approx 5 \times 10^{-3}$

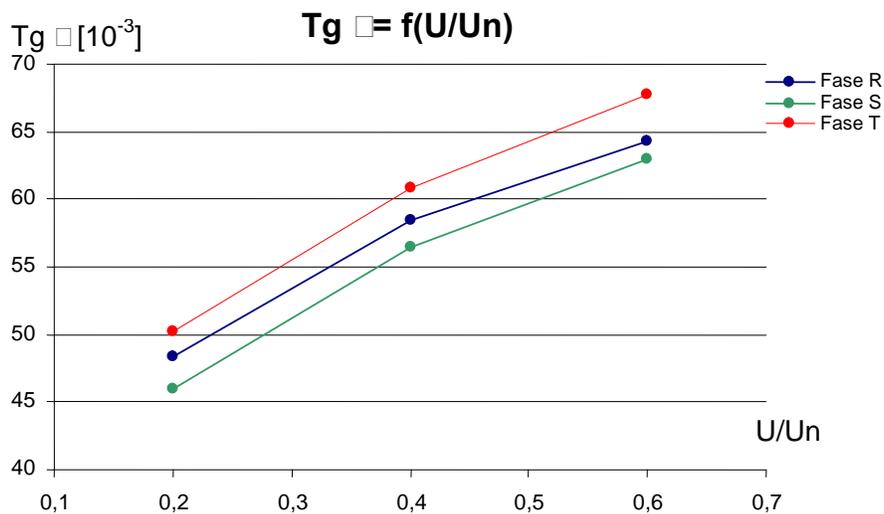


Figura 84. Resultado ensayo Tg δ

Análisis de resultados

- Los valores de $\tan \delta$ fueron superior a los normalizados y mayores a los de ensayos anteriores
- La curva de tangente de delta en función de la tensión muestran una forma anómala ya que a partir de 0,4 Un disminuye su pendiente. Esto da a saber que a esa tensión ya estaban encendidas las descargas parciales en las vacuolas interiores de la aislación.

Se sostuvo que el material aislante se estaría degradando pero la pronta ignición de las descargas parciales oculto la verdadera información que se desea obtener de este ensayo.

4. Carga integrada y energía de las descargas parciales con el método del lazo

Las descargas parciales son pequeñas descargas que cortocircuitan parcialmente el material aislante entre conductores. Estas se presentan cuando los pequeños volúmenes de gas o aire dentro del aislante se ionizan formando un arco eléctrico microscópico disminuyendo de tal forma el poder dieléctrico de dicho material. Este mecanismo de degradación está ligado a las imperfecciones físicas del material en donde se puede provocar la concentración del campo eléctrico y con ello la aparición de estas descargas.

La carga integrada y la energía de las descargas parciales por ciclo son magnitudes integrales que se determinan con el método del lazo o paralelogramo, descrito en la norma ASTM D3382. Caracterizan el estado general de deterioro de la aislación. La forma del lazo (Fig. 85), visualizada en osciloscopio, permite obtener conclusiones sobre la naturaleza de las descargas y el seguimiento de su variación a lo largo del tiempo permite analizar el envejecimiento de la aislación.



Figura 85. Formas típicas de los lazos visualizados en osciloscopio

Una vez dispuestas las condiciones para el inicio del ensayo se debe seleccionar la capacidad de rango (Cs). Para el nivel de tensión de estas máquinas corresponde un valor de 150 kV. Los pulsos de descargas producidos cada medio ciclo se integran en dicho capacitor de tal manera que la diferencia de potencial obtenida, entre sus dos terminales, se aplica a un osciloscopio a través de un amplificador. Al ejecutar las mediciones se debe ajustar la escala (Fig. 86) del osciloscopio para luego poder traducir el ancho del lazo en centímetros a voltios. El ajuste se hace tal que la amplitud máxima horizontal ($2 \times 2 \times U_n$) corresponda a diez centímetros. Verticalmente se centra en su parte media.

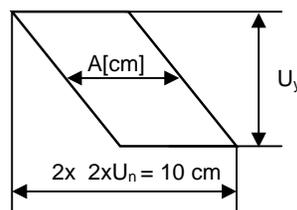


Figura 86. Ajuste de escala

Establecido el lazo se registra el ancho del mismo y su amplitud vertical [Uy]. Con estos se calcula la carga integrada (I) y la energía de las descargas parciales (II) de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$I. Q[\mu C] = U_y[V] \times Cp[\mu F]$$

$$II. E \frac{[\mu J]}{[pF]} = A[V] \times \frac{Q[\mu C]}{Cx[\mu F]} \times 10^{-6}$$

La energía de las descargas parciales es proporcional al área del lazo.

En base al ensayo realizado en aquella oportunidad se confecciona planilla de calculo (Tabla 20) con los valores registrados y los derivados; el ítem trazo en una codificación propia de la empresa prestataria del servicio para poder asociar los valores relevados a sus respectivas imágenes obtenidas en el osciloscopio. Con respecto a la capacidad destacamos que es la correspondiente al 20 % de la tensión nominal, debido que a esa tensión se posee una medición de la capacidad con mayor certeza dado que la actividad de las descargas parciales en menor y dicho valor es alterado por las estas. La tensión de ensayo fue del 60 % de la nominal.

Fase	Tensión		Método del Lazo							
			A	A	Uy	Cx(0,2)	Q	Trazo	Q/Cx	E
	U/Un	U	[cm.]	[V]	[V]		[nC]		[nC/pF]	[nJ/pF]
R	0,6	7920	6,0	13440,7	0,7031	187,0	105,47	7	563,98	7,58
S	0,6	7920	6,0	13440,7	0,7344	185,8	110,16	5	592,90	7,97
T	0,6	7920	6,0	13440,7	0,7969	185,0	119,54	3	646,14	8,68

Tabla 20. Método del lazo

El valor de mayor importancia para realizar el diagnostico del estado de la aislación es el de la energía de las descargas en función a la siguiente clasificación:

- E [nJ/pF]
- 4 □ Bajo
- 20 □ Moderado
- 50 □ Alto

Se reconoce internacionalmente que para un 60% de la tensión nominal la energía de perdidas se encuentra generalmente alrededor de 0,1 a 12,5 nJ / pF ciclo.

En el osciloscopio se detectaron las formas de lazos esperadas. En el lazo de la fase S (Fig. 87) se puede apreciar en la grilla el ancho total del lazo de diez cuadrados de 1 cm o sea los 10 cm buscados y el ancho "A" en este caso 6 cm.

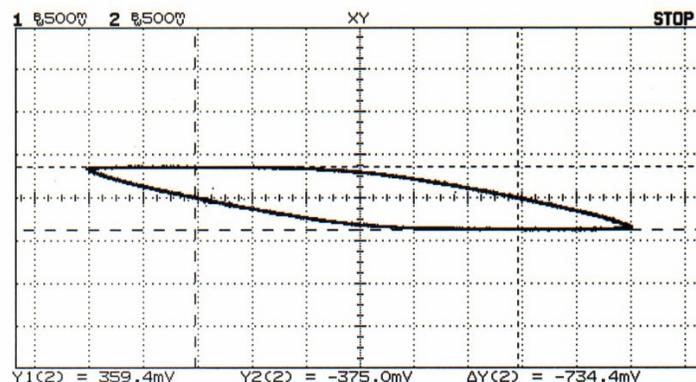


Figura 87. Método del Lazo a 0,6 Un (7920 V) – Fase S

Análisis de resultados

- Los valores de energía fueron aceptables, pero mayores a ensayos anteriores
- La fase T presento valores de energía mayor a las otras dos
- La forma de los lazos fue la esperada, del tipo paralelogramo, en las tres fases

Se sostuvo que la aislación entro degradación, y en particular la fase T

5. Descargas parciales como carga máxima aparente

La medición de la carga máxima aparente sirve para cuantificar las descargas de elevado valor originadas en grandes vacuolas. Esta medición no provee la caracterización más adecuada puesto que esta influenciada por las características propias de la máquina, si la tenemos en cuenta como una red de inductancias y capacidades. Pierde valor frente al método del lazo pero su ejecución no deja de ser útil para los fines necesarios.

Previo a su ejecución efectúa la calibración por la cual se inyecta, mediante un generador de pulsos de corriente, un valor de carga conocida (q_c) que establece una amplitud (U_c) en la pantalla del osciloscopio y con esto queda determinada la sensibilidad del equipo. Una vez esto se procede al ensayo de cada fase, con valores de tensión reducida, registrándose las deflexiones en los diferentes casos. Por simple multiplicación de este valor con el de sensibilidad se obtiene la carga máxima aparente (Tabla 21).

En aquella oportunidad la deflexión en el osciloscopio fue de 114 mV para una carga de calibración de 10 nC. Se registran las imágenes en el osciloscopio (Fig. 88), además de los valores ya mencionados.

Fase	Tensión		Descargas Parciales			
			h	Trazo	sensibilidad	q
	U/Un	U	[mV]		[nC/mV]	[nC]
R	0,4	5280	220,0	6	10/114	19,30
	0,6	7920	380,0			33,33
S	0,4	5280	200,0	4, 8		17,54
	0,6	7920	375,0			32,89
T	0,4	5280	210,0	2		18,42
	0,6	7920	380,0			33,33

Tabla 21. Descargas parciales

Internacionalmente se reconoce que para este tipo de máquinas un valor de carga máxima aparente es de 10 a 12 nC correspondiente al ensayo con tensión reducida del 60 % del valor nominal.

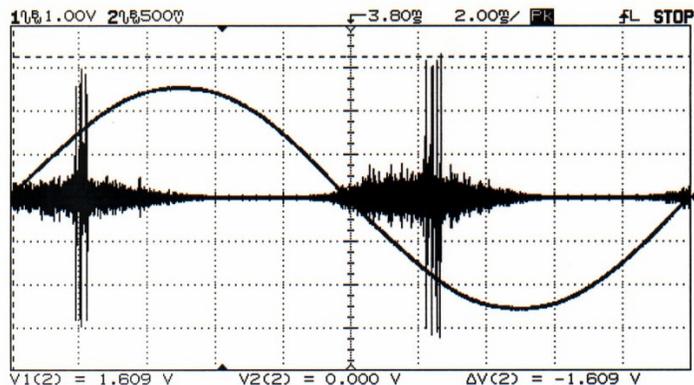


Figura 88. Descargas parciales – Fase S

Análisis de resultados

- La magnitud de las descargas fueron similares en las tres fases pero de elevado valor, del orden de los 380 mV para tensión de ensayo al 60 % de la nominal
- La fase S presento descargas aisladas de elevado valor $\approx 1,69$ V
- Las otras fases no presentaron particularidades

Dada la existencia de aquellas descargas de elevado valor en la fase S se recomendó su localización con detector ultrasónico.

6. Localización de descargas parciales con detector ultrasónico

El detector ultrasónico Robinson Hostick es un indicador de la intensidad de las descargas parciales en decibelios. Es un captador similar a un sistema micrófono-parlante que sirve para localizar espacialmente las descargas. Se utiliza tanto en cabeza de bobinas como en zona activa de los arrollamientos, sin la necesidad de que estén retiradas las cuñas.

El ensayo se realiza con valores reducidos de tensión y el detector es manipulado mediante una pértiga para comandar el equipo a distancia y así evitar descargas eléctricas a través del personal encargado de su uso.

Análisis de resultados

- Particularmente se localizaron descargas parciales en atadura de cabeza de bobina correspondiente a la Fase S

Conclusiones generales

La aislación de la máquina esta ingresando en una etapa de degradación. Se sugirió:

- Realizar una limpieza de mayor intensidad en atadura de Fase S seguido de reparación mediante pintura
- Hacer una inspección del aislante por debajo de las cuñas retirando solo algunas de ellas

Trabajos en Atadura Fase S

Localizadas puntos débiles del material aislante se procedió a una limpieza más específica, la cual es considerada artesanal.

El tiempo de duración de esta tarea es de 20 a 30 días según la cantidad de desvíos encontrados. A pesar de que se focalizan los trabajos sobre los puntos con particularidades, esta limpieza se hace sobre todo el estator. Con esto se logra también disminuir la intensidad de las descargas generalizadas.

Por medio de esta tarea se retira suciedad depositada entre cruces de bobinas y ataduras con cepillos de pequeño tamaño, similares a los utilizados por dentistas, levantando levemente las ataduras donde haga falta. Por ultimo se pinta el conjunto con pinturas semiconductoras y conductoras respectivamente.

Repetición de ensayos

Realizados los trabajos pertinentes se repitieron los ensayos. Se destacó el de carga aparente para visualizar (Fig. 89) los efectos de la limpieza localizada.

Las elevadas descargas que habían aparecido en un principio fueron eliminadas quedando la máquina habilitada para la puesta en servicio con la aclaración de tener en cuenta las recomendaciones ya mencionadas.

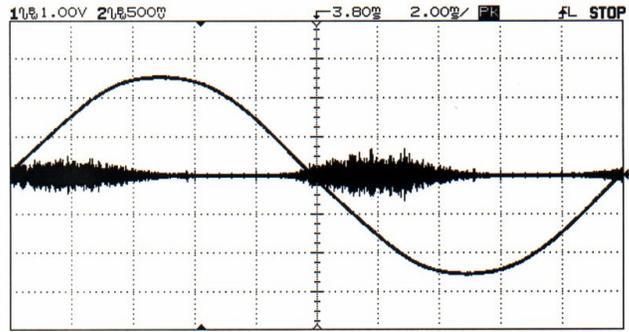


Figura 89. Descargas parciales posterior reparación – Fase S

Ensayo de planta

Aprovechando la instalación del sistema de alimentación de corriente alterna personal eléctrico monta estructura metálica y cubre la carcasa con lonas. Con esto se logra oscurece el estator para poder apreciar visualmente las descargas eléctricas existentes.

Este ensayo se hace para observar las descargas parciales que logran salir a la superficie. El detector ultrasónico da la información de la ubicación e intensidad de las mismas pero no otorga información exacta acerca su carácter, visibles o audibles.

Esta prueba puede ser ejecutada a medida que se va realizando la “limpieza artesanal” con el objeto de apreciar los resultados parciales de esta.

Estado magnético del núcleo

A pesar de que la mayoría de los ensayos estatóricos están basados en el análisis del estado del aislamiento no hay que descuidar el estado del núcleo. Para este fin se hace un diagnóstico basado en las pérdidas magnéticas del mismo. La frecuencia de realización de esta prueba en menor que correspondiente al “Mantenimiento Programado” y es un trabajo mercerizado.

Las normas IEEE establecen que los niveles máximos tolerables son de 100 mA de corriente de pérdida, en cuadratura con la corriente que genera un flujo de inducción al 4% de 1 Tesla.

Las pérdidas magnéticas aparecen en los materiales de estas características por dos motivos: histéresis y corrientes parasitas. Se manifiestan cuando una masa magnética esta sometida a un campo variable o bien cuando el campo sea constante pero las masas estén en movimiento. Ambas se expresan de la siguiente manera:

- $P_{his} [W / Kg] = k \times f \times B^2$
- $P_{par} [W / Kg] = k' \times f^2 \times B^2$

Para este ensayo se magnetiza el núcleo a través del mismo circuito de alimentación de C.A usado en los ensayos del estado de aislación estatórica, el valor de tensión aplicada es tal que se obtenga el flujo de inducción al 4 % de un Tesla. El equipo de medición utilizado se denomina “El CID” y es justamente un detector de pérdidas magnéticas. Esencialmente consta de una bobina con la cual se recorre cada ranura en toda su longitud y por medio de amperímetro se detecta la corriente de fuga. Necesariamente debe estar el rotor extraído.

A modo de ejemplo mencionamos las mediciones realizadas el 27 de Julio de 1999 por la empresa ALSER S.R.L al generador N° 8. En aquella oportunidad las corrientes de fugas (Fig. 90) resultaron menores al límite tolerable. Se recomendó realizar nuevamente el mismo solo en caso de un reacuñado o bien ante la presencia de un cortocircuito que dañe el núcleo.

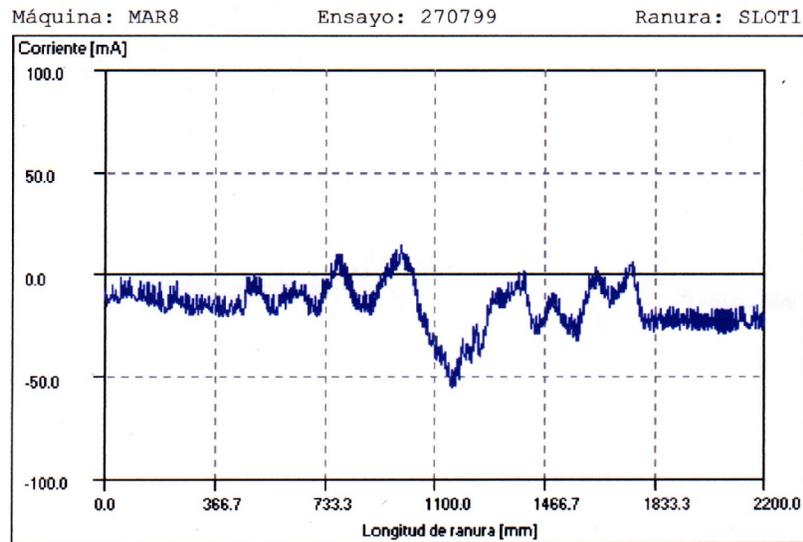


Figura 90. Corriente de fuga en núcleo

Ensayos rotóricos

Con el rotor posado sobre los caballetes y la limpieza ya ejecutada se procede a los ensayos pertinentes.

Debido a que el presente informe está vinculado a las tareas propias del mantenimiento programado, en primera instancia queda de lado cualquier trabajo correspondiente a fallas intempestivas. Estas pueden ser cortocircuitos entre espiras, o entre espira y cuerpo rotórico o rotura de calotas. Debemos resaltar que las máquinas eléctricas son de gran fidelidad y que a lo largo del tiempo las posibles fallas que se han presentado fueron por casos puntuales. Con esto queremos aclarar que es muy baja la probabilidad de que las turbinas de vapor queden fuera de servicio por una falla eléctrica inesperada en el rotor. Igualmente cualquier trabajo extraordinario, en lo que respecta a los realizados durante la ejecución de un mantenimiento programado, puede ser programado sin que se vean afectadas temporalmente las tareas en la turbina y el regulador, pero si la fecha de finalización del mantenimiento total.

Inspección visual

Mediante esta se buscan desvíos como golpes o marcas en gorriones, anillos rozantes, calotas y cuerpo en general. Esta tarea está encargada por personal de planta.

Se hace una inspección interna de las calotas, sin extraerlas, con asistencia de espejos. El objeto es revisar el estado de las ataduras, de cintas de fibra de vidrio, de los aislantes frontales de cabeza de bobinas. El alcance de esta inspección es parcial. En caso de encontrar ataduras rotas se deben extraer las calotas para reponerlas.

Ensayo de Calotas

Están basados en la determinación del estado estructural de las mismas. Para esto se contrata a una empresa certificada por norma, para ejecución de inspección ultrasónica y líquidos penetrantes.

La inspección ultrasónica se hace sobre todo el diámetro exterior de la superficie de cada calota y tiene como alcance la determinación de fisuras en su volumen. Se pone mayor énfasis en las zonas cercanas al encastre por ser estas las de mayor sollicitación lo que conlleva a un aumento de la probabilidad de que existan micro-fisuras.

No solo se focaliza el análisis de las fisuras basándose en su tamaño sino también en su orientación y evolución en el tiempo. Que crezcan en tamaño, en cantidad y que haya varias sobre una misma recta son clara inminencia de un futuro colapso.

Terminada la inspección ultrasónica se limpian las calotas con acetona para proceder al ensayo de líquidos penetrantes sobre la superficie exterior.

En caso de encontrar fisuras se extraen las calotas para ejecutar este último ensayo sobre la superficie interior de las mismas.

Los antecedentes marcan fisuras en superficie exterior del orden del centímetro de largo y unas décimas de profundidad, no alineadas. La eliminación de estas consta de un pulido fino.

Ensayo de anillos rozantes

Se miden seis diámetros exteriores de cada anillo rozante para verificar que no haya ovalización o deformación. El diámetro original de fábrica es de 400 mm.

Entre mantenimientos programados la diferencia de diámetros pueden llegar a ser del orden de la décima de milímetro. Se ha tenido que rectificar alrededor de medio milímetro en el diámetro. Este valor es referencial y no solo depende de la cantidad de horas de marcha sino también de las condiciones de funcionamiento por lo que no puede establecerse rigurosamente una tasa de desgaste.

El beneficio que acarrea esta corrección es la disminución de una de las fuentes de desbalanceo.

Ensayos eléctricos

Son ejecutados por personal de planta y consisten esencialmente en la medición de la resistencia de aislación, medición de resistencia e impedancia de bobinas.

Para la medición de impedancia se utiliza tensión de ensayo alterna. Se aplica entre anillos y se varía hasta obtener una intensidad de corriente de 3 A, se mide la tensión y por la siguiente expresión se calcula la impedancia total del bobinado rotórico:

$$Z_T [\Omega] = \frac{U[V]}{3A}$$

Para la medición de resistencia se utiliza tensión de ensayo continua. Se aplica entre anillos y se varía hasta obtener una intensidad de corriente de 10 A, se mide la tensión y por la siguiente expresión se calcula la resistencia total del bobinado rotórico:

$$R_T [\Omega] = \frac{U[V]}{10A}$$

En protocolo se fija un valor de $R_T = 0,12746 \Omega$ referido a 18,2 ° C. Este valor no presenta indicaciones significativas a lo de la vida útil del generador pero si un leve aumento no alarmante.

Según las últimas mediciones (05/2006) $R_T = 0,1334 \Omega$ a 18,6 ° C.

Se registran los valores de resistencia de aislación de un minuto con tensión de ensayo de 500 V. En este caso el valor mínimo referido a 20 ° C es de 100.000 Ω .

La medición se hace entre cada anillo y carcasa. Los valores típicos registrados son del orden de los 20 G Ω . Se debe tener en cuenta la temperatura de cuerpo de rotor y el grado de sequedad del mismo.

Balanceo rotor

A diferencia de los ejes de AP y BP, el eje rotórico no sufre grandes desgastes. Por este motivo no necesariamente se debe balancear dicho eje entre mantenimientos programados. Hay que tener en cuenta que con el rectificado los anillos rozantes se logra disminuir el desbalanceo residual existente. La suciedad también puede ser causa de desbalanceo sobretodo la depositada en los agujeros de ventilación en el cuerpo rotórico. Si esta suciedad no permite el correcto pasaje del aire se van a producir zonas de puntos caliente donde el material se dilata en distinta medida de lo normal y esto derivara en vibraciones excesivas durante el funcionamiento en servicio. Se entiende entonces que por medio de la limpieza se logra disminuir otra de las fuentes de desbalanceo.

Por último mencionamos que la extracción de calotas es condición necesaria y suficiente para recurrir a la ejecución del balanceo dinámico del eje.

Extracción de calotas

De ser necesario esta tarea puede ser ejecutada por personal de planta o terceros de acuerdo a necesidad.

El procedimiento de extracción de calotas es en caliente y responde a la siguiente secuencia:

- Se colocan zunchos de acero, sobre el diámetro exterior de la calota, con termocuplas para la medición de la temperatura durante el calentamiento
- Se retiran chavetas de sujeción radial
- Se calientan las calotas con mantas térmicas (Fig. 91) (*)
- Se eleva la temperatura a razón de 70 ° C por hora, hasta alcanzar los 350 ° C de temperatura superficial exterior promedio
- Se deja reposar por 10´ la calota con el objeto de homogeneizar la temperatura exterior
- Se coloca dispositivo de extracción (Fig. 92)
- Se gira la calota, en el mismo sentido que el arrollamiento amortiguador, hasta que se verifique la no interferencia de los dientes de encastre
- Se retira calota

(*) En su defecto con equipo de oxígeno – acetileno a través de picos de soplete.



Figura 91. Calentamiento con manta térmica



Figura 92. Sistema hidráulico de extracción

El tiempo de extracción según este procedimiento promedia las 5 horas. Se puede aumentar la intensidad de calentamiento para reducir este tiempo, pero se hace más difícil el control de la uniformidad en el calentamiento. La situación deseable es que el calentamiento sea lo más corto posible para minimizar el deterioro correspondiente a los esfuerzos térmicos.

Teniendo en cuenta que la extracción se lleve a cabo por cuestiones de inspección interna con líquidos penetrantes, se aprovecha el desmontaje para la ejecución de otras tareas.

Se renuevan la aislación y ataduras de cabeza de bobinas. Se limpian las mismas, en donde se puede encontrar polvo de color verdoso que es propio de la oxidación de cobre. Como consecuencia se logra mejorar la resistencia de aislación.

Historial

Desde la fecha instalación y puesta en servicio de las máquinas N° 7 y 8 a la fecha debemos destacar los siguientes temas:

- No se han presentado cortocircuitos
- No se han cambiado bobinas
- No se han reaislados las bobinas
- Se reemplazaron, por nuevas, una sola vez la calotas de cada máquina
- Se reemplazaron, por nuevos, los anillos rozantes del generador N°

Reemplazo de calotas

Las calotas presentan micro fisuras atribuibles al paso de los años pero en sendos alternadores hubo una causa adicional que justificaba la aparición de estas. Se descubrió que la composición química original de las calotas no era la más adecuada dado que sufrían un fenómeno de deterioro denominado "Tenso corrosión". Dicho fenómeno se produce en aceros austeníticos, por la presencia combinada de una tensión mecánica, humedad y esfuerzos térmicos.

Estas piezas están fabricadas en aceros austeníticos con aleaciones de manganeso, cromo y níquel. Con el tiempo se fueron cambiando los grados de aleaciones y mejorado las tecnologías del forjado y recocido.

Desde principio del siglo XX hasta mediados de 1920 se utilizaron las correspondientes a la muestra 1 (Tabla 22). A partir de esa fecha se fueron mejorando las tecnologías de conformación de la pieza. Y a partir de 1950 fueron modificándose también la composición química de la misma hasta obtener la calidad de la muestra 2. Esta aleación presentaba grandes cualidades mecánicas, que son necesarias, pero la aparición del fenómeno de "Tenso Corrosión" hizo que se haga un replanteo de dicha composición. A partir de la década del 80 empezaron a usarse calotas correspondientes a la muestra 3. La diferencia fundamental es el aumento significativo de la porción de cromo que es el elemento que da el carácter anticorrosivo a la calota. Todo este proceso de cambios fue estudiado por el fabricante del alternador, quien alerto a sus clientes y las acerías encargadas de la conformación de las calotas.

Muestra	Material acero	C %	Mn %	Cr %	Ni %
1	0,8/8/0,5	0,6-0,8	8	5	8
2	18/5	0,4-0,6	16,5-18,5	3,5-5	2
3	18/18	0-0,15	17,5-20,5	18-20	0,4-0,75

Tabla 22. Composición química

Las calotas de sendos grupos, a comienzo de los noventas, empezaron a presentar micro fisuras fuera de los límites aceptables. Se reconoció que el material de las mismas era del tipo 2 y conocido este fenómeno se decidió el reemplazo por nuevas con las modificaciones adecuadas. Las del generador N° 7 se reemplazaron en el año 1992 (Fig. 93) y las del N° 8 en el 1999.



Figura 93. Rotor con calotas nuevas

El estudio de este fenómeno trajo aparejado algunas recomendaciones y cambios de pensamientos.

Hoy en día se recomienda la extracción de las calotas aproximadamente en periodos comprendidos entre 8 y 12 años o entre 60.000 a 100.000 horas de marcha. Antes solo ante necesidad, ya que adoptaban un criterio conservador, puesto que durante la extracción y montaje se generan grandes esfuerzos térmicos como consecuencia del calentamiento necesario para estas maniobras.

Las fisuras superficiales en estas piezas no deben exceder los 30 mm de largo y una profundidad máxima de 2 mm. Pero esto solo es una recomendación no muy conservadora ya que de estar próximos a estos valores estaríamos hablando de calotas con alto riesgo del colapso. Se pueden rectificar las campanas para reparar esta falla. Solo se permiten tres puntos reparados y deben hallarse a una distancia mínima de 50 mm entre ellos.

En mantenimientos generales solo se recomienda el ensayo con tintas penetrantes sobre la superficie exterior y los dispositivos de sujeción. Y en caso de extracción se debe incluir el ensayo de tintas a la superficie interior prestando mayor atención en la zona de apriete y cierre de seguridad.

De observarse desvíos en los ensayos de tintas se recomienda la inspección ultrasónica; determinar la composición química; hacer análisis metalográficos de zonas con y sin fisuras y estudio de dureza en dichas zonas.

Reemplazo de anillos rozantes

Los anillos rozantes, correspondientes al rotor de TV 7, fueron reemplazados por nuevos dado que quedaron fuera de medida (Fig. 94). Esto sucedió por única vez en el año 1992.

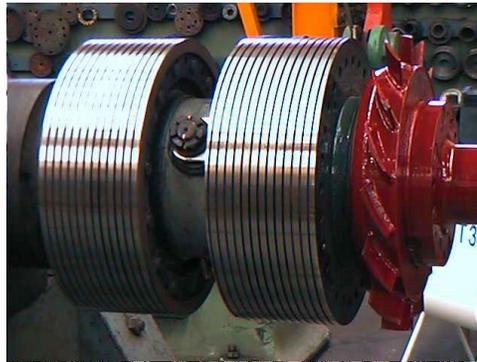


Figura 94. Anillos rozantes nuevos

Excitatriz

Cuando el turbogruppo queda fuera de servicio, o sea, disponible para la ejecución del mantenimiento, se deben retirar todas las escobillas, tanto de la excitatriz principal como de la piloto. Esta se hace para evitar el fenómeno de soldadura en frío. Lo mismo se realiza con las escobillas correspondientes a los anillos rozantes.

Luego se procede al desmontaje del bloque dividido en dos etapas como se detalla a continuación:

1º Etapa: desmontaje parcial *in situ*. Se desconectan conexiones de llave de campo y regulador. Se retira estator de excitatriz piloto, previa desmagnetización del mismo. Se retiran mitades superiores de cojinetes N° 7 y 8. Se desacoplan ejes y se retira rotor piloto. Se retiran todas las tapas y dispositivo portaescobillas.

Con asistencia de grúa se traslada el conjunto restante, a sector dispuesto para la finalización del desmontaje, incluida la base metálica en la cual se colocan las eslingas.

2º Etapa: desmontaje final en lugar predeterminado. Se desmonta excitatriz principal y se separa el rotor del estator. Se retiran mitades inferiores de cojinetes N° 7 y 8. Se retiran pedestales de cojinetes.

Finalizado el desmontaje procede a la ejecución de las tareas pertinentes.

Con el transcurso de las horas de marcha la mayor parte del desgaste se presenta en el colector de la excitatriz principal. Dicho desgaste no es uniforme por lo cual se debe rectificar el diámetro exterior del mismo. A consecuencia de esto se tiene que retirar una cierta porción de mica entre delgas y luego biselar el cobre a 45 ° para quitar el filo remanente (Fig. 95). Esta tarea, de carácter artesanal, requiere demasiado tiempo aproximadamente un mes. Este es uno de los motivos por el cual se reemplaza por una excitatriz de reserva la cual fue acondicionada con antelación. El desmicado es necesario para lograr tener una conmutación adecuada y evitar el contacto de la mica con las escobillas. Si esto sucediera se vería favorecida la formación de partículas abrasivas de mica las cuales contribuirían al aumento de la tasa de desgaste. El biselado contribuye a la reducción del deterioro de las escobillas. El eje retirado queda estivado para su acondicionamiento una vez terminado el mantenimiento programado.

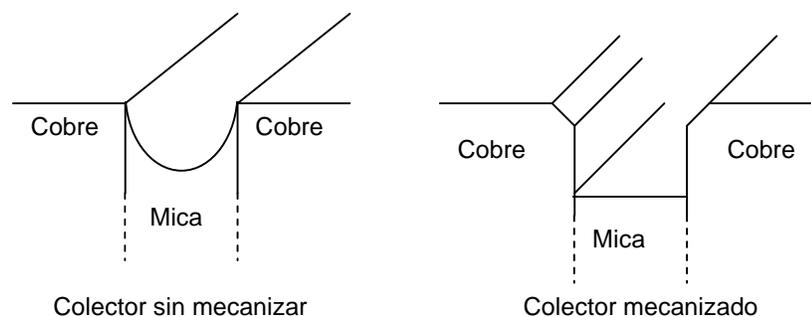


Figura 95. Mecanizado de colector

Limpieza

Los ajustes, realizados en su mayoría por personal de planta, de este bloque están ligados básicamente a la limpieza de los generadores y del conjunto. La suciedad que se presenta es de tipo grasoso compuesta por la combinación de partículas de carbón y el producto de los vapores de aceite, proveniente de los cojinetes N ° 6, 7 y 8. Esta sustancia es de carácter conductor por lo que se ve alterada la resistencia de aislación de las máquinas eléctricas. La misma debe ser

recuperada, esto se logra con limpieza líquida con Saf – Sol, luego un secado en horno para finalizar con el pintado de los estatores con barniz dieléctrico. Se verifican si los valores de resistencia de aislamiento superan a los mínimos correspondientes, para esto se utiliza el AVO Megger.

Alineación

Habilitada la máquina para el montaje, previo montaje del alternador, se coloca solamente la base metálica. Sobre ella se disponen los pedestales de cojinetes N° 7 y 8 y las respectivas mitades inferiores. La alineación de la excitatriz principal es diferente a la de los otros ejes. En este caso no se modifican la posición de los panes de apoyo, sino que se cambia la posición de los pedestales. Para relevar las mediciones solo se monta el eje de dicha excitatriz, se utilizan comparadores asociados a este. Dado que las cañerías de lubricación en servicio están desconectadas, se utiliza aceite sintético colocado sobre respectivos cojinetes y gorriones. Durante esta tarea la excitatriz principal es girada manualmente y dicho aceite, de menor escurrimiento, confiere la película lubricante requerida para evitar el contacto metal-metal evitándose así una fuente de desgaste no deseado. Cuando se logra alcanzar la alineación dentro de las tolerancias establecidas se fija la posición final de los pedestales. Los movimientos ejecutados están por debajo del milímetro, pero esta magnitud justifica la contracción de nuevas espigas de mayor diámetro. Los correspondientes agujeros también deben ser mecanizados para lograr el correcto encastre de las espigas.

Una vez alineado el eje de la excitatriz principal se procede al montaje comenzando por colocar dicho eje dentro de su estator para luego montar el conjunto sobre la base.

Control tensión resortes de portaescobillas

Una de las tareas a destacar es el montaje del sistema de escobillas. Los porta escobillas deben estar colocados a una distancia radial de 2 mm aproximadamente del colector. Los resortes deben ejercer una tensión determinada por protocolo. Su verificación se realiza con un método que no por su simplicidad podemos dejar de destacar que es de gran ingeniosidad. Para el mismo se requiere de un dinamómetro y de la colocación de un trozo de papel entre las superficies de apoyo (escobilla y colector). Se tira del dinamómetro colinealmente a la recta de acción de la fuerza ejercida por el resorte, hasta que el papel se aleje de la posición en que estaba inicialmente (se caiga). En el momento que sucede esto se registra el valor de tensión indicado en el instrumento para luego ajustar o no el resorte a fin de lograr la tensión buscada. Este trabajo es análogo para el ajuste de las escobillas correspondientes a los anillos rozantes, en este caso la tensión es de 130 gramos.

Balanceo

El desbalanceo residual que se presenta es producto de la ovalización del colector y en menor parte de la suciedad presente. Se desprende que con la utilización de la excitatriz de reemplazo se eliminan las fuentes de error. Igualmente puede tomarse la decisión de realizar el balanceo dinámico al igual que el correspondiente a los ejes de turbina. Esta actividad es tercerizada, la cual se lleva a cabo estando los ejes de los generadores principales y pilotos acoplados.

Conclusión

Todos los resultados fueron analizados y discutidos a lo largo del informe, de manera que aquí se destacan los ítems pertinentes a los objetivos principales.

- Se describió correctamente la instalación Turbovapor, lo que nos permitió conocer la función de cada uno de los componentes que integran la misma, y su rol en conjunto para obtener el resultado final. El mismo es la generación de energía eléctrica basada en un equilibrio técnico – económico global, entre un gran número de variables, con el objeto de lograr el máximo aprovechamiento de la instalación.
- Se estudio el ciclo termodinámico por completo, comprobándose así lo establecido por la teoría.
- Se calcularon los rendimientos y potencias características de la instalación en función de las distintas variantes presentes tanto para lo estipulado por el fabricante, como para la realidad actual. Esto nos permite cuantificar el funcionamiento de cada uno de los componentes de la instalación para el análisis de futuras modificaciones.
- Se realizo la planificación del “Mantenimiento Programado” en forma correcta de acuerdo a lo estipulado y recomendaciones de personal calificado de planta. Se respetaron las pautas de duración de cada tarea y la extensión total del mantenimiento, como así también la secuencia lógica y la utilización de los recursos humanos.

Como corolario del presente informe, se adquirió un sentimiento de pertenencia hacia la instalación sustentado en el buen manejo de las relaciones humanas, y la satisfacción generada por la utilización de las herramientas adquiridas durante nuestra carrera universitaria, como así también el traspaso de los conocimientos recibidos por nuestros compañeros.

A su vez, motivó a la concientización de la correcta utilización de los recursos necesarios en la generación de energía, de manera de minimizar el impacto ambiental que el uso de los mismos provoca.

Bibliografía

Turbinas de Vapor y de Gas – L. Vivier – Ediciones Urmo
Turbinas de Vapor – Edwin F. Church – Editorial Alsina
Turbinas de Vapor, Partes I y II – A. V. Schegliáiev – Editorial Mir Moscú
Turbomáquinas Térmicas – Claudio Mataix – 3º edición – CIE Inversiones Editoriales
Teoría de las Máquinas de Corriente Alterna – Langsdorf – 2º edición – Editorial Mc Graw - Hill
Tratado de Electricidad, Tomo II – Ing. Francisco L. Singer – Editorial Neo - Técnica
Problemas de Termodinámica – Diez García – Nueva Librería
Fundamentos de Termodinámica Técnica, Primer tomo – M. J. Moran y H. N. Shapiro
Instrucciones de Servicio, Tomo I, II y III – Escher Wyss
Instrucciones de Operación y Mantenimiento – Babcock & Wilcox Ltd
Protocolos de Ensayos en Fábrica – Kennedy y Donkin
Apuntes de Cátedra – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Mar del Plata

Ensayos No Destructivos – Cátedra de Metalurgia Física – Ing. F. Dommarco
Generación de la Energía Eléctrica – Ing. C. Dimenna
Lubricación – Tribología. Fricción, Desgaste y Lubricación – Ing. M. Martínez Gamba
Materiales Eléctricos – Ing. C. Agüero
Operación y Mantenimiento de Máquinas Eléctricas – Ing. T. A. Urrutia y J. C. Stecca

Links

www.centralesdelacosta.com.ar
www.cammesa.com.ar
www.conimed.com.ar
www.wikipedia.org
www.semapi.com.ar

Normas

ISO 14.001 - Extractos
ISO 14.000 – Extractos
IRAM 4062 – Ruidos Molestos al vecindario – Métodos de medición y clasificación
IRAM N° 2203 y N° 2325 – Aislación eléctrica

Informes de ensayos y trabajos

ENDs Turbogruppo N° 8 – ATEND S:R:L 05/2006
Control de Fisuras en Campanas – ALSER S.R.L. 07/05/1997
Diagnostico de aislación estatórica – CONIMED S:A:24/10/2003
Provision Y Montaje de dos calotas TV N° 7 – ABB ALSTOM 18/12/1999
Mantenimiento Predictivo, Vibraciones Mecánicas - SEMAPI S.A. – Revisión 2000

Folletos Centrales de la Costa Atlántica S.A.– Seguridad e Higiene, Residuos Especiales

Información transmitida en forma oral y escrita por personal de planta

ANEXO I

Turbina

- Esquema de puntos fijos y direcciones de dilatación
- Plano: Izaje tapas de carcasa AP y BP
- Plano: Izaje rotores AP y BP

ANEXO II

Regulador

- Croquis: amplificador de la regulación de la velocidad
- Croquis: Válvula Stop
- Croquis: Válvula parcializadora

ANEXO III

Alternador

- Plano: corte longitudinal
- Plano: introducción y extracción de rotor
- Plano: plan de montaje

ANEXO IV

Excitatriz

- Plano: Ensemble
- Plano: Corte longitudinal

ANEXO V

Cálculos termodinámicos

- Esquema de balance térmico

ANEXO VI

Cálculos termodinámicos

- Planillas de cálculo
- Diagrama entrópico

ANEXO VII

Planificación del “Mantenimiento Programado”

- Project: “mantenimiento Programado”