



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Cambio de las etapas de una turbina de vapor industrial

INFORME PROFESIONAL

Que para obtener el título de:

INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A

Carlos Alberto Peña Guerrero

TUTOR:

Dr. Jorge Luis Naude de la Llave



Ciudad Universitaria, México, D.F. 2015

Índice

Introducción.....	7
1. General Electric Company.....	9
1.1 General Electric en el Mundo.....	9
1.1.2 Historia de GE	10
1.1.3 GE Power & Water	14
1.1.4 Misión y Visión.....	15
1.2 General Electric en México	16
1.3 General Electric Infraestructura Querétaro (CIAT-GEIQ).....	16
1.3.2 Distributed Power	17
1.3.3 Renewables (Wind)	18
1.3.4 Power Generation.....	19
1.3.5 Product Generation Services (PGS).....	19
2. Ingeniería de Aplicaciones: Turbina de Vapor	21
2.1 Descripción y funciones	21
2.2 Objetivos y Retos.....	22
2.3 Organigrama	22
2.4 Principales tipos de propuestas	23
2.4.2 Repotenciación.....	24
2.4.3 Mejoramiento de la eficiencia y unidades renovadas	24
3. Fundamentos de las Turbinas de Vapor.....	25
3.1 Antecedentes.....	25
3.1.2 Ciclo Rankine Ideal.....	25
3.1.3 Clasificación de las Turbinas de Vapor	28
3.2 Turbinas de vapor para la generación de electricidad	33
3.2.2 Ciclo convencional o fósil	33
3.2.3 Plantas nucleares	36
3.2.4 Ciclo combinado	42
3.2.5 Generación de electricidad mundial	44
3.3 Principales componentes de una Turbina de Vapor	46
3.3.2 Rotor y álabes	47

3.3.3	Carcasa y álabes estacionarios.....	54
3.3.4	Rodamientos o chumaceras.....	58
3.3.5	Válvula de regulación y paro.....	59
3.3.6	Sistemas auxiliares.....	60
3.3.7	Sistema de lubricación, refrigeración y control.....	60
	Sistema de sellos de vapor.....	62
3.3.8	Tornaflecha.....	63
4.	Diseño de turbinas de vapor industriales GE.....	65
4.1	Turbinas de vapor industriales GE.....	65
4.2	Sistema de diseño integral (IDS).....	66
4.2.2	Programa de Diseño General (Layout).....	66
4.2.3	Programa MST.....	67
4.2.4	Generador de puntos de carga.....	67
4.2.5	Interface de accionamiento mecánico (MDI).....	67
5.	Propuesta de cambio de etapas.....	69
5.1	Antecedentes.....	69
5.2	Objetivos.....	70
5.3	Análisis.....	71
5.4	Aportaciones.....	71
5.4.2	Primera propuesta.....	71
5.4.3	Segunda propuesta.....	72
5.5	Resultados.....	73
5.6	Conclusiones.....	74
	Apéndice A: Aportaciones en el Programa Edison.....	79
	Descripción.....	79
	Aportaciones.....	79

Lista de figuras

Figura 1-1	Logo de General Electric.....	9
Figura 1-2	Ecuación de GE.....	15
Figura 1-3	Motor recíprocante Jenbacher con turbocompresor.....	17

Figura 1-4 Turbina de viento GE 3.2-103.....	18
Figura 1-5 Turbina de Vapor GE D-11	19
Figura 3-1 Ciclo Rankine ideal	26
Figura 3-2 Ciclo Rankine con mejoras	28
Figura 3-3 Impulso contra reacción.....	29
Figura 3-4 Expansión del vapor por etapa	30
Figura 3-5 Planta fósil	34
Figura 3-6 Reactor de agua en ebullición.....	37
Figura 3-7 Energía nucleoelectrica generada por año	39
Figura 3-8 Número de reactores en el mundo por tipo.....	40
Figura 3-9 Diagrama de una planta de Ciclo Combinado.....	43
Figura 3-10 Consumo de energía para diferentes fuentes	45
Figura 3-11 Generación de electricidad mundial por fuente (2012)	45
Figura 3-12 Rotor barrenado.....	49
Figura 3-13 Diferentes tipos de raíz del álabe.....	50
Figura 3-14 Rodete de una sección de baja presión.....	51
Figura 3-15 Partes de un rodete	51
Figura 3-16 Carcasa y rotor de una turbina de vapor.....	56
Figura 3-17 Diafragma de una turbina de vapor.....	56
Figura 3-18 Localización y ensamble del rodamiento de empuje axial y radial.....	59
Figura 3-19 Válvula de regulación con actuador	59
Figura 3-20 Sistemas auxiliares de aceite GE	62
Figura 3-21 Sello de vapor	63
Figura 3-22 Sellos laberínticos.....	63
Figura 3-23 Tornaflecha en una turbina de vapor GE	64

Lista de tablas

Tabla 3-1 Clasificación de acuerdo a la presión de salida del vapor.....	31
Tabla 3-2 Contaminantes de diferentes combustibles.....	35
Tabla 3-3 Vida estimada de algunos componentes	46

Tabla 3-4 Composición química de diferentes aceros para rotores	48
Tabla 3-5 Propiedades mecánicas de diferentes aceros para rotores	48
Tabla 3-6 Composición química de diferentes aceros para carcasas	55
Tabla 3-7 Propiedades mecánicas de diferentes aceros para carcasas	55
Tabla 5-1 Configuración de la TSN 1201	70
Tabla 5-2 Esfuerzos en la TSN 1201	71
Tabla 5-3 Costo y ciclo (Propuesta 1)	72
Tabla 5-4 Cambios de la Propuesta 2	73
Tabla 5-5 Costo y ciclo de las propuestas.....	73
Tabla 5-6 Esfuerzos para el cambio de partes rotativas	74
Tabla 5-7 Esfuerzos máximos por propuesta.....	74

Introducción

La compañía General Electric ha estado envuelta en el negocio de la generación eléctrica desde su fundación a finales del siglo XIX y actualmente se posiciona como una de las empresas multinacionales más valiosas del mundo. En México, el Centro de Ingeniería Avanzada en Turbomáquinas, localizado en Querétaro, es el centro de ingeniería de General Electric más importante en Latinoamérica, donde trabajan más de 1,800 ingenieros mexicanos diseñando turbinas de aviación y de generación eléctrica. Durante la segunda mitad del siglo XX General Electric construyó más de 700 turbinas de vapor de capacidad media, o industriales, para mover bombas auxiliares de las unidades principales, tanto para turbinas de vapor fósiles como nucleares.

Como parte del equipo de ingeniería de aplicaciones en turbinas de vapor, mi trabajo consistía en ofrecer actualizaciones a estas turbinas industriales con base en la nueva tecnología desarrollada y la experiencia adquirida en la operación de estos equipos. Gracias a estas mejoras, el cliente puede ver un beneficio en el desempeño de la unidad, prolongar la vida útil de sus turbinas o incluso evitar daños mayores detectados en otras similares, sin la necesidad de tener que gastar en una nueva unidad.

El presente trabajo se centra en una turbina en particular (TSN 1201) de 1970 para un cliente en Estados Unidos donde se detectó la posible falla en los álabes. De producirse este fallo de forma repentina, la planta tendría que parar la producción de electricidad hasta corregir los fallos, con la correspondiente pérdida económica para este cliente.

Para realizar esta propuesta tuve que coordinar a los diferentes equipos de ingeniería y diseño, así como evaluar la parte comercial para presentar una propuesta viable y atractiva para el cliente.

Al momento de finalizar este informe, la propuesta fue aceptada por el cliente y los componentes están siendo construidos para llegar a tiempo y ser instalados en el siguiente paro planeado de la planta.

1. General Electric Company

1.1 General Electric en el Mundo

General Electric (GE) es una empresa estadounidense multinacional, listada en 2014 como la 7ª marca más valiosa del mundo, según Forbes [1]. General Electric es una empresa que desarrolla y manufactura productos de diferentes tecnologías. Sus productos y servicios incluyen una amplia gama de la industria aeronáutica, generación de energía eléctrica, procesamiento de aguas, imágenes médicas, servicios financieros, medios de comunicación y productos industriales, entre otros. Actualmente la empresa se encuentra dividida en ocho segmentos: Power & Water, Oil & Gas, Energy Management, Aviation, Healthcare, Transportation, Home & Business Solutions and GE Capital. El logo de General Electric, modificado en 2004, es mostrado en la Figura 1-1.



Figura 1-1 Logo de General Electric

La empresa fue fundada en 1892 con la unión de la Edison General Electric Company de Schenectady, Nueva York y la Thomson-Houston Electric Company de Lynn, Massachusetts. La sede de GE continuó estando en Schenectady por muchos años, pero actualmente se encuentra en Fairfield, Connecticut [2].

GE actualmente cuenta con 305,000 empleados y en 2014 registro \$148 mil millones de dólares de ingresos.

GE tiene una vasta historia en la generación de energía con turbinas y esto le sirvió para generar los primeros turbocompresores durante la Primera Guerra Mundial. GE Aviation actualmente es uno de los mayores fabricantes de motores para aviación en el mundo, sólo por detrás de la empresa Rolls-Royce.

1.1.2 Historia de GE

La siguiente línea de tiempo muestra el desarrollo de GE en diversas áreas de la ingeniería a través del tiempo, varios de estos puntos a destacar incluyen tecnologías que han influido en los negocios actuales de GE.

1878. Edison funda la Edison Electric Light Company.

1879. Se inventa la primera lámpara incandescente que es comercialmente rentable. Las primeras dínamos a escala industrial son inventadas, capaces de convertir energía mecánica en energía eléctrica.

1882. Edison entra en el negocio de la generación eléctrica construyendo la primera planta de energía en Nueva York.

1892. General Electric es formada.

1896. GE genera equipo eléctrico para producir radiografías un año después del descubrimiento de los rayos X.

1903. La turbina de vapor más grande hasta la fecha es instalada con 5000 kW de potencia. Esta unidad es del tipo “vertical”.

1908. GE provee 30 locomotoras eléctricas de 94 toneladas, cada una, para la Grand Central Station en Nueva York.

1909. GE introduce el filamento de tungsteno para las lámparas incandescentes, haciéndolas más eficientes.

1912. En la industria naval, el barco U.S.S. Jupiter es propulsado por un generador de 7000 hp. El plástico es utilizado como un aislante eléctrico.

1917. GE introduce el primer refrigerador eléctrico cerrado herméticamente, sentando las bases del refrigerador que usamos hoy en día.

1918. El magnetrón es inventado por Albert Hull en GE, que fue usado ampliamente en radares y posteriormente en los hornos de microondas.

1921. Un nuevo récord de altitud para un aeroplano es establecido en 40,800 pies (casi de 12,500 m) equipado con un turbocompresor GE.

1927. La primera transmisión de televisión toma lugar en Schenectady, NY con una señal proveniente de GE.

1930. Equipo eléctrico de GE es empleado en la construcción del Empire State. El plástico moldeable es inventado para cubrir la necesidad de aislantes eléctricos.

1932. Durante la Gran Depresión, GE empieza un negocio de financiamiento para las personas que deseaban adquirir electrodomésticos en Estados Unidos. Irving Langmuir, director adjunto del laboratorio de investigación de GE, gana el Premio Nobel por sus investigaciones en la química de superficie.

1937. Howard Hughes establece un récord de vuelo transcontinental de 7 horas y 28 minutos volando un avión con un turbocompresor GE.

1938. GE inventa la lámpara fluorescente.

1939. La primera mujer en unirse a un Laboratorio de Investigación GE inventa el vidrio antirreflejante que sería usado para los lentes de las cámaras y dispositivos ópticos.

1942. GE construye el primer motor de reacción estadounidense.

1943. GE desarrolla el piloto automático para mantener a un avión en un curso predeterminado.

1946. El científico Vincent Schaefer desarrolla un proceso por el cual se puede producir lluvia, empezando la ciencia atmosférica.

1947. GE produce el primer refrigerador de dos puertas con congelador. GE introduce un horno eléctrico capaz de calentar comida congelada precocida para ser servida en menos de un minuto.

1953. El químico Daniel Fox descubrió resinas de policarbonato que son ampliamente utilizadas en discos compactos y otras aplicaciones.

1955. El Laboratorio de Investigaciones GE anuncia el proceso para inventar los primeros diamantes artificiales.

1956. GE entra al negocio de la aviación comercial produciendo la turbina para el transporte comercial más rápido del mundo, derivado del motor militar J79.

1957. GE abre la primera planta nuclear con licencia.

1958. GE introduce el primer abrelatas eléctrico automático.

1959. La lámpara de halógeno es inventada, produciendo luz blanca en un tamaño compacto.

1962. El científico de GE Bob Hall inventa el láser de estado sólido. Este invento permite la lectura de discos compactos, impresoras láser y comunicaciones de fibra óptica.

1968. Jacob Rabatin desarrolla una máquina de rayos X que permite tomar mejores radiografías con un cuarto de la exposición requerida anteriormente.

1969. GE participa en varios niveles para poner al primer hombre en la luna; 6000 empleados de GE ayudaron a lograr este objetivo que incluyó botas, suministros, sistemas de control y soporte, entre otros.

1971. Se inventa el primer aire acondicionado portable, que será usado para eventos temporales y espacios pequeños.

1973. El Dr. Ivar Giaever gana el Premio Nobel de Física por su descubrimiento en 1960 de túneles superconductores para visualizar átomos y detectar campos magnéticos minúsculos.

1978. Un escáner para realizar tomografías axiales computarizadas permite tomar radiografías de diferentes secciones del cuerpo humano en menos de 5 segundos. También el primer reloj digital programable es introducido por GE para ajustar la alarma a la hora deseada. GE se vuelve la primera organización en la historia de Estados Unidos en alcanzar las 50,000 patentes.

1983. Se introduce el sistema de Resonancia Magnética capaz de generar un campo uniforme 30,000 veces más potente que el de la Tierra para generar imágenes de tejidos blandos que difícilmente serían obtenidas con rayos X.

1992. GE participa en la construcción del Mars Observer para la NASA.

1996. GE establece una mayor presencia en internet lanzando su portal de comercio electrónico.

1998 Es introducido el sistema LightSpeed™ permitiendo a los doctores obtener imágenes seis veces más rápido que los sistemas tradicionales.

1999. GE concluye el año con \$2 mil millones de dólares en comercio electrónico.

2000. GE introduce el primer agente para diagnosticar la enfermedad de Parkinson.

2001. Se desarrolla una lámpara casera que filtra el color amarillo y produce luz blanca para los hogares, reduciendo su tamaño.

2002. Se abre el Centro Tecnológico en Shangai, China. GE trabaja con la NASA para construir parte de la Estación Espacial Internacional.

2003. Empiezan las pruebas para las turbinas clase H, que en ciclo combinado superan la barrera del 60% de eficiencia. También comienzan las pruebas para las nuevas

locomotoras que deben cumplir o superar las nuevas regulaciones estadounidenses para emisiones de gases de efecto invernadero.

2004. GE anuncia el primer sistema de ultrasonido cardiovascular en miniatura. En este año Boeing elige el motor GEnx para sus aviones 787 y 747-8. La turbina LMS100 es introducida como la más eficiente para ciclo simple de gas.

2005. GE Healthcare introduce imágenes de alta resolución a los sistemas médicos para producir imágenes de alta calidad en pacientes que no pueden permanecer en una sola posición, como pacientes de la enfermedad de Parkinson y niños pequeños.

2007. GE presenta el prototipo de la primera locomotora híbrida capaz de capturar parte de la energía disipada en el frenado, reduciendo el consumo de combustible en un 18%.

2008. Científicos de GE producen nano-cubiertas hidrofóbicas que ayudan a una gama de productos, por ejemplo, previniendo que las aspas de una turbina de viento formen hielo en su superficie. GE se convierte en el principal productor de motores aeronáuticos para aplicaciones comerciales y militares.

2010. GE introduce el primer foco LED omnidireccional diseñado para reemplazar a los focos incandescentes, con menos del 77% de energía y una vida de hasta 22 años en condiciones normales de uso. GE innova con su WattStation para cargar vehículos eléctricos.

1.1.3 GE Power & Water

GE Power & Water es el negocio de la generación eléctrica de GE y tiene su sede en Schenectady, Nueva York, siendo el negocio industrial más grande de General Electric con más de \$27 mil millones de dólares de ingresos en 2014 y 38,000 empleados en más de 125 países.

Power & Water actualmente está dividida en Distributed Power, GE Hitachi Nuclear Energy, Power Generation y Renewable Energy.

En el negocio de la energía cabe destacar los siguientes hechos históricos en los que estuvo envuelto GE:

- En 1957 GE inaugura la primera planta de energía nuclear con licencia en el mundo (Vallecitos). Este reactor de agua en ebullición operó de 1957 a 1963 y sirvió de planta de pruebas para posteriores diseños. El personal de la planta Dresden en Illinois fue entrenado aquí.
- En el año **2000** GE introduce la planta de energía eléctrica “sobre ruedas”, una turbina de gas y generador (TM2500) capaz de producir 22.8 MW con la capacidad de instalarse en cuestión de días en el lugar indicado.
- En **2004** se introduce la turbina de gas aeroderivada LMS100, capaz de arrancar y producir 100 MW en sólo 10 minutos.
- En **2007** el primer motor Jenbacher de 24 cilindros es introducido en el mercado.
- La turbina eólica 2.5-120 es introducida con la capacidad de capturar y almacenar energía utilizando una tecnología revolucionaria con palas de 58.7 m.

1.1.4 Misión y Visión

GE no tiene un enunciado oficial de su misión y visión, sin embargo, se pueden interpretar a través de su Ecuación, mostrada en la Figura 1-2.

$$\begin{array}{l}
 \text{Miramos} \\
 \text{lo que} \\
 \text{necesita} \\
 \text{el mundo}
 \end{array}
 \times
 \left[
 \begin{array}{l}
 \text{Creencia} \\
 \text{de una} \\
 \text{forma} \\
 \text{mejor de} \\
 \text{hacerlo}
 \end{array}
 +
 \begin{array}{l}
 \text{Implacable} \\
 \text{motivación para} \\
 \text{inventar y construir} \\
 \text{las cosas que} \\
 \text{importan}
 \end{array}
 \right]
 =
 \begin{array}{l}
 \text{Un mundo} \\
 \text{que} \\
 \text{funciona} \\
 \text{mejor}
 \end{array}$$

Figura 1-2 Ecuación de GE

Como lo expresa GE: “Tenemos una implacable determinación para inventar las cosas que importa, innovaciones que construyen, alimentan, mueven y ayudan a curar al mundo. Creamos cosas que muy pocos en el mundo pueden, pero que todos necesitan. Esto es un motivo de orgullo, para nuestros empleados y clientes. Esto define GE” [3].

1.2 General Electric en México

Hace 15 años, GE arrancó con su estrategia de globalización de sus recursos de ingeniería, bajo los objetivos de encontrar talento, estar más cerca de sus clientes y reducir costos. Así surgieron sus sofisticados centros en China, India, Polonia, Turquía, Rusia y México [4].

México fue el primer país en América Latina donde GE estableció operaciones. La empresa comenzó sus actividades en el país en 1896 y estableció su primera fábrica en 1929. GE cuenta con poco más de 10,000 empleados en el país. Sus principales operaciones se concentran en 17 plantas de manufactura, cinco centros de servicio, un Centro Global de Finanzas y un Centro de Ingeniería Avanzada. Con excepción de los Estados Unidos, México es el país con más establecimientos industriales de GE en el mundo [5].

1.3 General Electric Infrastructure Querétaro (CIAT-GEIQ)

El Centro de Ingeniería Avanzada en Turbomáquinas (CIAT), es también conocido como GEIQ y alberga a 1,800 ingenieros de alta especialización; en 2012, 20% de los empleados contaba con maestría y 3% con doctorado.

En 2011 se inauguraron nuevas instalaciones para GEIQ en Querétaro. En el corte del listón estuvieron presentes el entonces presidente de México, Felipe Calderón Hinojosa y el CEO global de GE, Jeffrey Immelt.

De acuerdo con Vladimiro de la Mora, actual director de GEIQ: “[...] tan sólo en GEIQ, se desarrollan los componentes para el avión más grande del mundo: el Airbus 380 [...] entre otros muchos proyectos que tenemos” [6].

En 2014, la segunda fase del CIAT fue inaugurada y al evento asistió el Secretario de Economía, Ildefonso Guajardo Villareal. Para esta segunda fase se cuenta con la proyección de albergar a 2,200 ingenieros en GEIQ [7].

En GEIQ se han generado 2 patentes mexicanas aprobadas, 24 aplicaciones de patentes y más de 200 IDLs (Invention Disclosure Letter, documentos confidenciales con información de algún diseño que pueden convertirse en patentes) [8].

Actualmente, GEIQ se especializa en los negocios de generación de energía y de aviación. Dentro de la generación de energía, GEIQ abarca los siguientes negocios: Distributed Power, Wind y Power Generation.

1.3.2 Distributed Power

Se encarga de generar las soluciones para producir la energía cerca o en el lugar donde será usada, dentro o fuera de la red eléctrica. Dentro de los equipos desarrollados están las turbinas aeroderivadas, y los equipos Jenbacher y Waukwesha, que van de los 100 kW a los 100 MW. La Figura 1-3 [9] muestra uno de los productos de GE Distributed Power; un motor recíprocante de combustión interna con turbocompresor.



Figura 1-3 Motor recíprocante Jenbacher con turbocompresor

Algunas de estas aplicaciones son de usos industriales, comunidades en desarrollo y situaciones de desastres naturales u otro tipo de emergencias que aíslen áreas de la red eléctrica. Sus oficinas centrales se encuentran en Cincinnati, Ohio.

1.3.3 Renewables (Wind)

GE cuenta con un negocio de la generación de energía eléctrica con turbinas de viento, con capacidades que van de los 1.7 MW a los 3.2 MW. También se encargan de los servicios como el desarrollo de parques eólicos y mantenimiento de estos.

Como ejemplo de algunos de sus productos, la turbina de viento 3.2-103 mostrada en la Figura 1-4 con una altura del buje de 98.3 metros y palas de 50.2 metros, puede generar alrededor de 3 MW [10].

Con el uso del internet industrial, parques eólicos completos pueden estar conectados a la nube, donde se realizan simulaciones de las condiciones reales de la turbina y se realizan acciones de corrección. Estas turbinas se encuentran conectadas virtualmente para incrementar la eficiencia y seguridad de los parques eólicos.

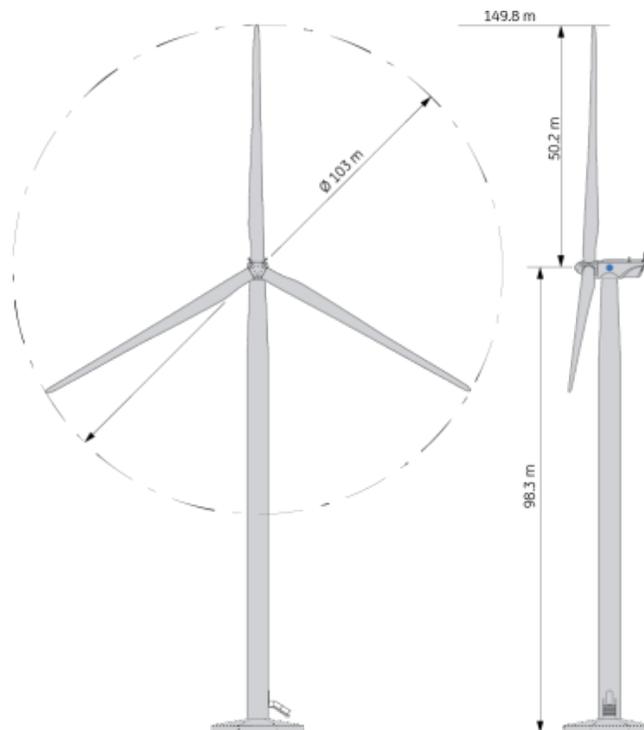


Figura 1-4 Turbina de viento GE 3.2-103

1.3.4 Power Generation

Power Generation, dividida en Products y Services, se encarga de desarrollar nuevos productos y proveer servicios a la flota instalada. Estos equipos incluyen turbinas de gas, vapor y generadores utilizados en la generación de energía eléctrica de carga base y cogeneración.

En todo América actualmente se cuenta con 570 GW de capacidad instalada. Las turbinas de gas van de un rango de los 40 MW hasta los 510 MW para aplicaciones de 50 o 60 Hz, mientras que las turbinas de vapor van de los 80 MW hasta los 700 MW.

En turbinas de vapor, la flota instalada en todo el mundo tiene más de 530 GW, con más de 6,000 unidades instaladas desde 1901 [11].

1.3.5 Product Generation Services (PGS)

PGS es un negocio de \$9 mil millones de dólares con aproximadamente 17,000 empleados en todo el mundo con más de 130 años de experiencia en la construcción y mantenimiento de plantas de generación de energía eléctrica.

Como objetivos fundamentales tiene la necesidad de brindar al cliente con la tecnología, conocimientos y experiencia para tomar las mejores decisiones en el ciclo de vida completo de la planta.

En la Figura 1-5 se muestra una turbina de vapor D-11 utilizada en plantas de ciclo combinado, representativas de la región América Latina.

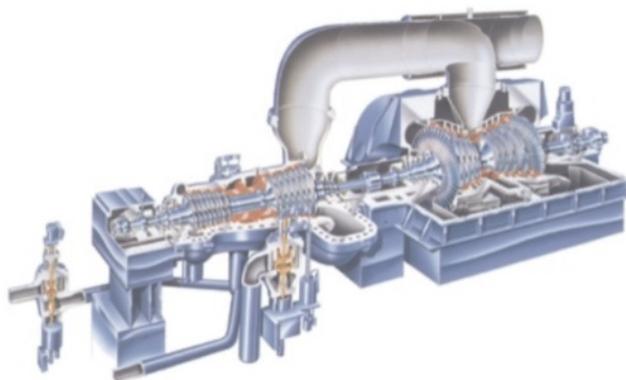


Figura 1-5 Turbina de Vapor GE D-11

Estas turbinas se dividen en dos carcasas y el vapor entra a la sección de alta presión típicamente a 1800 psia/ 1050 °F (124 bar/566 °C) con álabes de hasta 40 pulgadas para la última etapa en aplicaciones de 60 Hz con una capacidad nominal de 180 MW [12].

2. Ingeniería de Aplicaciones: Turbina de Vapor

2.1 Descripción y funciones

Por definición, un ingeniero de aplicaciones es responsable de evaluar la tecnología que se puede ofrecer al cliente en las primeras etapas de un proyecto.

Trabaja conjuntamente con los equipos de ventas y debe ser capaz de identificar y proveer soluciones técnicas que aseguren la satisfacción del cliente. El ingeniero de aplicaciones debe ser capaz de involucrarse en todo este proceso, manteniendo una comunicación activa con equipos técnicos, de ventas y con el cliente mismo, de ser necesario.

Dentro de las principales responsabilidades y funciones de un ingeniero de aplicaciones, se encuentran las siguientes:

- Mantenerse actualizado en la gama de productos, conociendo los detalles técnicos y su aplicación.
- Escuchar, entender y traducir los requerimientos del cliente.
- Identificar las necesidades del cliente y las oportunidades de venta para el crecimiento de la organización.
- Mantener actualizados los registros de las oportunidades, cotizaciones previas, proyectos y contactos necesarios para sus labores.

Particularmente, dentro de GE P&W PGS, el Ingeniero de Aplicaciones Mecánicas de Vapor debe ser capaz de:

- Ofrecer soluciones a los clientes con base en experiencias previas de la flota instalada, nuevas tecnologías desarrolladas y recomendaciones hechas en otras unidades.
- Mantener contacto con Servicios para conocer los problemas más usuales de la flota y ofrecer acciones preventivas, que ahorren tiempo y dinero al cliente.
- Ser capaz de encontrar y analizar información acerca de las turbinas de vapor GE, tanto industriales como de carga base.

- Proveer el costo y ciclo necesarios para cada proyecto.

2.2 Objetivos y Retos

Para el primer semestre de 2015 se tienen los siguientes objetivos personales:

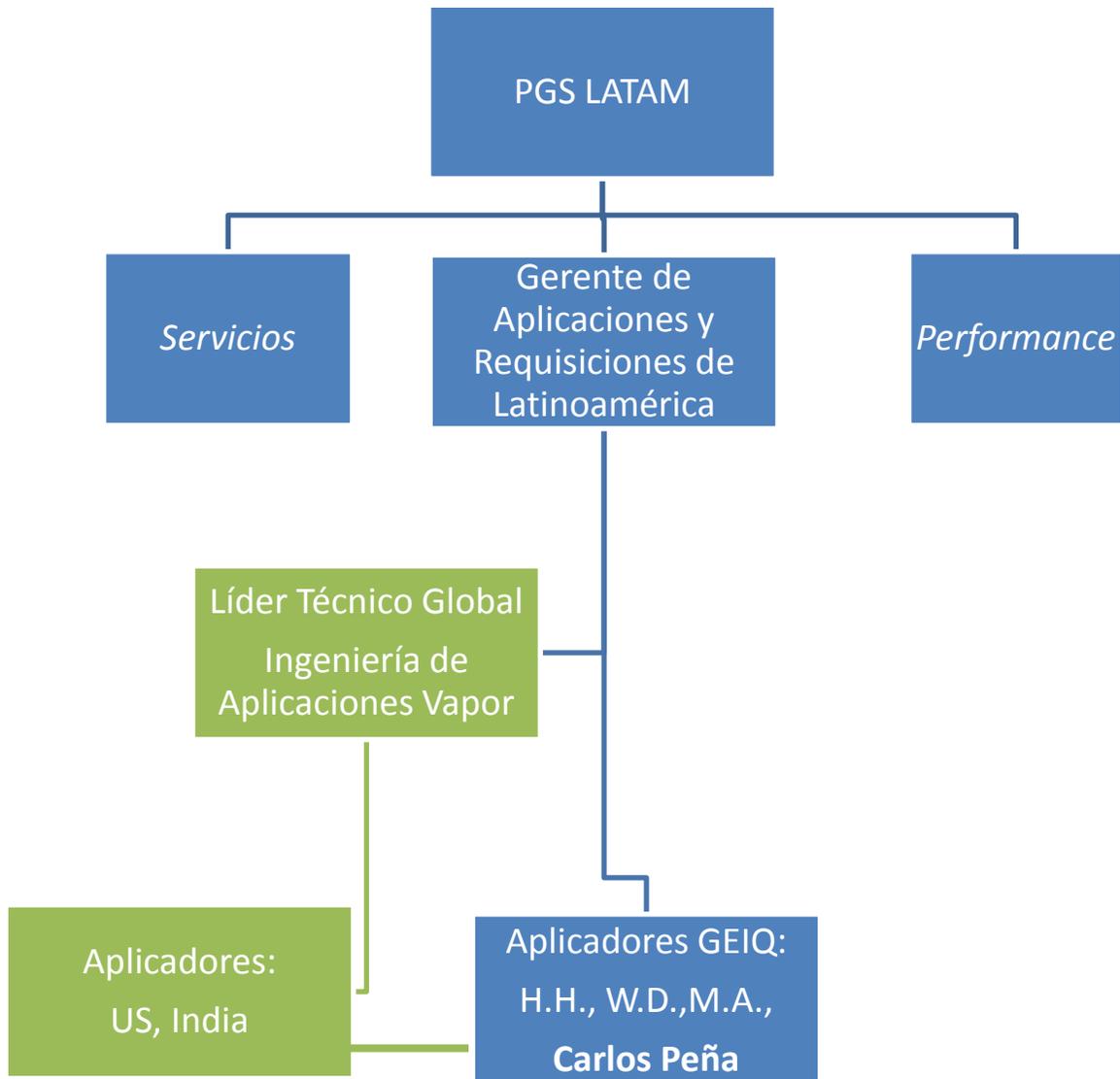
1. Realizar un estudio de las condiciones de esfuerzos en las diferentes etapas de una turbina utilizada para la bomba del agua de alimentación de la caldera.
2. Encontrar una alternativa para solucionar la condición de sobreesfuerzo en las etapas que se encuentren fuera de los criterios de diseño actuales.
3. Redactar la propuesta para el equipo comercial y de ventas, así como la propuesta técnica que será entregada al cliente.

Para poder cumplir con la propuesta arriba mencionada, es importante desarrollar las siguientes habilidades:

- Familiarizarse con los dibujos técnicos de estos equipos para poder encontrar la información necesaria.
- Conocer el funcionamiento básico de los diversos componentes principales de una turbina (álabes, sellos, empaques, etc.) y la interacción entre ellos.
- Contactar a los diferentes equipos técnicos para proveer el costo y el ciclo antes de recibida la orden de venta.
- Mantener una comunicación activa con el equipo de ventas, a fin de satisfacer las necesidades del cliente y aclarar sus dudas.

2.3 Organigrama

El desempeño de las funciones como Ingeniero de Aplicaciones dentro de GEIQ se llevó a cabo mediante la siguiente estructura, tanto funcional como administrativa.



Sin embargo, al tratarse de un equipo global, la colaboración entre diferentes sitios y equipos alrededor del mundo fue necesaria para el desempeño de las actividades. Algunos de estos equipos que están íntimamente relacionados son Ventas, Servicios y Diseño, entre otros, que a su vez están a cargo de diferentes gerencias con sus propios objetivos.

2.4 Principales tipos de propuestas

En las siguientes secciones se listan y describen los diferentes tipos básicos de propuestas que son ofrecidas al Cliente en base a sus necesidades.

2.4.2 Repotenciación

El objetivo de este tipo de cambios es aumentar la potencia de salida de la turbina de vapor cambiando las condiciones de entrada. Para este cambio, se necesitan evaluar los componentes para saber si necesitan ser reemplazados o pueden ser mantenidos. El análisis incluye una evaluación de cada componente individual, pero se presta atención especial a válvulas, al diafragma de la primera etapa y a los materiales del rotor y toberas. El estudio incluye el tiempo de operación transcurrido y se presta atención a problemas registrados en la unidad.

Con estos análisis, el tiempo de mantenimiento se reduce al mínimo y el impacto en costo para el cliente es menor, ya que sólo se cambian los componentes críticos para garantizar la operación segura de la máquina.

2.4.3 Mejoramiento de la eficiencia y unidades renovadas

Con los nuevos diseños mecánicos en sellos, perfiles aerodinámicos y técnicas de análisis, la eficiencia térmica de la turbina puede mejorar. Además, los componentes envejecidos presentan cambios en su estructura que reducen la eficiencia de la turbina y es por eso que el simple cambio de estos puede mejorarla, justificando su precio para el cliente.

En algunas turbinas el mejoramiento en el desempeño de la máquina puede ser tan crítico como un 5% en eficiencia térmica por cambiar los componentes por unos nuevos.

Otra solución interesante que se puede presentar al cliente es renovar alguna unidad ya construida, tomando los componentes que sirvan y manufacturando otros. Algunos de los componentes típicos reutilizados son las carcasas ya que una nueva representa un costo significativo y un tiempo largo de fabricación. Cambios en los diafragmas y ruedas del rotor son comunes, así como maquinados que se le hacen al rotor para satisfacer las condiciones a las que será sometido.

3. Fundamentos de las Turbinas de Vapor

3.1 Antecedentes

Una turbina de vapor es un dispositivo que convierte la energía térmica del vapor de alta presión y temperatura en trabajo mecánico a través de una flecha rotatoria. Esto permite utilizar a la turbina de vapor para mover componentes rotatorios, como generadores eléctricos, bombas y compresores, entre otros.

La turbina de vapor moderna fue utilizada en aplicación práctica por Sir Charles Parsons en 1884 y estaba conectada a un generador que producía 7.5 kW de electricidad. Rápidamente se utilizó para generar energía eléctrica barata y en aplicaciones navales. El diseño fue adoptado por George Westinghouse y Charles Parsons vio cómo su invento de 7.5 kW se transformaría en turbinas de 50 MW.

3.1.2 Ciclo Rankine Ideal

3.1.2.1 Descripción

La turbina de vapor es una máquina térmica que puede ser modelada y estudiada con el Ciclo Rankine. Este ciclo requiere de un fluido de trabajo que se evapora y condensa. El agua es utilizada comúnmente como fluido de trabajo dada su disponibilidad y propiedades térmicas, aunque otros fluidos pueden ser utilizados para aplicaciones más específicas; por ejemplo, fluidos orgánicos para el ciclo Rankine solar.

El diagrama T-s del ciclo Rankine sencillo es presentado en la Figura 3-1. Los procesos son descritos a continuación:

- Proceso 1-2: Expansión isoentrópica del fluido de trabajo en la turbina desde la zona de alta presión hasta la zona de baja presión (típicamente un condensador).
- Proceso 2-3: Rechazo de calor a presión constante, típicamente en un condensador con un fluido refrigerante. El fluido de trabajo del ciclo Rankine alcanza el estado de líquido saturado.

- Proceso 3-4: Incremento de presión isoentrópica del fluido de trabajo hasta la presión de la caldera o reactor. Este incremento de presión se realiza con una bomba.
- Proceso 4-1: Adición de calor a presión constante típicamente en una caldera (aplicaciones fósiles), en un reactor (aplicaciones nucleares) o recuperador de calor y generador de vapor (ciclo combinado, entre otros). El fluido de trabajo es llevado al punto de líquido saturado y después se convierte en vapor. En muchas aplicaciones el vapor es sobrecalentado a fin de aumentar la eficiencia y evitar una baja calidad del vapor a la salida de la turbina que pueda dañar los álabes.

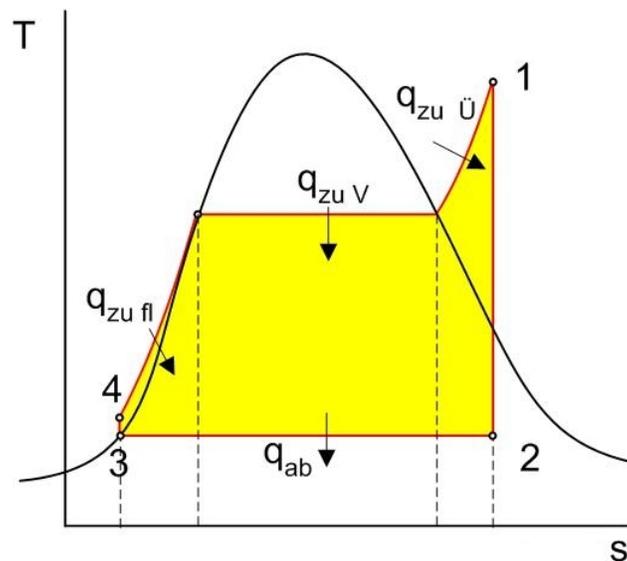


Figura 3-1 Ciclo Rankine ideal

Una planta real de vapor se aleja del ciclo Rankine ideal debido a que los procesos de la bomba y la expansión en la turbina no son isoentrópicos. Así mismo, existen pérdidas de energía en el condensador y en la caldera que reducen la eficiencia neta de la unidad.

3.1.2.2 Mejoras del Ciclo Rankine

Para aumentar el trabajo entregado por la turbina o mejorar la eficiencia del ciclo, comúnmente se realizan las siguientes modificaciones en una planta:

1. **Sobrecalentado:** El vapor a la entrada de la turbina es llevado a la región de sobrecalentamiento del fluido, aumentando la diferencia de entalpías y por lo tanto el trabajo entregado. Así mismo, la humedad y el riesgo de daño a los álabes disminuye. El límite de sobrecalentamiento está dado físicamente por las propiedades de los materiales usados en la planta y el costo del equipo.
2. **Recalentamiento:** La expansión del vapor se realiza en cada etapa y en las etapas intermedias el vapor es llevado de vuelta a la caldera o intercambiador de calor para aumentar su temperatura. Esto aumenta la eficiencia de la turbina ya que el proceso se acerca teóricamente a una expansión isotérmica. Usualmente se usan tres secciones de presión en las turbinas modernas, ya que el uso de más secciones incrementaría la complejidad y el costo de la planta sin tener una ganancia significativa mayor a la ya obtenida.
3. **Precalentado:** Se calienta el agua antes de que entre a la caldera o recuperador de calor. Una forma de hacer esto es con extracciones de vapor que se utilizan para este precalentado. Esto aumenta la eficiencia del ciclo pero está limitado físicamente por el número de extracciones que se pueden obtener de una turbina.

Además a las ya anteriormente mencionadas, al aumentar la presión de la caldera o disminuir la presión del condensador también se aumenta la cantidad de trabajo entregado por la turbina.

La Figura 3-2 muestra el recalentamiento en dos etapas (secciones de alta y baja presión), así como el sobrecalentado en los puntos 1 y 3. Nótese que el área encerrada en el ciclo aumenta, aumentando la potencia entregada por la turbina.

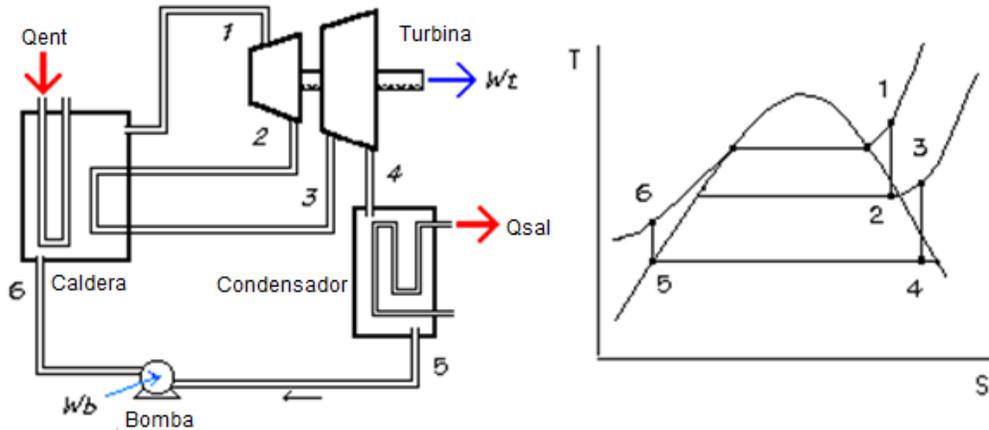


Figura 3-2 Ciclo Rankine con mejoras

3.1.3 Clasificación de las Turbinas de Vapor

3.1.3.1 Grado de Reacción

Las turbinas de vapor son comúnmente clasificadas de acuerdo a su grado de reacción, esto es, la forma en que el vapor se expande a través de las toberas y álabes del rotor. El grado de reacción relaciona la presión en el rodete con la presión total de la etapa. Si el grado de reacción R es igual a 0, se trata de una etapa de acción o impulso, si R es igual a 1 se trata de una máquina de acción pura. Esta clasificación se divide en turbinas de impulso y reacción y es mostrada a continuación:

- **Turbinas de impulso**

En una turbina o etapa de impulso la expansión se realiza en las toberas sujetas al estator. La presión se mantiene constante en su paso por los álabes del rotor con una reducción de la velocidad del vapor.

En el pasado, prácticamente todas las turbinas GE eran de impulso debido a que se necesitan menos etapas que en una de reacción para obtener una turbina con la misma potencia de salida.

- **Turbinas de reacción**

En una turbina de reacción la expansión se lleva a cabo tanto en los álabes del rotor como en los álabes del estator. Los álabes de la turbina funcionan también como

toberas y la expansión del vapor en los álabes ejerce una fuerza opuesta en el rotor. La velocidad relativa del vapor aumenta, pero la velocidad absoluta de éste disminuye.

En la Figura 3-3 se muestra un diagrama de la diferencia entre las etapas de impulso y reacción [13].

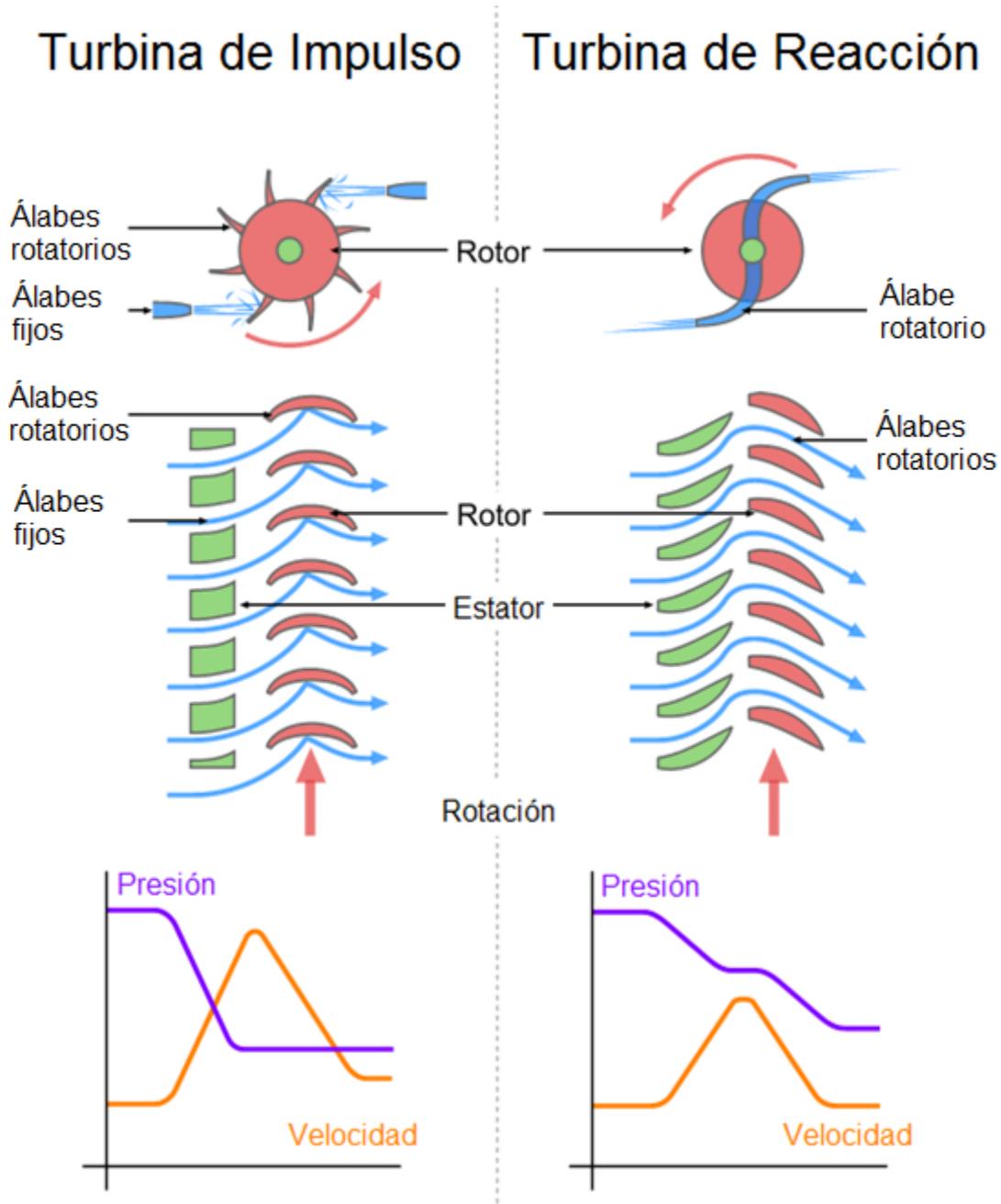


Figura 3-3 Impulso contra reacción

La Figura 3-4 muestra en un diagrama h-s la expansión del vapor a través de las toberas fijas (0 a 1) y ante los álabes rotatorios (1 a 2).

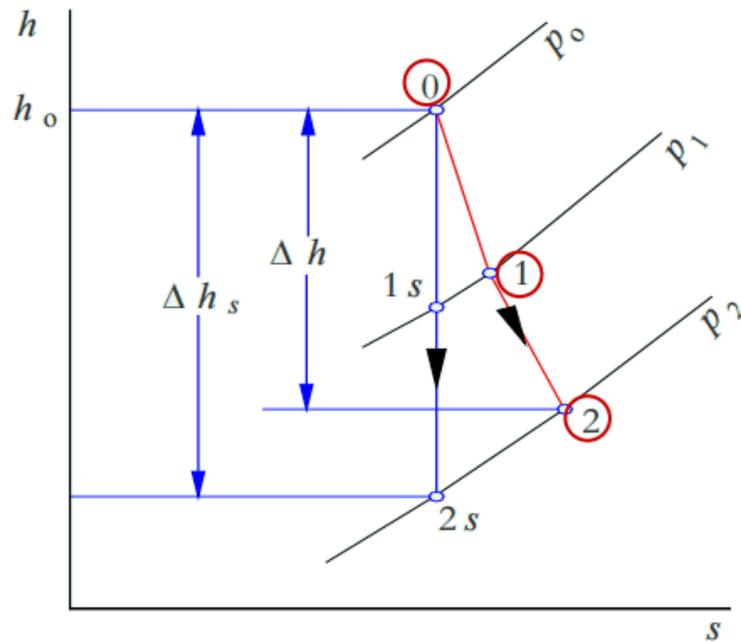


Figura 3-4 Expansión del vapor por etapa

Así, el grado de reacción ϵ se define como muestra la ecuación (1).

$$\epsilon = \frac{h_1 - h_2}{h_0 - h_2} \quad (1)$$

En una turbina de acción o impulso el cambio de entalpía en el rodete es cero. En una turbina de reacción pura, la entalpía en el punto 0 es igual a la entalpía en el punto 1. Las relaciones (3) y (4) lo demuestran.

$$\epsilon = \frac{h_1 - h_2}{h_0 - h_2} \quad (2)$$

La relación (2) corresponde a una etapa pura de impulso.

$$h_1 = h_2 \quad ; \quad \epsilon = 0 \quad (3)$$

La relación (4) corresponde a una etapa pura de reacción.

$$h_0 = h_1 \quad ; \quad \epsilon = 1 \quad (4)$$

En realidad, las diferentes etapas tienen un grado de reacción intermedio entre 0 y 1, situando la expansión del vapor entre los álabes estacionarios y los álabes móviles.

3.1.3.2 Aplicaciones

Según su aplicación y condiciones de escape, las turbinas de vapor pueden ser clasificadas en turbinas de condensación, contrapresión y extracción. La Tabla 3-1 Clasificación de acuerdo a la presión de salida del vapor muestra esta clasificación.

$$P_s > P_{atm} - \text{Contrapresión}$$

$$P_s < P_{atm} - \text{Condensación}$$

Tabla 3-1 Clasificación de acuerdo a la presión de salida del vapor

- **Condensación**

Estas turbinas son las más usadas para la generación de energía eléctrica y se caracterizan por tener un condensador unido a la última etapa de la turbina que permite la salida de vapor a presiones menores que la atmosférica para extraer la mayor cantidad de energía posible. La presión de vacío generada en el condensador está directamente relacionada con la potencia de salida de la turbina de vapor.

- **Contrapresión**

Estas turbinas también conocidas como de contrapresión se caracterizan por tener una salida a presión mayor que la atmosférica. Su principal uso es en aplicaciones que requieren de vapor para diferentes procesos industriales tales como refinerías, plantas de procesamiento de papel y desalinizadoras. La presión de salida y cantidad de vapor pueden ser ajustados mediante válvulas dependiendo de las necesidades del proceso y la potencia de salida en el generador también varía de acuerdo a las condiciones del vapor utilizado.

- **Extracción**

Las turbinas de extracción también se encuentran en múltiples aplicaciones industriales. En este tipo de turbinas, parte del vapor es liberado en diferentes etapas de la turbina y utilizado en procesos industriales que requieren de una presión constante, como refinerías y plantas de procesamiento, así como calefacción de hogares a gran escala.

Las extracciones también son utilizadas para aumentar la eficiencia del ciclo utilizando calentadores de agua de alimentación en la industria de la generación eléctrica.

3.1.3.3 Tamaño

Las turbinas de vapor también pueden ser clasificadas de acuerdo a su potencia de salida. Su tamaño está directamente relacionado con sus aplicaciones y afecta el diseño de éstas. Existen turbinas de vapor desde unos pocos caballos de potencia hasta del orden de casi 2,000 MW. La siguiente clasificación empírica hace referencia a los estándares de GE.

- **Turbinas de vapor pequeñas**

Estas turbinas de vapor comprenden desde pocos caballos de potencia hasta 60,000 hp (45,000 kW). Son principalmente usadas para accionar bombas, compresores y en general equipos mecánicos. Dentro de estas turbinas se encuentran las turbinas industriales usadas para accionar la bomba del agua de alimentación de la caldera en plantas de energía eléctrica.

- **Turbinas de vapor medianas**

Desde los 15 MW hasta aproximadamente 300 MW, estas turbinas pueden ser usadas tanto para usos industriales (cogeneración) como de producción de electricidad (principalmente ciclo combinado). Principalmente son turbinas de contrapresión.

- **Turbinas de vapor grandes**

Van desde los 300 MW hasta más de 1200 MW, tanto para aplicaciones nucleares como fósiles. En aplicaciones fósiles las condiciones de presión son mucho más

elevadas (del orden de hasta 3500 psig ó 241 bar), típicamente con recalentamiento. Estas turbinas se encuentran divididas en varias secciones de presión (alta, intermedia y baja) y pueden tener varias secciones de baja presión debido al gran flujo de vapor en la turbina. Las turbinas nucleares trabajan con un alto flujo de vapor pudiendo alcanzar los 1900 MW en los diseños más modernos, sin embargo, no se puede alcanzar el sobrecalentado y el vapor es más húmedo.

3.2 Turbinas de vapor para la generación de electricidad

Uno de los usos de las turbinas de vapor es para la generación de electricidad. Como se mostró en secciones anteriores, la turbina necesita vapor de alguna fuente. La forma en que se obtiene la energía para la generación de vapor da lugar a diferentes tipos de plantas en base al recurso natural para obtener esta energía.

La generación de electricidad a gran escala puede estar dada en frecuencias de 50 o 60 Hz para la mayor parte del mundo. Normalmente se emplean generadores trifásicos para producir corriente alterna y poder suministrarla a través de líneas de alta tensión.

3.2.2 Ciclo convencional o fósil

Las plantas convencionales han utilizado típicamente combustibles fósiles para la obtención de energía. Estas plantas pueden quemar carbón o derivados del petróleo para generar vapor. Actualmente, el uso de gas natural es mayormente usado para mover turbinas de gas en vez de generar vapor. Estas plantas fósiles están diseñadas para carga base y operación con el menor número de interrupciones posibles. Un diagrama de una típica planta fósil de carbón es mostrado en la Figura 3-5.

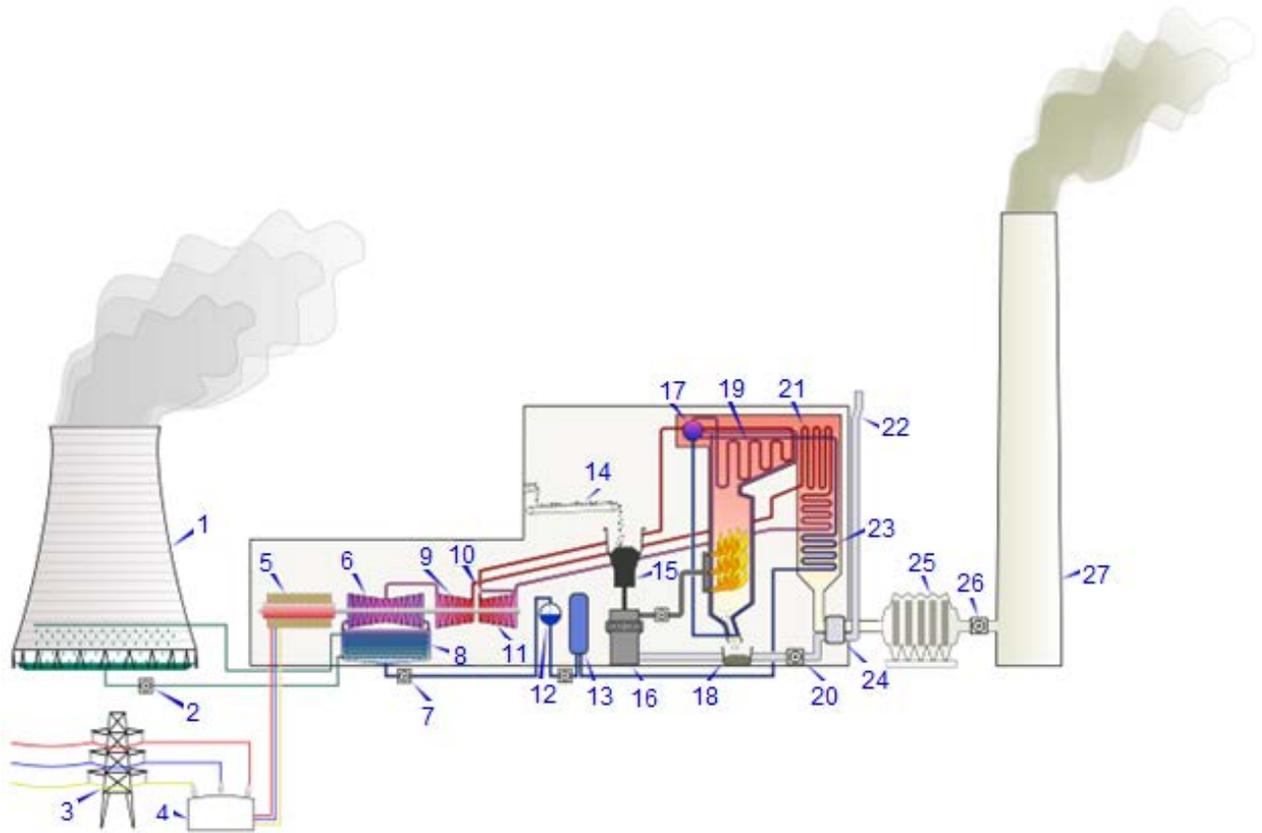


Figura 3-5 Planta fósil

- | | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 1. Torre de enfriamiento | 10. Válvula de Control | 19. Ventilador de flujo forzado |
| 2. Bomba para la torre | 11. Turbina de vapor (alta presión) | 20. Recalentador |
| 3. Línea de transmisión | 12. Desgasificador | 21. Toma de aire |
| 4. Transformador | 13. Precalentador | 22. Economizador |
| 5. Generador | 14. Banda transportadora | 23. Precalentador (aire) |
| 6. Turbina de vapor (baja presión) | 15. Tolva de carbón | 24. Precipitador electrostático |
| 7. Bomba del condensador | 16. Pulverizador de carbón | 25. Ventilador de inducción |
| 8. Condensador | 17. Tambor de vapor | 26. Filtro |
| 9. Turbina de vapor (intermedia) | 18. Tolva para las cenizas | 27. Chimenea (gases de combustión) |

Debido a que operan con carbón principalmente, generan una gran cantidad de CO₂ anualmente y contribuyen de manera significativa al calentamiento global. Además, diversos productos contaminantes pueden ser liberados al ambiente si existen en el combustible partículas de azufre, mercurio y otros metales contaminantes, causando peligros ambientales como lluvia ácida y contaminación de suelos.

Las plantas activas de carbón actualmente son más de 50,000 en todo el mundo y debido a la demanda energética esperan aumentar en los siguientes años. Según algunas estimaciones, la quema de combustibles fósiles proporcionará el 85% de la energía mundial en 2030 debido al incremento de la demanda en un 60% [14].

Existen nuevas técnicas para el procesamiento del carbón que permiten reducir el contenido de algunos contaminantes en éste y gracias al uso de filtros, las emisiones de contaminantes de las nuevas plantas de carbón son mucho menores a las antiguas. Sin embargo, la cantidad actual de estas emisiones está muy por encima de las logradas al quemar gas natural. La Tabla 3-2 [15] hace una comparación de diferentes contaminantes (dióxido de carbono, dióxido de azufre y otros) por unidad de energía producida. También incluye una comparación volumétrica del combustible necesario para producir tal cantidad de energía.

Contaminante	Carbón	Petróleo	Gas
CO ₂ (g/GJ)	94,600	77,400	56,100
SO ₂ (g/GJ)	765	1,350	0.68
NO _x (g/GJ)	292	195	93.3
CO (g/GJ)	89.1	15.7	14.5
Compuestos orgánicos sin metano (g/GJ)	4.92	3.7	1.58
Partículas suspendidas (g/GJ)	1,203	16	0.1
Volumen total del combustible (m ³ /GJ)	360	279	272

Tabla 3-2 Contaminantes de diferentes combustibles

A pesar del costo ambiental, estas plantas se siguen perfilando como las más baratas para cubrir las grandes necesidades energéticas del mundo y técnicas para reducir su impacto en el ambiente se están mejorando día con día.

Además, estas plantas pueden ser convertidas para utilizar otro tipo de combustible como la biomasa o aprovechando los residuos combustibles de las ciudades.

Con el uso de otras fuentes de energía como nuclear, hidroeléctrica, eólica, solar y geotérmica, el uso de plantas fósiles de carbón puede ser disminuido.

3.2.3 Plantas nucleares

Una planta nuclear es una planta térmica donde el generador de vapor es un reactor nuclear. En 2014 la IAEA reportó 435 plantas nucleares operando en 31 países. Las plantas nucleares son usadas principalmente para carga base, debido a que el combustible es barato comparado con otros costos de operación.

El primer reactor nuclear usado para generar electricidad fue puesto en operación en 1948 en Estados Unidos. Desde el comienzo del uso de la energía nuclear para la generación de energía eléctrica comercial a mediados de la década de 1950, diferentes tipos de reactores han sido propuestos y construidos, teniendo como principal diferencia para clasificarlos las sustancias empleadas como moderadores, refrigerantes y combustibles.

En un reactor de agua en ebullición (BWR), el vapor es directamente producido en la vasija a presión y posteriormente dirigido a la turbina, a una presión aproximada de 7 MPa y 288°C [16]. Los reactores de agua en ebullición se clasifican dentro de los reactores de agua ligera, donde ésta actúa como moderador y refrigerante. A este tipo de reactor también se le llama de ciclo directo como muestra la Figura 3-6.

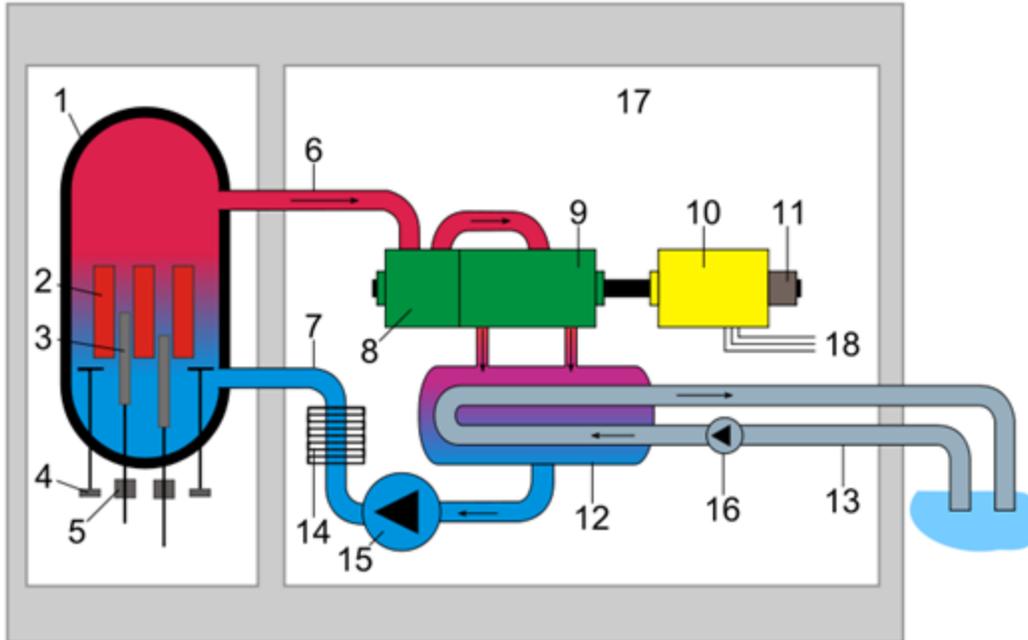


Figura 3-6 Reactor de agua en ebullición

- | | | |
|--|-----------------------------|---------------------------------|
| 1. Vasija del reactor | 7. Línea de agua de | 14. Precalentador |
| 2. Elementos combustibles | alimentación | 15. Bomba de circulación |
| 3. Barras de control | 8. Turbina de alta presión | 16. Bomba del agua de |
| 4. Bombas de recirculación | 9. Turbina de baja presión | enfriamiento |
| 5. Actuadores de las barras de control | 10. Generador eléctrico | 17. Cámara de hormigón |
| | 11. Excitador del generador | 18. Conexión a la red eléctrica |
| 6. Línea de vapor | 12. Condensador de vapor | |
| | 13. Agua de enfriamiento | |

Otro tipo de reactor de agua ligera es el reactor de agua presurizada (PWR), que consta principalmente de dos ciclos, unidos por un intercambiador de calor. En el primer ciclo el agua se calienta pero se mantiene a una presión alta para que no hierva (aproximadamente 325°C a 15 MPa), en el segundo ciclo se genera el vapor que pasa a la turbina. A este reactor se le conoce también como de ciclo indirecto.

La vasija del reactor envuelve al núcleo, que en este tipo de reactores contiene al moderador, refrigerante y elementos combustibles. El vapor se genera dentro de la vasija y pasa por separadores de vapor y secadores dentro de ésta.

El moderador tiene la función de reducir la energía de los neutrones de fisión a neutrones térmicos debido principalmente a los choques elásticos entre los átomos del moderador y los neutrones.

Las barras de control son piezas movibles cruciformes que entran desde la parte inferior del reactor y contienen un material que absorbe los neutrones, como el boro y sus aleaciones con el acero, y se usan para controlar la potencia dependiendo de la posición de éstas. Si las barras de control se insertan, la absorción de neutrones aumenta en las barras y decrece en el combustible, reduciendo así la potencia del reactor.

Para controlar también la potencia del reactor, se cambia el flujo de agua a través del núcleo con las bombas de recirculación, variando la velocidad de éstas. Si la velocidad es aumentada, el flujo de agua en el núcleo se incrementa y la moderación de los neutrones aumenta. Como hay más neutrones térmicos, estos se absorben más fácilmente en el combustible y la potencia del reactor aumenta. Los primeros diseños de BWR no hacen uso de estas bombas de recirculación, usando únicamente a las barras de control para cambiar la potencia del reactor.

En todos los reactores BWR existe una pared cilíndrica (envolvente del núcleo) que separa la zona anular exterior de caudal de recirculación descendente (downcomer) y la zona interior del núcleo, de flujo ascendente, que está en contacto con los elementos combustibles. En la zona anular exterior el agua se encuentra subenfriada mientras que al pasar por el núcleo se encuentra en una mezcla saturada de líquido-vapor que posteriormente se separa.

Para el combustible es necesario utilizar uranio enriquecido ya que el agua ligera absorbe una gran cantidad de neutrones térmicos. El uranio natural, que contiene aproximadamente 0.72% de U^{235} , no puede ser usado en estos reactores para alcanzar la reacción nuclear autosostenida en cadena (punto crítico donde los neutrones producidos son iguales a los neutrones absorbidos más los fugados). El uranio enriquecido en estos reactores contiene entre 2% y 5% de U^{235} .

3.2.3.1 Situación actual de la energía nuclear

Desde la puesta en marcha de los primeros reactores comerciales en la década de 1960 hasta finales de la década de 1980, la capacidad nuclear mundial creció de manera acelerada hasta contribuir en un 16% de la energía eléctrica generada en 1986. Después de este año, el crecimiento de la energía nuclear fue más lento, aunque el porcentaje de participación de la energía nuclear se mantuvo prácticamente constante en los 20 años siguientes. Esto quiere decir que la producción nuclear crecía a la par que la producción mundial de electricidad en este periodo [17]. El máximo histórico en relación a otras fuentes de energía se alcanzó en 1993 con el 17% de contribución de la energía nuclear, pero a partir del 2006 se observa una leve pero constante caída en la participación y en 2012 el porcentaje sólo fue de un 10.4% (Figura 3-7). En la Figura 3-7 [18] se tiene una comparación anual en TWh de la energía eléctrica generada por los reactores, donde se puede apreciar el descenso de los últimos años. El máximo histórico de producción se dio en 2006 con un total de 2660 TWh de energía eléctrica generada. En 2012 se produjeron 2346 TWh, con una caída de 172 TWh o 6.8% con respecto al año anterior.

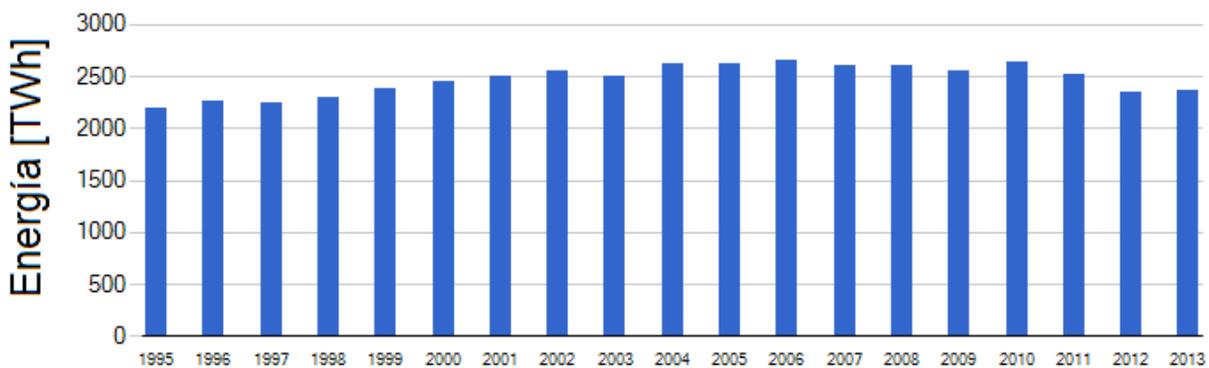


Figura 3-7 Energía nucleoelectrónica generada por año

Existen grandes diferencias de producción entre países. En 2012, entre Estados Unidos, Francia, Rusia, Corea del Sur y Alemania se generó el 67% de la energía nuclear mundial. Los países que han estado incrementando su producción nuclear notablemente son China, la República Checa y Rusia, sin embargo en la mayoría de los casos donde se está aumentando la capacidad nuclear instalada no se mantiene el mismo ritmo de crecimiento que el de la demanda energética, disminuyendo el papel de

la energía nuclear en varios países [19]. El país en donde la energía nuclear tiene una gran participación es en Francia, donde el 73.3% de su energía eléctrica consumida proviene de la energía nuclear. Le siguen Bélgica y Eslovaquia con porcentajes de 52.1% y 51.7% respectivamente

Alrededor de tres cuartas partes de la caída de los últimos años se debe a Japón, que ha pasado de ser el 3° al 18° país en generación de energía nuclear, desde el accidente de Fukushima en 2011. Las autoridades locales, bajo la influencia de la opinión popular, se oponen al reinicio de operaciones de los reactores nucleares suspendidos y al menos a corto plazo el programa nuclear en Japón se encuentra en una crisis, abandonando la energía nuclear.

Actualmente existen 435 reactores nucleares en operación con una capacidad instalada de 373 GWe en 31 países en el mundo, de los cuales 81 pertenecen a la familia de los BWR y 274 a los PWR, en la Figura 3-8 [18] se comparan el número de los diferentes reactores en operación en el mundo Además se están construyendo 72 reactores más en el mundo. También el OIEA estima que 29 países están pensando en desarrollar programas nucleares para generar electricidad.

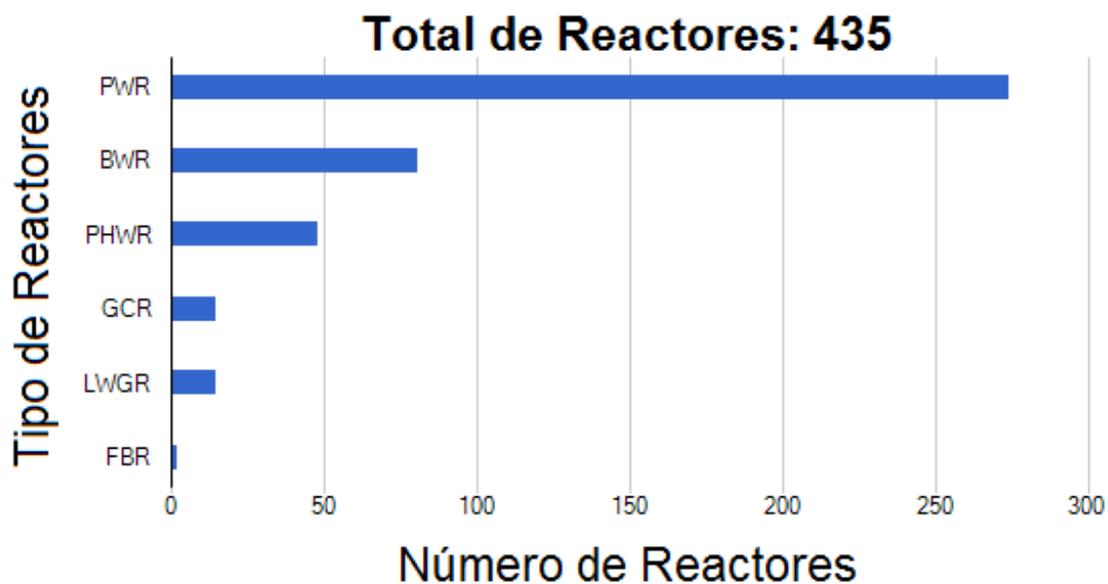


Figura 3-8 Número de reactores en el mundo por tipo

En México existen dos reactores BWR de General Electric en la planta de Laguna Verde, en Veracruz, con una potencia nominal de 665 MWe que en 2013 produjeron 11.3 TWh, equivalentes al 4.63% de la energía eléctrica total del país. La primera unidad fue conectada a la red en 1989 y la segunda en 1994. Se llevó a cabo un programa entre 2007 y 2011 para aumentar la capacidad de ambas unidades en un 20%. El máximo porcentaje de contribución se alcanzó en 1995 con un 6.5%.

En la primera mitad del 2012 el Secretario de Energía, Jordy Herrera habló acerca de ampliar la capacidad nuclear de México y considerarla entre otras fuentes de energía no fósiles para usar en un futuro en un plazo no mayor a 15 años. Su sucesor Pedro Joaquín Codwell ha hablado de la ampliación y potencial de México en el uso de energías renovables y aunque también ha mencionado acerca de un posible aumento de la capacidad nuclear instalada, en realidad no existe plazo alguno definido.

El ESBWR diseñado por General Electric-Hitachi espera tener los costos más bajos que cualquier otro reactor disponible hoy en día y con él incentivar la construcción de nuevos reactores nucleares.

En agosto de 2005, GEH aplicó para obtener la certificación de diseño de la Comisión Reguladora Nuclear de Estados Unidos (NRC). En diciembre del 2010, GEH presentó la 9ª Revisión del ESBWR y en marzo del 2011 el equipo emitió un reporte final de evaluación de seguridad y la aprobación final del diseño.

A finales del 2011, cuando el equipo de la NRC estaba preparando la última norma, diferentes problemas fueron identificados con el sistema de secado de vapor. La NRC condujo una auditoría de la metodología de diseño del sistema de secado del vapor.

La NRC emitió peticiones para obtener información adicional. La resolución de estos problemas requería de un análisis adicional por el aplicante y revisión por la NRC para aceptar el diseño para su certificación. Las respuestas a todas las peticiones fueron recibidas en diciembre de 2013.

El 1º de abril del 2014, GEH envió la 10ª revisión del ESBWR. Un reporte final de la evaluación de seguridad con la revisión del equipo de la NRC en las cuestiones del

secador de vapor. El proceso de certificación se reanudó y en septiembre de 2014 la NCR aprobó la certificación para que el ESBWR sea usado en Estados Unidos.

Se espera el inicio de la construcción de los primeros reactores ESBWR para el 2016. Estos reactores generarán 1594 MWe y contendrán nuevos sistemas pasivos que permitirán enfriar el núcleo en un accidente sin la necesidad de una fuente externa de energía.

3.2.4 Ciclo combinado

La definición termodinámica de ciclo combinado es tener dos diferentes máquinas térmicas trabajando en tándem para generar energía mecánica. Después de completar el primer ciclo termodinámico, el fluido de trabajo puede ser utilizado y extraer más energía de él para accionar un segundo ciclo. Esto tiene como consecuencia directa aumentar la eficiencia general del sistema.

El uso actual del ciclo combinado consiste en utilizar una turbina de gas (ciclo Brayton) y una turbina de vapor (ciclo Rankine) donde parte del calor de los gases de escape de la turbina de gas pasan por un intercambiador de calor (HRSG) que produce vapor para mover a la segunda turbina. En la Figura 3-9 se muestra un diagrama de flujo del aire y el vapor como fluidos de trabajo y el intercambiador o recuperador de calor que permite aumentar la eficiencia termodinámica del ciclo.

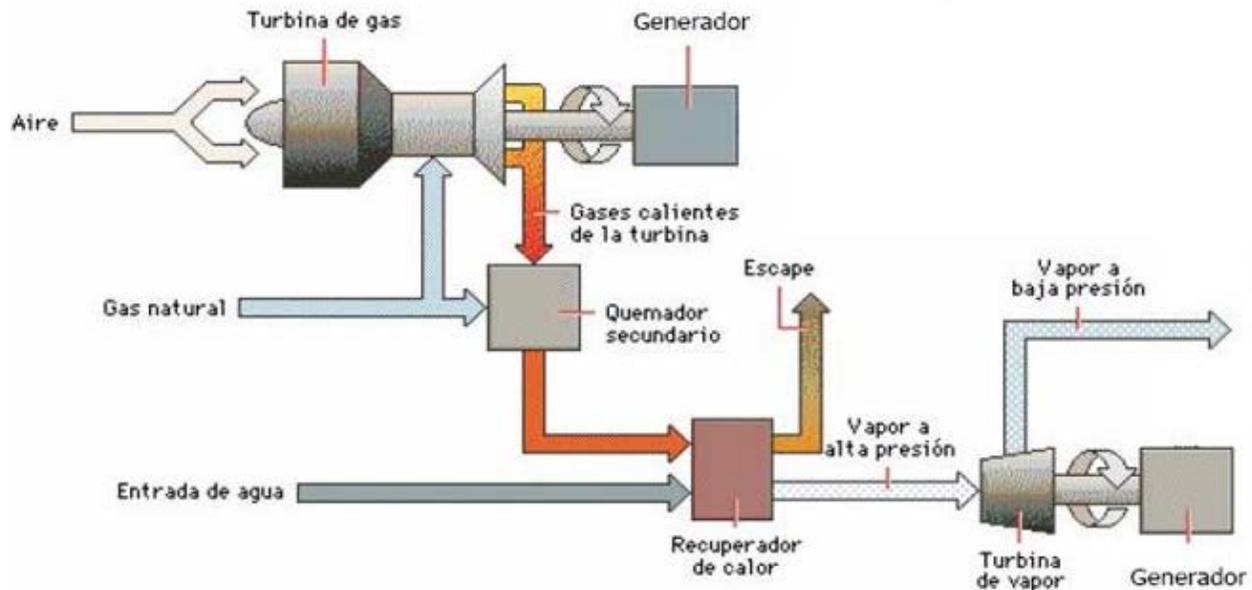


Figura 3-9 Diagrama de una planta de Ciclo Combinado

La eficiencia térmica del ciclo se puede situar arriba del 50%, a comparación, los ciclos simples no alcanzan más allá de un 35%. Con el objetivo de ahorrar costos e incrementar la salida de potencia típicamente se pone una turbina de vapor por dos o tres de gas, combinaciones típicas 2x1 están alrededor de los 400 MW por planta.

La mayoría de las plantas de ciclo combinado operan en eficiencias entre el 55% y 59%. Los nuevos diseños se centran en incrementar la temperatura de la turbina de gas a 2500 °F (1370°C) para aumentar la eficiencia hasta en un 60%. Diseños de GE en la serie H de gas utilizan parte del vapor producido para enfriar los álabes de la turbina de gas. En 2011, Siemens anunció haber alcanzado el 60.75% de eficiencia con una turbina de gas de 578 MW.

GE con su nueva 9HA alcanza el 41.5% de eficiencia en ciclo simple y 61.4% en ciclo combinado, llegando a una potencia total por planta de 592 MW hasta 701 MW. Las condiciones de operación son de más de 2600 °F (1430 °C) y relaciones de compresión de casi 22 a 1.

Debido a que la disponibilidad del gas natural ha aumentado en los últimos años, las turbinas de gas y su aplicación en una planta de ciclo combinado se ha vuelto cada vez más atractiva para los inversionistas. Algunos países como China están incrementado

su flota instalada de turbinas de gas porque no pueden confiar en turbinas hidroeléctricas y presas en temporadas prolongadas de sequía.

Pequeñas plantas de ciclo combinado pueden funcionar con los gases producidos en reactores con desechos orgánicos, perfilándose como una opción viable para comunidades rurales apartadas.

Otra de las mejoras que se pueden utilizar en este ciclo es incluir la energía solar en recolectores térmicos para aumentar la producción de electricidad en unos cuantos megawatts, mejorando la eficiencia y disminuyendo el impacto ambiental.

3.2.5 Generación de electricidad mundial

Existen diferentes fuentes para la generación de energía eléctrica pero el carbón y los combustibles fósiles se han mantenido como la fuente principal para generarla a nivel mundial. Sin embargo, otras alternativas han surgido en base a necesidades económicas, ecológicas y de disponibilidad de recursos para cada país.

Para un mejor análisis de la situación de cualquier fuente de energía deben considerarse y compararse principalmente dos valores:

- El primer parámetro es el total de energía eléctrica generado por dicha fuente (expresado normalmente en kWh o TWh).
- El segundo parámetro a considerar es el porcentaje de participación o contribución, que se entiende como la energía generada por la fuente de estudio comparada con el total generado por todas las fuentes de un país o del mundo.

La Figura 3-10 [20] muestra cómo ha ido creciendo el consumo mundial de energía de las diferentes fuentes respecto al tiempo. Se puede observar un alza general en todas las fuentes, menos la nuclear en los últimos años.

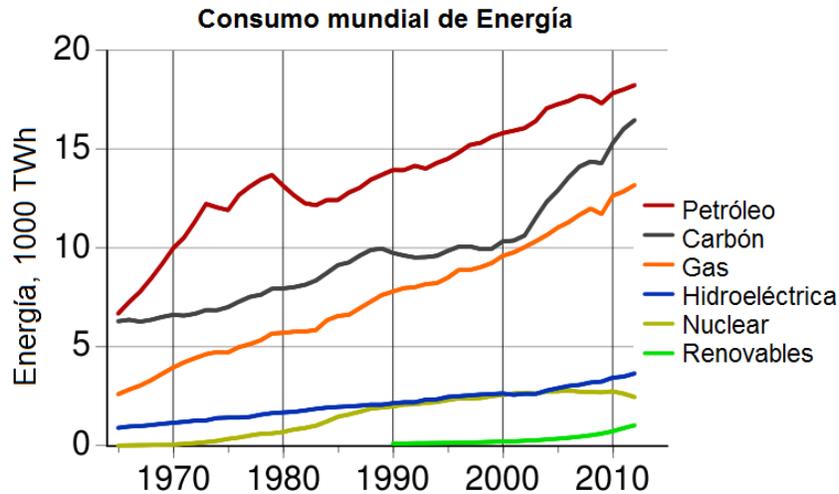


Figura 3-10 Consumo de energía para diferentes fuentes

En el 2012, el consumo estimado de energía en el mundo fue de 488,505 TWh o el equivalente a 5.59×10^{20} J. A pesar de los esfuerzos realizados, de 2000 a 2012 la fuente de energía que registró el mayor crecimiento fue el carbón. La Figura 3-11 muestra en porcentajes la generación de electricidad mundial por fuente. Es de notarse que el carbón y el gas natural contribuyen juntos en más del 62% de la generación de electricidad.

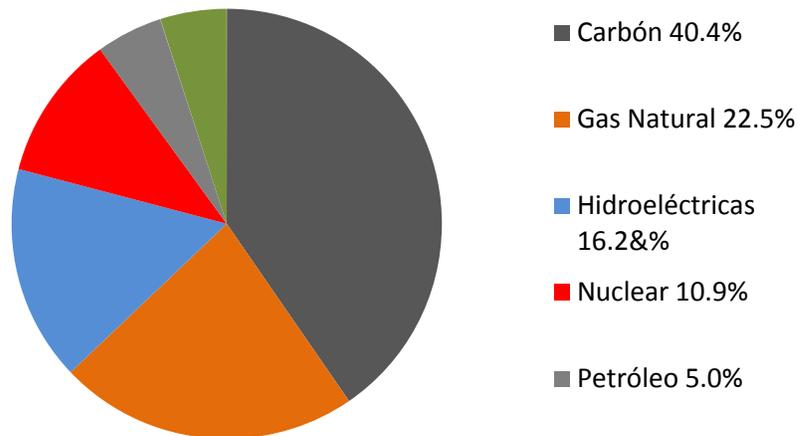


Figura 3-11 Generación de electricidad mundial por fuente (2012)

La demanda de electricidad continúa al alza y crece de manera acelerada incluyendo los países en vías de desarrollo, que para los próximos años invertirán en aumentar su capacidad instalada.

3.3 Principales componentes de una Turbina de Vapor

Para que la turbina de vapor pueda convertir la energía térmica en trabajo mecánico requiere de una serie de componentes físicos que serán descritos en las siguientes secciones. Básicamente, la turbina consiste de los siguientes componentes:

- El rotor o flecha que contiene a los álabes rotatorios que transforman la energía del vapor en movimiento.
- La carcasa que encierra al vapor para que no escape y las toberas fijas que dirigen el vapor a los álabes, permiten su expansión y aumentan su velocidad.
- Sistemas funcionales auxiliares que permiten el correcto funcionamiento y regulación de la máquina, incluyendo válvulas, rodamientos, sistemas de lubricación y refrigeración, tornaflecha y controladores, entre otros.
- Sistemas estructurales que soportan el peso de la carcasa y todos los demás componentes.

Algunos componentes de la turbina son diseñados para mantenerse funcionales durante un par de décadas. La Tabla 3-3 muestra valores reales de la vida promedio de algunos componentes y su periodo estimado de manufactura, obtenidos de un catálogo para turbinas de carga base [21].

Componente	Tiempo de vida útil	Periodo recomendado para su reemplazo	Tiempo de manufactura
Rotor	20-25 años	15-20 años	8 meses
Toberas	15-20 años	15-20 años	6 meses
Rodamientos	10-15 años	10 años	6 meses
Reductor	15-20 años	15 años	6 meses
Válvulas de control	10-15 años	10 años	5 meses

Tabla 3-3 Vida estimada de algunos componentes

Para lograr que los componentes se mantengan funcionales después de varios años, estos sistemas deben ser diseñados cuidadosamente para garantizar las condiciones de salida en las turbinas, además de evitar daños costosos que mantengan al equipo fuera de funcionamiento, extendiendo los mantenimientos previstos. En las siguientes secciones se explora las características generales necesarias para cada componente.

3.3.2 Rotor y álabes

El rotor de una turbina es la flecha al centro de ésta. Es la parte de la turbina que permite llevar la potencia mecánica al generador y con ella producir electricidad, o con ésta accionar equipo mecánico como bombas. Las ruedas de alabes usualmente se acoplan en caliente al rotor (para usos a alta velocidad), pero también se pueden hacer en monoblock y posteriormente al rotor se le maquina una ranura para poder insertar los álabes en él. El rotor debe ser capaz de soportar las fuerzas centrífugas debido a su propio peso y velocidad de giro, además del torque producido por la expansión del vapor entre etapas. Durante la operación de la turbina, pueden producirse momentáneos roces entre éste y las partes estacionarias como los sellos; el rotor debe ser capaz de soportar momentáneamente estos eventos sin sufrir daño alguno. Los rotores principalmente de baja presión también se ven sometidos a altas cantidades de humedad y deben ser resistentes a la erosión producida por ésta. Además, aunque existen filtros para componentes corrosivos, en algunos casos se pueden producir pequeñas fugas o aumentar la concentración de estos en algunas etapas, atacando al material del rotor que debe ser diseñado para minimizar este daño.

El rotor de una turbina de acción o impulso es de acero con ciertas cantidades de níquel o cromo para darle tenacidad al rotor, con un diámetro aproximadamente uniforme. En las turbinas de impulso el diámetro puede cambiar de etapa a etapa. El material requerido para el rotor depende de dos factores: las condiciones del vapor y los diámetros requeridos para cada etapa. La especificación incluye la composición química del rotor y la máxima cantidad de impurezas aceptadas, así como los procesos de manufactura y tratamientos térmicos, para cumplir con ciertas propiedades mecánicas mínimas. Un ejemplo de las composiciones químicas según su aplicación puede ser encontrado en la Tabla 3-4 muestra diferentes aleaciones típicas para cada aplicación, sin embargo, pueden diferir de los requerimientos específicos según sus particulares condiciones de presión, temperatura y uso.

	Baja Presión		Media presión (Nuclear)		Alta presión (Fósil)	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Carbono	0.25	0.35	0.20	0.30	0.25	0.35
Cromo	1.30	1.80	2.30	2.80	0.90	1.50
Molibdeno	0.25	0.35	0.40	0.55	1.00	1.50
Vanadio	-	-	-	-	0.20	0.30
Manganeso	0.50	0.80	0.50	0.80	-	1.00
Níquel	0.50	1.00	-	0.60	-	0.75
Silicio	-	0.35	-	0.35	0.15	0.35
Fósforo*	-	0.030	-	0.020	-	0.015
Azufre*	-	0.003	-	0.020	-	0.018

*Impurezas que deben ser mantenidas al mínimo

Tabla 3-4 Composición química de diferentes aceros para rotores

Una lista con ejemplos de las propiedades mecánicas mínimas esperadas puede ser encontrada en la Tabla 3-5.

	Baja Presión		Alta presión (Nuclear)	Alta presión (Fósil)
	psi	MPa		
Esfuerzo máximo	90,000	620.5	90,000	95,000
			620.5	655.0
Cedencia 0.20%	66,500	458.5	66,500	85,000*
			458.5	586.1*

*Esfuerzo de cedencia de 0.02% reportado para unidades fósiles de alta presión

Tabla 3-5 Propiedades mecánicas de diferentes aceros para rotores

El tratamiento térmico a seguir depende de la sección en la que será usado el rotor. Para secciones de alta presión y temperatura, en el caso de la forja se le da un normalizado y revenido, el primero a una temperatura mayor a la de transformación ($T > 800^{\circ}\text{C}$) y posteriormente se enfría con aire. Después se maquina y se realiza otro revenido para eliminar esfuerzos residuales. Los rotores de baja presión y temperatura tienen un tratamiento térmico parecido al de los de alta presión, pero con la excepción de que pueden ser templados con agua.

Existen pruebas no destructivas que se aplican a los rotores. Primero se hace una inspección visual para saber si no existen grietas u otras imperfecciones. Pruebas con partículas magnéticas son empleadas para conocer el estado de las superficies y garantizar que no haya discontinuidades. Las pruebas de ultrasonido se utilizan para

conocer el estado interno de la forjas. Pruebas de líquidos penetrantes o similares también son llevadas a cabo.

La fundición y forja del rotor tienden a concentrar las impurezas en el centro del eje y es por eso que en algunos rotores se lleva a cabo un barrenado, que puede extenderse en toda la longitud del rotor. La Figura 3-12 representa un rotor barrenado y muestra puntos donde se realizan pruebas mecánicas a la forja. En el interior de este también pueden llevarse a cabo pruebas no destructivas para conocer el estado del rotor, pero el barrenado es un proceso que encarece mucho al rotor. Con las nuevas técnicas de forja y fundición, algunos diseñadores o clientes optan por no hacer este barrenado.

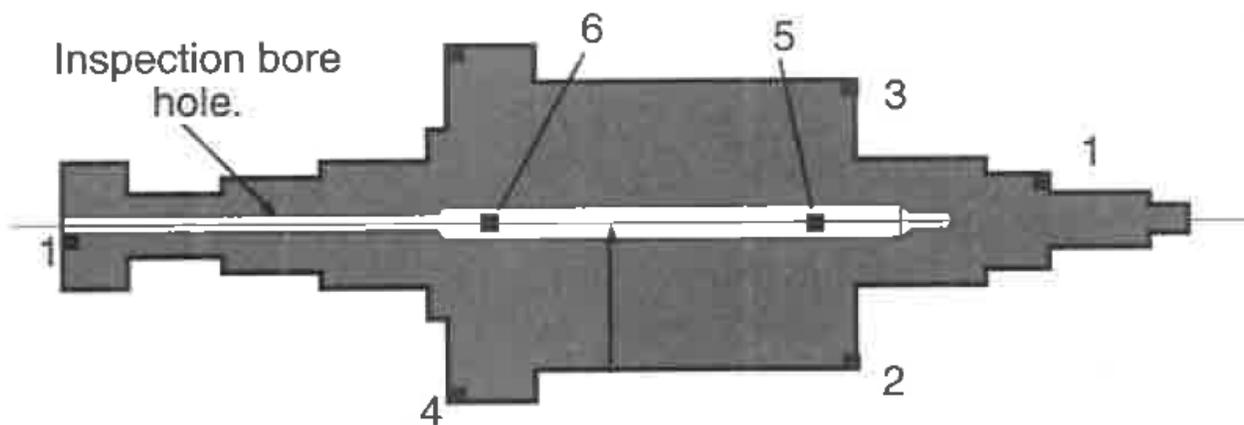


Figura 3-12 Rotor barrenado

Los álabes que van montados sobre el rotor son los que permiten transformar la energía del vapor (absorbiendo momento cinético) y convertirla en energía rotacional, moviendo al rotor. Su diseño es crucial para esta tarea y frecuentemente se hacen modificaciones a su perfil. Los álabes se fabrican de distintas aleaciones dependiendo las condiciones de trabajo a las que son sometidos y se toman en cuenta los perfiles de diseño según los ángulos de salida de vapor y las velocidades necesarias. Las últimas etapas de la turbina de vapor deben estar protegidas contra la erosión debido a la posible existencia de partículas de agua. En la mayoría de éstas, se suelda una cinta en el borde de ataque de cada álabe para retardar la erosión. También los álabes de las últimas etapas para turbinas de vapor grandes suelen unirse entre sí en uno o varios puntos intermedio para dotarlos de rigidez debido a su tamaño, colocando un

alambre intermedio. Cada vez son más usuales álabes de la última etapa en rangos de 40 in. o 102 cm., para aplicaciones de ciclo combinado. En aplicaciones nucleares los álabes pueden ser de 52 in. o 132 cm.

En la Figura 3-13 se puede apreciar diferentes tipos de raíz de álabes. El tipo axial usado normalmente para álabes de las últimas etapas y el tipo tangencial usado para álabes de las primeras etapas.



Figura 3-13 Diferentes tipos de raíz del álabe

Los álabes están sujetos a diferentes condiciones de esfuerzo: están sometidos a esfuerzos de tipo vibratorio, altas temperaturas (principalmente en las primeras etapas) y trabajan a altas revoluciones. Es por eso que se fabrican con procesos cuidadosos para soportar las condiciones de desgaste y resonancia, además de los cambios de presión y temperatura del vapor.

Su montaje sobre el rotor requiere especial cuidado. Debido a que los álabes giran a grandes revoluciones, su construcción y montaje se hace con mucha precisión. En nuevas unidades se realiza un balanceo para evitar excesivas vibraciones durante el su funcionamiento. La Figura 3-14 muestra el rodete con los álabes rotatorios para una sección de baja presión.



Figura 3-14 Rodete de una sección de baja presión

Las partes del rodete que va montado sobre el rotor son la raíz de los álabes para sostenerlos, los álabes rotatorios y las bandas o cinchos que mantienen unidos a los álabes. Estas partes son mostradas en la Figura 3-13.

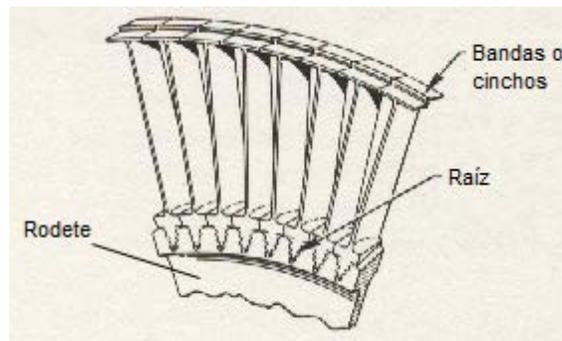


Figura 3-15 Partes de un rodete

3.3.2.1 Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos mencionados son descritos a continuación.

- **Normalizado**

El objetivo del normalizado consiste en proveer uniformidad al tamaño de grano y a la composición de la aleación. En una aleación de hierro, la pieza es llevada por encima de su temperatura de transformación austenítica ($T > 800^\circ$) y luego es enfriado lentamente exponiéndolo al aire.

El normalizado deja una estructura de perlita fina o algunas veces martensita distribuida de manera más uniforme en la pieza, dando una mayor resistencia al acero pero menor ductilidad que si se realizara un recocido completo.

- **Temple**

La pieza se calienta por debajo del punto de fusión y posteriormente se enfría rápidamente, provocando en los aceros una microestructura de martensita, que incrementa la dureza pero reduce la ductilidad del material. Si el porcentaje de carbono en el acero es menor al 0.4%, el temple no es posible.

- **Revenido**

El revenido se realiza después del temple para eliminar los excesivos esfuerzos térmicos después de este y así disminuir la fragilidad del acero templado. Consiste en calentar la pieza a una temperatura de revenido ($T < 650^\circ$) y mantener la pieza por determinado tiempo a esta temperatura. Con esto se reducen las dislocaciones y los esfuerzos residuales disminuyen.

3.3.2.2 Pruebas no destructivas

Como se mencionó anteriormente, existen pruebas no destructivas que se realizan al rotor y otros componentes para saber si existe alguna discontinuidad.

- **Inspección por partículas magnéticas**

Esta prueba se puede realizar en materiales ferromagnéticos como el hierro, níquel, cobalto y sus aleaciones. El proceso consiste en magnetizar la pieza ya sea directa o indirectamente y posteriormente aplicar partículas ferrosas sobre la pieza (normalmente óxido de hierro de 5 a 170 μm de grosor).

Las discontinuidades en la pieza son encontradas debido a la fluctuación del campo magnético, que atrae a las partículas ferrosas en un área en particular.

Al final del proceso, la pieza debe ser desmagnetizada con una corriente igual o más grande que la usada originalmente para magnetizar la pieza.

Esta prueba puede ser la preferida para rotores ferromagnéticos.

- **Inspección por líquidos penetrantes**

Es una prueba que se aplica para detectar discontinuidades en la superficie de las piezas no porosas. Las discontinuidades que se pueden encontrar son defectos de forja y soldadura, porosidad en la superficie y grietas debido a la fatiga de los componentes.

La superficie a analizar debe ser limpiada para evitar errores en las pruebas. Luego el líquido penetrante se aplica y se deja absorber por un periodo de 5 a 30 minutos. Se remueve el excedente del líquido y se usa un indicador para mostrar las áreas donde quedó el líquido penetrante. La inspección se realiza con una buena fuente de luz y evitando la luz exterior. Al final la superficie es lavada de nuevo.

Dentro de las ventajas de esta prueba están su bajo costo, sin embargo, sólo se pueden detectar discontinuidades superficiales y su aplicación en superficies rugosas puede ser complicada debido a que el líquido penetrante se puede acumular indicando falsos positivos.

- **Inspección por ultrasonido**

Se utilizan ondas ultrasónicas típicamente en el rango de 0.1-15 MHz para detectar discontinuidades internas, especialmente en aleaciones metálicas de acero. Un transductor ultrasónico es conectado a una máquina que se utiliza para inspeccionar el objeto, que también sirve como receptor de las ondas reflejadas. Se utiliza agua o aceite para permitir la propagación de las ondas de ultrasonido entre la pieza y el emisor. Dentro de las ventajas de este procedimiento están el alto poder penetrante, alta sensibilidad para encontrar grietas muy pequeñas y no necesita protección especial por parte de los operarios para realizarse. Como desventajas se pueden mencionar lo poco práctico para superficies irregulares o no homogéneas, así como la necesidad de un operario experimentado.

- **Inspección radiográfica**

Se utiliza la inspección radiográfica para detectar defectos internos en los objetos usando fotones de alta energía en el rango de los rayos X. Se necesita una fuente radioactiva de rayos-X como Ir-192 o Co-60 como fuente de fotones con longitud de onda menos a los 10 nm.

En la superficie contraria del objeto a analizar, se puede medir la cantidad de radiación al otro lado y con esto se puede determinar el grosor y composición del objeto, así como sus defectos internos.

Dentro de las ventajas podemos mencionar una resolución mayor a la prueba de ultrasonido, pero requiere equipo de protección especial para los operarios. Así mismo, una grieta plana podría pasar desapercibida por un operario no experimentado.

3.3.3 Carcasa y álabes estacionarios

La carcasa encierra a las partes móviles de la turbina y su función principal es contener el fluido de trabajo y evitar que escape al exterior. Su diseño depende de la sección en la que serán utilizadas; existen carcasas necesarias para condiciones de alta presión y temperatura (arriba de los 700°F y hasta 3500 psig) y carcasas que son utilizadas para condiciones de baja presión y temperatura. Las carcasas de la sección de alta presión deben soportar grandes condiciones de esfuerzos tangenciales, longitudinales y radiales sobre sus paredes. Las etapas de recalentamiento están sometidas a una menor presión, pero el incremento del volumen específico del vapor las hace tener que soportar condiciones similares a las primeras. Las carcasas de las secciones de baja presión están sometidas a menores esfuerzos y en la mayoría de las unidades de carga base están divididas en dos partes simétricas para cancelar el empuje axial y manejar el flujo expandido del vapor. Para poder ensamblar el rotor, la carcasa se divide en dos partes: la carcasa inferior y la carcasa superior. En la carcasa se fijan las toberas o álabes fijos, instalando los diafragmas de toberas.

Las aleaciones de acero se utilizan para fabricar las carcasas ya que deben soportar determinadas condiciones de presión y temperatura. El material elegido depende de si se trata de una turbina de alta, media o baja presión y su selección es de especial importancia en la sección de alta presión. Al incrementarse las condiciones de entrada de vapor para mejorar la eficiencia, también tuvo que mejorarse los procesos de fabricación de la turbina y el control de impurezas de la fundición. La composición química es controlada para asegurar sus propiedades mecánicas y reducir defectos que pongan en peligro la integridad estructural de la carcasa. Para temperaturas hasta

los 750°F un acero ASTM A27 grado 65-35 es aceptable. Para temperaturas superiores, ASTM A356 grupo 8 y grupo 9 son necesarios.

La Tabla 3-6 contiene la composición química de los aceros mencionados. Se debe notar que el azufre y fósforo son impurezas comunes así como el antimonio, arsénico y estaño presente en el material y que se deben mantener al mínimo debido a que afectan negativamente a las propiedades mecánicas de la aleación.

	ASTM A27 Gr 65-35	ASTM A356 Gr8	ASTM A356 Gr9
Carbono	0.30	0.13-0.20	0.13-0.20
Manganeso	0.70	0.50-0.90	0.50-0.90
Silicio	0.80	0.20-0.60	0.20-0.60
Azufre*	0.06	0.030 Max.	0.030 Max
Fósforo*	0.05	0.035 Max.	0.035 Max.
Molibdeno		0.90-1.20	0.90-1.20
Cromo		1.00-1.50	1.00-1.50
Vanadio		0.05-0.15	0.20-0.35
*Impurezas			

Tabla 3-6 Composición química de diferentes aceros para carcasas

La Tabla 3-7 muestra las propiedades mecánicas mínimas de esas aleaciones. Para alcanzar estas propiedades es necesario controlar los componentes químicos y mantener al mínimo las impurezas.

		ASTM A27 Gr 65-35	ASTM A356 Gr8	ASTM A356 Gr9
Esfuerzo máximo	psi	65000	80000	85000
	MPa	448	552	586
Esfuerzo de cedencia	psi	33000	50000	60000
	MPa	228	345	414
Elongación	%	24	18	15

Tabla 3-7 Propiedades mecánicas de diferentes aceros para carcasas

Las carcasas se pueden aislar térmicamente para evitar la pérdida de calor al exterior, aumentando el rendimiento de la turbina y disminuyendo las pérdidas de energía en el vapor. En la Figura 3-16 se puede observar la mitad inferior de la doble carcasa para la sección de alta e intermedia presión, con el rotor montado sobre ésta (en gris). Los álabes de las diferentes etapas están marcados con diferentes colores.

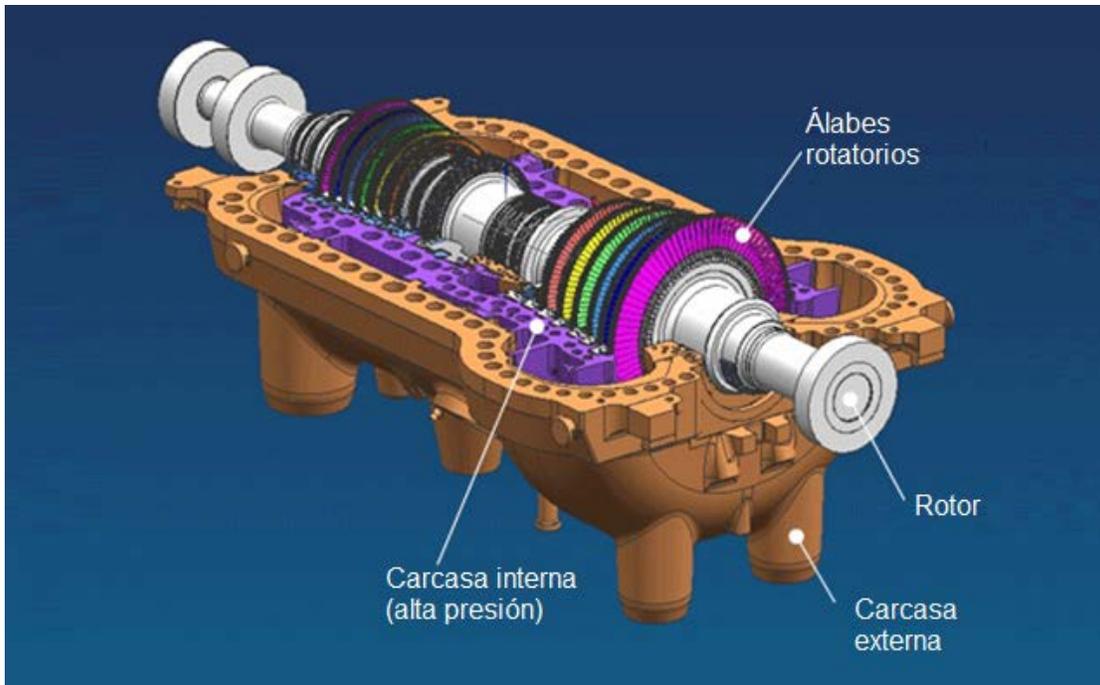


Figura 3-16 Carcasa y rotor de una turbina de vapor

Los álabes estacionarios o toberas están sujetos de la carcasa interior y permiten la expansión del vapor entre etapas, aumentando la energía cinética y dirigiendo el vapor a la siguiente sección de álabes rotatorios. Las toberas también tienen la función de dirigir el vapor en un ángulo específico de diseño. Al conjunto de álabes estacionarios por etapa se le llama diafragma y están divididos a la mitad para facilitar su ensamble en la turbina. La Figura 3-17 muestra el concepto de un diafragma completo con sus dos mitades ensambladas, su anillo exterior, interior y las toberas entre estos.



Figura 3-17 Diafragma de una turbina de vapor

La mayoría de las turbinas industriales tienen arcos parciales de carga en su entrada. Esto quiere decir que se utiliza activamente una menor área activa que la brindada por la circunferencia completa. Esto tiene una repercusión en la carga de los rodamientos debido a que la apertura de las válvulas puede no ser simétrica.

Para la fabricación de los álabes se utiliza normalmente acero austenítico o acero inoxidable AISI 410 o 403. El problema del acero austenítico es que tiene un coeficiente de expansión térmica diferente y debe ser considerado en la etapa de diseño. Los anillos inferiores o superiores son normalmente de aleaciones de acero forjado. El fenómeno de deformación por fluencia lenta (creep, en inglés) debe ser tomado en cuenta principalmente en los diafragmas de las primeras etapa debido a las condiciones de temperatura que son sometidos.

3.3.3.1 Arco parcial

En algunas turbinas, la entrada de vapor está dividida en segmentos o arcos parciales que están cada uno de ellos conectados directamente a una válvula de control que permite limitar la cantidad de vapor de la turbina sin perder la eficiencia que supondría controlarlo con una sola válvula. La secuencia de apertura es controlada por el operador y resulta de especial utilidad en el arranque de la turbina o en condiciones donde se tenga que operar a cargas intermedias.

3.3.3.2 Doble carcasa

La doble carcasa (como muestra de ejemplo la Figura 3-16) permite minimizar y controlar el gradiente de temperatura entre la superficie interna expuesta al vapor de alta temperatura y la superficie externa. Al controlarse de mejor manera el gradiente de temperatura, la expansión térmica diferencial es controlada permitiendo así unos claros más cerrados con su beneficio en la eficiencia general del equipo. La superficie exterior de la carcasa interior es calentada con vapor de alguna otra sección. La desventaja principal es que aumentan las dimensiones generales del equipo, así como el peso que deben soportar los cimientos al tener dos carcasas.

3.3.4 Rodamientos o chumaceras

Las chumaceras de apoyo son elementos que soportan el peso del rotor y permiten que este ruede sobre ellos. Su superficie interna está cubierta con un material llamado metal Babbitt que consiste en una aleación suave que estará en contacto con el rotor. Este material es un compuesto de matriz metálica y pequeñas partículas que junto con el lubricante disminuyen la fricción y evitan el desgaste.

Las composiciones comunes del metal Babbitt se listan a continuación:

- 90% estaño, 10% cobre
- 89% estaño, 7% antimonio, 4% cobre
- 80% plomo, 15% antimonio, 5% estaño
- 67% cobre, 28% estaño, 5% plomo
- 76% cobre, 24% plomo

Por su parte, la chumacera axial impide o limita el desplazamiento del rotor en la dirección del eje. Este empuje axial se da por el efecto del vapor expandiéndose y debe permitir la expansión térmica del rotor cuando se encuentra en funcionamiento. Al igual que los anteriores, las chumaceras deben estar recubiertas por una capa de material que disminuya la fricción, sin olvidar su respectivo lubricante.

Normalmente se realizan lecturas del desplazamiento axial y el nivel de vibraciones en las chumaceras para saber si hay algún problema de alta vibración en la turbina por el cual se deba efectuar una parada inmediata de ésta.

En el dibujo mostrado en la Figura 3-18 se puede apreciar la localización y ensamble de la chumacera de empuje de una turbina de vapor mediana. A la izquierda se muestran las estructuras principales además del sitio de contacto axial mientras que a la derecha se muestra el final del rotor y el ensamble del cojinete.

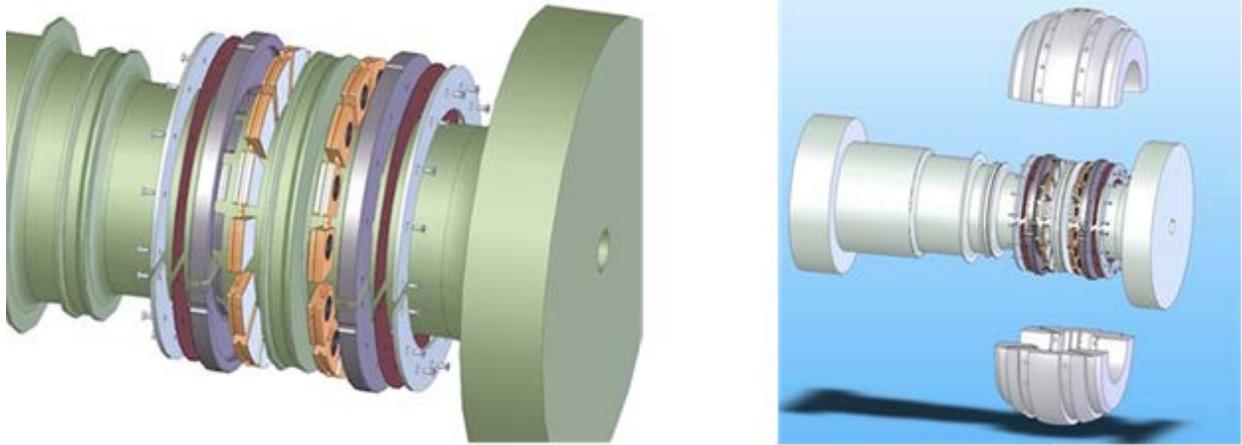


Figura 3-18 Localización y ensamble del rodamiento de empuje axial y radial

3.3.5 Válvula de regulación y paro

Regula el caudal de entrada a la turbina, siendo de los elementos más importantes de la turbina de vapor. Puede ser accionada hidráulicamente con la ayuda de aceite o neumáticamente. Forma parte de dos lazos de control: el lazo que controla la velocidad de la turbina y el lazo que controla la carga o potencia de la turbina.

La Figura 3-19 muestra la válvula de regulación para la sección de baja presión de una turbina de vapor, con su respectivo actuador.



Figura 3-19 Válvula de regulación con actuador

Las válvulas de control deben ser capaces de controlar el flujo de vapor de manera precisa, operando con cambios grandes y pequeños en la presión del vapor sin causar inestabilidad al gobernador. También deben ser diseñadas para minimizar la caída de presión, ya que este proceso de estrangulamiento significa energía perdida y la reducción de la eficiencia en el ciclo y por último deben ser capaces de cerrarse rápidamente en casos de emergencia.

3.3.6 Sistemas auxiliares

Además de los componentes ya mostrados anteriormente, existen una serie de sistemas auxiliares necesarios para el correcto funcionamiento de la turbina. Estos sistemas si bien no participan directamente en la generación de potencia, son vitales para mantener a la turbina operativa y evitar daños en ésta.

3.3.7 Sistema de lubricación, refrigeración y control

Diferentes componentes de la turbina necesitan de un fluido lubricante, principalmente las chumaceras o rodamientos. Este sistema se encarga del suministro del fluido lubricante que generalmente es aceite. El sistema está equipado con diferentes bombas para asegurar la circulación del aceite incluso en situaciones de emergencia. El sistema actualmente suele estar equipado con bombas mecánicas, de corriente alterna y corriente directa.

La bomba principal suele estar acoplada al eje de la turbina que proporciona el empuje mecánico necesario para accionarla y no requiere de un suministro de energía eléctrica para estar activada, sin embargo, en los arranques esta bomba se utiliza debido al movimiento limitado del rotor de la turbina. Principalmente en equipos antiguos la bomba principal esta accionada por una turbina de vapor pequeña que funciona con el vapor de baja presión de la turbina principal y, en condiciones necesarias, con una mezcla del vapor de alta presión para proporcionar mayor velocidad. Si la bomba está acoplada al rotor, en el arranque se usa una bomba auxiliar adicional.

La bomba auxiliar se utiliza en los arranques y paradas de la turbina principal. Sirve para asegurar la correcta presión de aceite hasta que la bomba mecánica pueda

realizar esta función. Esta bomba está en funcionamiento en el arranque de la turbina y se desconecta a unas revoluciones determinadas durante el arranque, cambiándose automáticamente a la bomba principal cuando puede proporcionar la presión necesaria. Las bombas auxiliares suelen ser accionadas por motores eléctricos de corriente alterna que están conectados al suministro eléctrico.

Hay una bomba de emergencia que se utiliza cuando la planta se encuentra aislada del suministro eléctrico, debido a que sin corriente alterna la bomba auxiliar tampoco funcionaría. Para evitar este problema y lubricar los componentes necesarios, las turbinas suelen ir equipadas con una bomba de emergencia que funciona con corriente continua proveniente de un sistema de baterías. Esto es una norma de todas las plantas nucleares donde se requieren sistemas redundantes para evitar un accidente.

Debido al uso del aceite como lubricante, en su recorrido se calienta por fricción en las chumaceras, modificando su viscosidad y propiedades lubricantes. Este aceite podría degradarse o incluso inflamarse si el calor es excesivo y su temperatura llevada más allá de sus límites de operación. Para evitar este problema, es necesario que el sistema de lubricación tenga además un sistema de enfriamiento. Este sistema de enfriamiento consiste de unos intercambiadores de calor que enfrían al aceite. Estos intercambiadores pueden funcionar con aire de forma que el calor del aceite se evacua a la atmósfera, o de agua, de tal forma que el calor se transfiere al circuito cerrado de refrigeración con agua de la planta.

El depósito del aceite lubricante suele estar a presión inferior a la atmosférica para facilitar la extracción de vapores de aceite y dificultar una posible fuga de aceite al exterior. Para conseguir este vacío, el sistema de lubricación suele ir equipado con un extractor

El aceite también se utiliza para accionar a las válvulas de regulación y de paro, y el conjunto de la turbina va equipado con un grupo de presión para el circuito del aceite de control que debe mantenerse normalmente entre los 50 y los 200 bares de presión hidráulica. El sistema de control gobierna la válvula de salida del grupo, que hace llegar al aceite hasta la válvula de regulación de entrada de vapor con la presión adecuada.

En la Figura 3-20 se aprecia el módulo de aceite para lubricación y control, con sus bombas principales y de emergencia, intercambiadores de calor y tanque hidráulico.

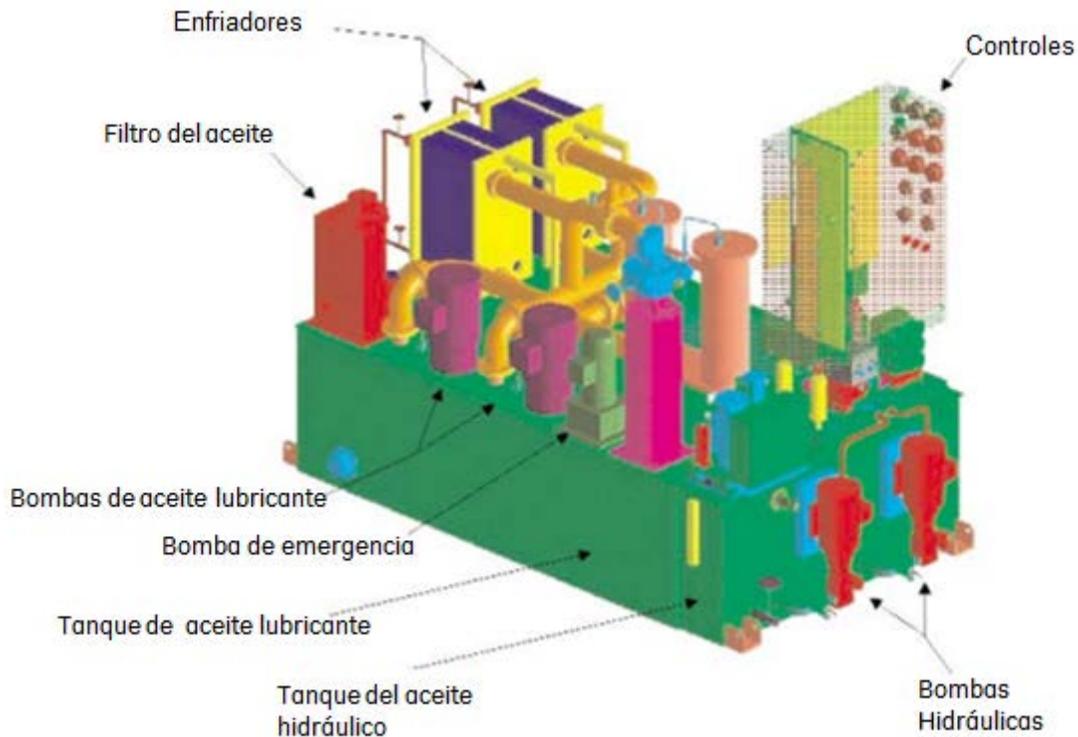


Figura 3-20 Sistemas auxiliares de aceite GE

Sistema de sellos de vapor

Las turbinas de vapor están equipadas con sellos de vapor que se ajustan al eje para evitar la fuga de éste a la atmósfera y la disminución de la eficiencia térmica entre cada etapa. Dentro de los sellos se encuentran los sellos laberínticos que se definen como sellos mecánicos en torno al eje, compuestos de numerosas ranuras rectas y cambios de geometría bruscos.

La Figura 3-21 muestra un esquema simple de un sello laberíntico. Debido a que el rotor se encuentra en movimiento, se debe dejar un pequeño espacio entre las partes móviles y el sello del estator a fin de evitar la fricción.

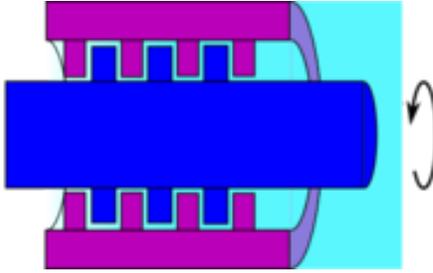


Figura 3-21 Sello de vapor

La Figura 3-22 muestra un conjunto de sellos laberínticos donde se aprecia un diámetro menor seguido de un diámetro mayor en los dientes del sello, que permiten disminuir la fuga de vapor entre el rotor y el diafragma.



Figura 3-22 Sellos laberínticos

3.3.8 Tornaflecha

El tornaflecha es un dispositivo colocado en el eje que tiene la función de rotarlo a muy bajas velocidad (8-12 RPM) cuando la turbina es parada y aún no se ha enfriado. El tornaflecha asegura un enfriamiento uniforme pero, más importante, previene que el rotor se curve por su propio peso y temperatura. Con este movimiento también se asegura mantener una capa de aceite en los cojinetes de apoyo, evitando su desgaste. El sistema es accionado normalmente por un motor eléctrico, aunque también se pueden emplear motores hidráulicos. Va montado en uno de los extremos de la turbina o en el acoplamiento entre el generador y la turbina. Como función secundaria, el tornaflecha permite rotar el eje a la posición deseada durante las labores de mantenimiento e inspección de la turbina.

En la Figura 3-23 [22] abajo mostrada, se observa un tornaflecha acoplado al extremo de la turbina, que se encuentra con la carcasa superior retirada.

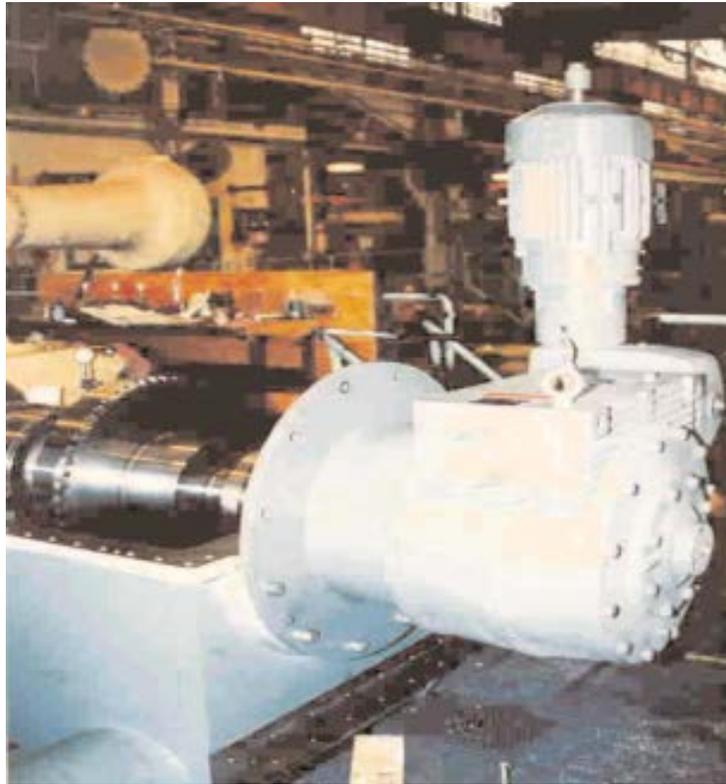


Figura 3-23 Tornaflecha en una turbina de vapor GE

4. Diseño de turbinas de vapor industriales GE

4.1 Turbinas de vapor industriales GE

Las plantas industriales de vapor son unidades auxiliares en una planta de alta potencia, que son usadas en un número amplio de aplicaciones. El objetivo de estas unidades es mover equipo mecánico como compresores y bombas, entre otros. Estas unidades son de pocos caballos de fuerza de potencia, comparados con turbinas de generación eléctrica a gran escala. En promedio, estas turbinas son de 25 MW y como límite superior para su clasificación se tienen los 100 MW, manejando un rango amplio de presiones y temperaturas dependiendo de su aplicación. Otra diferencia respecto a las turbinas de alta potencia es que algunas de estas turbinas industriales deben ser capaces de operar a diferentes velocidades. Esto es de relevancia en aplicaciones dentro de las refinerías, industria acerera, procesamiento de gas natural, por mencionar algunos. Los equipos para estas aplicaciones llegan a los 75,000 hp y hasta las 16,000 rpm [22].

Desde 1954 GE ha manufacturado alrededor de 780 turbinas BFPT y RFPT (bombas del agua de alimentación para caldera y reactor, respectivamente, por sus siglas en inglés) para casi 400 plantas en el mundo, con una potencia de 2,800 a 26,000 kW y velocidades cercanas a las 7,500 rpm.

El tamaño del patín¹ utilizado para estas turbinas normalmente es de 62" y 51". El primer patín cuenta con álabes en la última etapa de 10.2" mientras que el segundo cuenta normalmente con álabes de 8.36", pero estos dependen del flujo de diseño. Normalmente estas turbinas incluyen 6 o 7 etapas pudiendo ser de doble flujo en la última etapa si la carga volumétrica lo requiere. El vapor de baja presión es utilizado para la operación normal de estas turbinas, pero en condiciones de mayor demanda el vapor de alta presión directamente del generador de vapor puede ser utilizado.

¹ Base o estructura metálica donde va montada la turbina (aplicable para turbinas de baja potencia).

Los diseños antiguos de estas turbinas se concentraban en proveer confiabilidad en un amplio rango de operaciones más que en optimizar la eficiencia. El cambio de altura entre una etapa y otra podía ser abrupto y el sistema de sellos en la punta de los álabes no era comúnmente utilizado. El sello laberíntico para los empaques entre etapas era recto. Todos estos factores suponen una menor eficiencia de la turbina y de la planta en general.

Algunas de los análisis que se deben realizar para diseñar y proponer cambios de estas turbinas incluyen: análisis termodinámico, balances de planta, vibraciones, rotodinámica, transferencia de calor, análisis por elemento finito e instrumentación y control, entre otros.

4.2 Sistema de diseño integral (IDS)

GE ha desarrollado un sistema de diseño integral para sus turbinas industriales. Primero se realiza un análisis termodinámico previo y posteriormente se diseña la parte mecánica para cumplir con estas condiciones.

El programa utilizado (IDS, por sus siglas en inglés) integra el análisis de los diferentes componentes de la turbina, basado en la experiencia de GE y los ingenieros que lo perfeccionaron a través del tiempo. El programa cuenta con una serie de ecuaciones, algoritmos y criterios de diseño que ayuda al ingeniero a seleccionar la mejor opción para cumplir los requerimientos solicitados. Con ayuda de este sistema, las turbinas industriales fueron hechas en base a las características solicitadas para cada cliente pero con componentes ya manufacturados previamente.

4.2.2 Programa de Diseño General (Layout)

En este programa se indican las características básicas de la turbina que va a ser modelada. Entre las características básicas se encuentran:

- Elegir entre una máquina de 50 Hz, 60 Hz o velocidad variable.
- Bomba del agua de alimentación para la planta de alta potencia (reactor o caldera).

- Número de etapas.
- Velocidad de operación y potencia garantizada.

Para turbinas de velocidad variable, se establecen diferentes puntos con sus condiciones de velocidad y potencia de salida para ser comparados con el flujo necesario para producirlas [22].

4.2.3 Programa MST

MST es un programa termodinámico que corre el modelo de la turbina etapa por etapa. Este programa fue desarrollado para turbinas de vapor de tamaño medio durante los 1980 y posteriormente adaptado a las turbinas industriales en base a datos obtenidos durante la operación de las turbinas.

El programa MST efectúa un balance térmico y de flujo para cada etapa. Entre las diferentes características, el programa calcula y toma en cuenta los siguientes parámetros:

- Gado de reacción en los álabes.
- Eficiencia de los componentes.
- Fugas de vapor debido al tipo de sellos y claros definidos.
- Gradiente de presión en la rueda y pérdidas aerodinámicas.
- Localización radial de los agujeros para balance.
- Acabado superficial en los álabes y toberas.

4.2.4 Generador de puntos de carga

Este módulo se encarga de hacer combinaciones de presión, temperatura, flujo y velocidad para probar la confiabilidad de la turbina. Estos puntos de carga incluyen máximos en la operación de la turbina para cada etapa.

4.2.5 Interface de accionamiento mecánico (MDI)

Una vez se tienen los puntos de carga, se evalúa la turbina en cada uno de ellos de forma automatizada. Los componentes básicos evaluados son los que se encuentran

en contacto con el vapor e incluye álabes, toberas, diafragmas y ruedas del rotor. Los siguientes análisis son llevados a cabo en el programa:

- Esfuerzos centrífugos en estado y flujo estable para los álabes.
- Esfuerzos en los álabes de las toberas y esfuerzo en el borde de ataque en éstas, en estado y flujo estable.
- Esfuerzos en las piezas de bloqueo de los álabes.
- Esfuerzo en los salientes de los álabes.
- Esfuerzos centrífugos y de flexión en la banda (o cincho) de los álabes.
- Esfuerzos de frecuencia en los álabes debido al número de toberas.
- Esfuerzos vibratorios en los álabes.
- Esfuerzo en los rodetes, incluyendo el esfuerzo tangencial en el agujero de balanceo.
- Esfuerzos en las soldaduras de los diafragmas.

5. Propuesta de cambio de etapas

5.1 Antecedentes

El Cliente A. tiene una planta fósil (Planta C.) en Estados Unidos construida alrededor de 1970, con una capacidad aproximada de 850 MW que cuenta con dos turbinas de vapor (TSN 1201 y 1202) que mueven las bombas del agua de alimentación de la caldera. Estas dos turbinas industriales sufrieron diferentes modificaciones a lo largo del tiempo y es por eso que el presente trabajo sólo se centra en la TSN 1201. La TSN 1202 fue copiada del diseño original de la TSN 1201.

La unidad 1201 contiene 7 etapas con un diseño de doble flujo para su última etapa y una brida de escape hacia abajo de 75". Los álabes de la última etapa son de 10.5" nominales con un perfil aerodinámico de doble cono. El rotor de esta turbina está hecho de una forja de acero con níquel, molibdeno y vanadio. Al final de la flecha se reduce el diámetro para el cople que transmite el torque de la turbina a la bomba. Una placa soldada con álabes estacionarios se utiliza para la admisión del vapor de alta y baja presión. El diámetro nominal de la primera etapa es de 31.8" mientras que para las etapas 2 a 7 es de 34.8". La capacidad nominal de la turbina 1201 es de 24,000 hp a una velocidad de 5200 rpm. El vapor de baja presión entra a 150 psia y 690°F, mientras que el de alta, de ser necesario, entra a 3500 psia y 1000°F (241 bar, 537 °C). La presión nominal del condensador es de 2" de columna de mercurio (6.77 kPa).

Al ser turbinas industriales usadas para mover las bombas que llevan el agua del condensador a la caldera, estas unidades están diseñadas para trabajar a diferentes velocidades, logrando, en casos necesarios, llegar al 150% de su velocidad nominal.

La Tabla 5-1 muestra las características específicas de diafragmas y álabes etapa por etapa.

Etapa de Álabes²	HP	LP	2	3	4	5	6	7
No. de álabes	110	110	120	120	120	130	110	80

² Las dimensiones son mostradas para efecto informativo y no representan datos reales. La información original es propiedad de General Electric Company

Altura del álabe (in)	2.5	2.5	1.5	2.5	3.5	5.5	8.0	10.5
Ancho del álabe (in)	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	2.30	2.70
Material del álabe ³	A020	A020	A010	A010	A010	A020	A010	J030
Agrupamiento de bandas	6	6	6, 7	6	6	5, 6	5, 6	17, 18
Material de la banda	D050	D050	D050	D050	D050	D050	A020	A020
Etapas de Diafragma	HP	LP	2	3	4	5	6	7
Ángulo de Salida (°)	15.0	12.5	11.0	10.5	11.5	11.0	14.5	13.0
No. de toberas/ Espacios	7/35	55/80	72/72	70/70	75/75	80/80	90/90	70/70
Claros (in)	0.040	0.040	0.055	0.055	0.055	0.050	0.060	0.080

Tabla 5-1 Configuración de la TSN 1201

Cabe señalar que el material A010 para álaves y D050 para bandas fue sustituido en nuevos diseños. Para este tipo de propuestas, se prefiere un material A020 para álaves y bandas. En las últimas etapas se utiliza el material J030 debido a la humedad y riesgo de corrosión en éstas.

El número de toberas en el diafragma es representado por dos números; el primero el número actual de toberas utilizadas y el segundo el espacio total que tiene el diafragma. En la primera etapa se aprecia que no se utilizan los 360° completos ya que el espacio es compartido para la admisión de alta y baja presión.

5.2 Objetivos

Elaborar una propuesta económicamente viable para el Cliente A., con el objetivo de mejorar las condiciones actuales de esfuerzo en la turbina TSN 1201, con el fin de prolongar su vida útil, así como garantizar la disponibilidad de la turbina con los estándares actuales de GE.

Este análisis y recomendaciones consideran el avance computacional desde que la planta fue construida, así como nuevos criterios de diseño perfeccionados por GE tomando en cuenta las décadas de experiencia en la flota instalada y dando una solución a los problemas más frecuentes en estas turbinas antes de que sucedan, evitando paros forzados innecesarios en la planta.

³ El código de material no representa material alguno en ninguna clasificación existente. Dicha información es propiedad de General Electric Company.

5.3 Análisis

Los esfuerzos centrífugos y vibratorios en las ruedas y los esfuerzos torsionales dependen del material usado en la forja y de los puntos de carga analizados. Para los álabes, el efecto de la geometría tiene repercusiones en los esfuerzos que presenta. Dependiendo del tamaño, los álabes son susceptibles a diferentes tipos de esfuerzos; los álabes más pequeños son afectados por la frecuencia de paso de las toberas mientras que los álabes más largos son afectados por esfuerzos vibratorios debido a su geometría.

La Tabla 5-2 muestra las condiciones de sobreesfuerzo en las etapas 4, 5 y 6, usando el programa IDS. Las demás etapas no son mostradas debido a que no presentaban condiciones de sobreesfuerzo.

Etapas	4	5	6
Esfuerzo torsional	51%	82%	97%
Tensión en el saliente	22%	24%	40%
Tensión en la base	33%	54%	43%
Tensión en la rueda	63%	71%	56%
Frecuencia de paso (álabe)	221%	37%	0%
Frecuencia de paso (banda)	105%	8%	0%
Vibratorios (álabe)	3%	101%	414%
Vibratorios (banda)	4%	200%	392%
Máximo Esfuerzo	221%	200%	414%

Tabla 5-2 Esfuerzos en la TSN 1201

Estos valores representan el porcentaje de esfuerzo comparado con el límite permisible del material debido a su temperatura. A altas temperaturas estos materiales tienen permisibles alrededor de los 500-600 psi mientras que en las últimas etapas, con material J030, se tienen esfuerzos permisibles de alrededor de 2000 psi.

5.4 Aportaciones

5.4.2 Primera propuesta

Para la realización de esta propuesta, presenté diferentes escenarios al equipo comercial que estaba en contacto directo con el cliente. La primera propuesta realizada consistía en un cambio completo de álabes rotatorios y fijos para las etapas mostradas

en la Tabla 5-2. Los cambios en los álabes rotatorios consistían en usar un acero de la misma aleación que los álabes en las bandas que los unen, así como cambiar el número de álabes estacionarios para evitar que las frecuencias de resonancia fueran alcanzadas durante la operación. El perfil aerodinámico de los diafragmas propuestos sería remplazado por uno actual con base a las nuevas prácticas de GE. Así mismo, los diafragmas serían maquinados en su extremo inferior para evitar que los esfuerzos originados por el vapor expandiéndose dañaran la parte más delgada del diafragma, originando su desprendimiento y respectivo daño a los componentes corriente abajo.

Como parte de mi labor de ingeniero de aplicaciones, proveer el costo y el ciclo de trabajo también es fundamental para que el Cliente A. pudiera aceptar o rechazar esta propuesta. Estos valores son presentados en la Tabla 5-3 y son obtenidos con base en trabajos similares hechos anteriormente.

	Ciclo	Costo
Propuesta 1	16 semanas	\$50,000 USD

Tabla 5-3 Costo y ciclo (Propuesta 1)⁴

5.4.3 Segunda propuesta

Después de haber coordinado diferentes reuniones con los equipos de ingeniería para obtener el ciclo de la propuesta y analizar la fecha del siguiente paro por mantenimiento comparado con la disponibilidad de los talleres, el equipo comercial y de aplicaciones llegamos a la conclusión de que la solución propuesta no agrada al Cliente ya que cualquier retraso imprevisto causaría la pérdida de la oportunidad para instalar a tiempo.

Con el análisis realizado en la etapa anterior, los cambios mostrados en la Tabla 5-4 son propuestos en las etapas 4, 5 y 6, solamente para partes móviles (álabes rotatorios). Los cambios respecto a la configuración original son marcados en color oliva en la siguiente tabla.

⁴ Los valores son representativos y no corresponden a valores reales. Dicha información es propiedad de General Electric Company.

Etapas de Álabe	4	5	6
No. de álabe	120	131	111
Altura del álabe (in)	3.5	5.5	8.0
Ancho del álabe (in)	1.40	1.40	2.30
Material del álabe	A020	A020	A010
Agrupamiento de bandas	6	16, 17	18, 19
Material de la banda	A020	A020	A020

Tabla 5-4 Cambios de la Propuesta 2

Cabe mencionar que las partes estacionarias (diafragmas) no se reemplazan por unos nuevos. Los esfuerzos de esta propuesta son analizados en la sección de resultados.

El ciclo y el costo también cambian y se vuelven un factor a favor de la Propuesta 2 comparada con la Propuesta 1.

	Ciclo	Costo	Máximo esfuerzo (%)
Propuesta 1	16 semanas	\$50,000 USD	70%
Propuesta 2	12 semanas	\$30,000 USD	99%

Tabla 5-5 Costo y ciclo de las propuestas

5.5 Resultados⁵

Con los cambios propuestos, se corrió de nuevo el programa IDS con estas nuevas condiciones y se obtuvieron los siguientes esfuerzos para las etapas analizadas. Tal como muestra la Tabla 5-6, todos los valores son menores al 100% que es el límite, sin embargo, para la 4ª y 6ª el valor de esfuerzo está muy cercano al límite máximo permitido (mostrado en amarillo). En verde se muestran los valores que antes estaban en sobreesfuerzo y ahora caen debajo del límite máximo.

Etapas	4th	5th	6th
Esfuerzo torsional	40%	82%	64%
Tensión en el saliente	22%	24%	33%
Tensión en la base	33%	54%	37%
Tensión en la rueda	63%	71%	56%
Frecuencia de paso (álabe)	99%	36%	0%
Frecuencia de paso (banda)	81%	5%	0%
Vibratorios (álabe)	3%	60%	71%

⁵ Todos los porcentajes de esfuerzos son mostrados únicamente con fines representativos y no corresponden a valores reales. Dicha información es propiedad de General Electric Company.

Vibratorios (banda)	3%	53%	95%
Máximo Esfuerzo	99%	82%	95%

Tabla 5-6 Esfuerzos para el cambio de partes rotativas

La primer columna de datos la Tabla 5-7 resume los valores de sobreesfuerzo definidos durante la fase de análisis de acuerdo con las condiciones actuales de la TSN 1201. La segunda columna muestra los valores obtenidos durante la propuesta del cambio de cambio de partes móviles, pero una última columna es incluida para ver como los esfuerzos se reducen si además se cambiaran las partes estacionarias por unas nuevas con un nuevo número de toberas o perfiles aerodinámicos de éstas (propuesta número 1).

Etapa	Valores actuales	Cambio de álabes (Propuesta 2)	Cambio de diafragmas (Propuesta 1)
4ª	221%	99%	52% (nuevo diafragma)
5ª	200%	82%	Solo cambio de álabes
6ª	414%	95%	70% (nuevo diafragma)

Tabla 5-7 Esfuerzos máximos por propuesta

5.6 Conclusiones⁶

Con la Tabla 5-7 arriba mostrada se puede observar que con el cambio de álabes es suficiente para estar debajo de los permisibles. La decisión de aprobar estos valores límites para las etapas 4ª y 6ª viene de los análisis numéricos mostrados y del registro de operación de la unidad TSN 1201 que no ha presentado fallos graves en estas etapas que requieran una revisión más minuciosa o un cambio de partes estacionarias.

Con el cambio de diafragmas también mostrado en la Tabla 5-7 como segunda opción, se observa una disminución a valores por debajo del 80%, lo cual da un factor de seguridad bastante elevado. Sin embargo, uno de los objetivos principales es brindar al Cliente A. una propuesta económicamente viable y con un ciclo de entrega corto. Incluir los diafragmas para las etapas 4ª y 6ª incrementa el costo y ciclo de manera significativa, imposibilitando cumplir con las necesidades de puesta en marcha de esta unidad cuanto antes, además sin agregar un valor significativo a la ya alta confiabilidad

⁶ Todos los porcentajes de esfuerzos son mostrados únicamente con fines representativos y no corresponden a valores reales. Dicha información es propiedad de General Electric Company.

de la máquina. Originalmente se había presentado y elaborado la Propuesta 1 en base a las recomendaciones del equipo de Servicios, encargado de estos comunicados, sin embargo, a través del trabajo que desarrollé demuestro que la Propuesta 2 cumple los criterios de confiabilidad buscados con un tiempo de entrega más corto y a un costo menor.

Durante el presente trabajo, se tuvo contacto con: los equipos de Ventas y Comercial, encargados de tratar directamente con el Cliente y proporcionar los detalles de la propuesta elaborada; el equipo de Servicios e Ingeniería, para obtener un mayor entendimiento de los detalles técnicos de este tipo de máquinas y la nueva tecnología para mejorarlas y por último; personas directamente en contacto con los componentes de la máquina para garantizar las condiciones actuales de ésta. Estas comunicaciones brindaron al autor las herramientas y la experiencia técnica para poder elaborar la propuesta más adecuada al Cliente.

Referencias

- [1] Forbes México, 15 Noviembre 2014. [En línea]. Available: <http://www.forbes.com.mx/las-25-marcas-mas-valiosas-de-2014/>. [Último acceso: 1 Agosto 2015].
- [2] GE: About us, GE, 1° Enero 2015. [En línea]. Available: <http://www.ge.com/about-us/history/1878-1904>. [Último acceso: 15 Julio 2015].
- [3] GE: Annual Report 2011, General Electric, 2012.
- [4] H. Takahashi, «Forbes México,» 18 Septiembre 2013. [En línea]. Available: <http://www.forbes.com.mx/geiq-ingenieria-avanzada-con-talento-mexicano/>. [Último acceso: 30 Julio 2015].
- [5] GE LATAM, [En línea]. Available: <http://www.ge.com/latam/company/mexico>. [Último acceso: 30 Julio 2015].
- [6] Altonivel, 17 Febrero 2011. [En línea]. Available: <http://www.altonivel.com.mx/8677-ge-inaugura-nuevas-instalaciones.html>. [Último acceso: 1° Agosto 2015].

- [7] L. D. Peñaloza, «El Economista,» 13 Julio 2014. [En línea]. Available: <http://eleconomista.com.mx/estados/2014/07/13/geiq-fortalece-sus-operaciones-queretaro>. [Último acceso: 1° Agosto 2015].
- [8] GE LATAM, [En línea]. Available: <http://www.ge.com/latam/company/investigacion-y-desarrollo>. [Último acceso: 1° Agosto 2015].
- [9] GE DP: Jenbacher Type 3, [En línea]. Available: <https://www.ge-distributedpower.com/products/power-generation/up-to-5mw/jenbacher-type-3>. [Último acceso: 1° Agosto 2015].
- [10] GE's 3.2-103, [En línea]. Available: <https://renewables.gepower.com/wind-energy/turbines/32-103.html>. [Último acceso: 1° Agosto 2015].
- [11] GE PGS: Steam Turbine Power and Performance, [En línea]. Available: <https://powergen.gepower.com/plan-build/products/steam-turbines/index.html>. [Último acceso: 1° Agosto 2015].
- [12] P. Mason, GER-4201: Structured Steam Turbines for the Combined-Cycle Market, Schenectady, NY: GE Power Systems, 2001.
- [13] Wikipedia: Turbine, [En línea]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Turbine>. [Último acceso: 1° Agosto 2015].
- [14] IAEA: World Outlook, IAEA, Paris, 2004.
- [15] European Environment Agency (EEA), Air pollution from electricity-generating large combustion plants (PDF), Copenhage, 2008.
- [16] A. J. Baratta y J. R. Lamarsh, Introduction to Nuclear Engineering, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- [17] A. McDonald, Nuclear Power Global Status, IAEA Bulletin 49-2, 2008.
- [18] IAEA: PRIS, [En línea]. Available: <http://www.iaea.org/PRIS/home.aspx>. [Último acceso: 19 Mayo 2014].
- [19] A. F. Schneider, The World Nuclear Industry Status Report, Paris: WNSIR, 2013.

[20] BP, Statistical Review of World Energy, Workbook (xlsx), London, 2013.

[21] Mitsubishi Hitachi Power Systems: Main parts of steam turbine, [En línea]. Available: https://www.mhi-global.com/products/expand/steam_turbines_durable_and_recommended_purchasing_period.html. [Último acceso: 2 Agosto 2015].

[22] M. Scoretz y R. Williams, Industrial Steam Turbine Value Packages, Atlanta, GA: GE Energy, 2008.

[23] GE University, [En línea]. Available: <http://www.ge.com/careers/culture/university-students/edison-engineering-development-program/united-states>. [Último acceso: 1° Noviembre 2015].

Apéndice A: Aportaciones en el Programa Edison

Descripción

El EEDP (Edison Engineering Development Program por sus siglas en inglés) es un programa para profesionistas recién egresados (tanto nivel licenciatura como maestría) que buscan acelerar su carrera y ganar conocimientos técnicos y aptitudes de liderazgo en algún negocio de GE. Dentro de P&W este programa de 2 años consiste en 4 rotaciones en diferentes equipos donde se requiere que se entreguen resultados importantes al término de los 6 meses de la rotación.

Además de las responsabilidades laborales, el programa requiere que se pasen dos cursos técnicos de ingeniería donde se entregan reportes formales escritos y se hacen presentaciones a los líderes técnicos del negocio (principalmente EUA). Estos cursos tienen valor equivalente a 6 créditos en una maestría de ingeniería que se puede terminar después del programa en alguna universidad estadounidense a distancia que tenga convenio con GE (actualmente Georgia Institute of Technology y North Carolina State University para P&W) [23].

Aportaciones

Dentro del programa Edison, a continuación muestro los equipos en los que he estado y las aportaciones más significativas que he tenido.

1. **Ingeniero de Aplicaciones Turbina de Vapor, Nuevas Unidades:** Elaboración de propuestas (diseño conceptual termodinámico) de turbinas de vapor grandes para clientes en México, Estados Unidos y Chile, principalmente. Junta cara a cara con clientes españoles e italianos en Estados Unidos y Chile.
2. **Ingeniero de Aplicaciones Turbina de Vapor, CM&U:** Rotación en la que se basa el presente trabajo. Propuesta de cambio de etapas de turbina de vapor, estudios de intercambiabilidad de sellos en turbinas GE de México y un nuevo sistema para el tornaflecha de las turbinas grandes.
3. **Ingeniero de Componentes, Diafragmas:** Definición de componentes (diafragmas) para ser manufacturados en EUA. Diseño a detalle de estos.