



**Diseño de un sistema de monitoreo
para el control y prevención de fallas
en sello mecánico de la bomba de
agua inyección P-3000 asociada a la
turbina de combustión CT2 de una
termoeléctrica ubicada en
Barranquilla – Colombia.**

**Jhonathan Paul Canzario Pedroza - Código 20451721353
Juan Pablo Díaz Prent - Código 20451815672**

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Barranquilla, Colombia
2020

Diseño de un sistema de monitoreo para el control y prevención de fallas en sello mecánico de la bomba de agua inyección P-3000 asociada a la turbina de combustión CT2 de una termoeléctrica ubicada en Barranquilla - Colombia.

Jhonathan Paul Canzario Pedroza - Código 20451721353
Juan Pablo Díaz Prent - Código 20451815672

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Mecánico

Director (a):

Ing. Fabio Andrés Bermejo Altamar

Líneas de Investigación:

Transversal

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Barranquilla, Colombia

2020

Agradecimientos

Mi agradecimiento se dirige a quien ha forjado mi camino y me ha dirigido por el sendero correcto, a Dios, el que en todo momento está conmigo ayudándome a aprender de mis errores y a no cometerlos otra vez. Dios eres tú quien guía el destino de mi vida, tu amor y tu bondad no tienen fin, me permites sonreír ante todos mis logros que son resultado de tu ayuda, y cuando caigo y me pones a prueba, aprendo de mis errores y me doy cuenta de los pones en frente mío para que mejore como ser humano, y crezca de diversas maneras.

Este trabajo de tesis ha sido una gran bendición en todo sentido y te lo agradezco padre, y no cesan mis ganas de decir que es gracias a ti que esta meta está cumplida.

Gracias a nuestros padres: Emilce Prent y Evelio Diaz, Patricia Pedroza y Pablo Canzario por ser los principales promotores de nuestros sueños, por confiar y creer en nuestras expectativas, por los consejos, valores y principios que nos han inculcado.

Agradecemos a nuestros docentes de la universidad Antonio Nariño sede Puerto Colombia, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de nuestra profesión, de manera especial, al Phd Fabio Bermejo y director de nuestro proyecto de tesis quien ha guiado con su paciencia

Resumen

Debido a la falla recurrente de sellos mecánicos de la bomba asociada al sistema de agua inyección de la turbina CT2 de una central termoeléctrica ubicada en la ciudad de Barranquilla, se pretende identificar el origen de la misma, y realizar el diseño de un sistema de diagnóstico temprano de las condiciones que permitan el buen funcionamiento del sistema, la generación de energía estimada y la reducción de contaminantes NOx según lo establecido por normativa. Todo esto lleva un proceso que parte de la revisión de antecedentes, el análisis de hoja de vida de la bomba del sistema y control de mantenimientos previos, hasta el diseño del sistema en general (tuberías, accesorios, bomba suministro, etc), vibraciones y las características del fluido de trabajo (agua desmineralizada) cuyos factores químicos son los principales influyentes en las consecuencias trágicas sobre los sellos mecánicos posterior a un reposo prolongado en los tanques.

Palabras clave: Bomba centrífuga, generación térmica, óxidos de nitrógeno, sello mecánico.

Abstract

Due to the recurrent failure of the mechanical seals of the pump associated with the injection water system of the CT2 turbine of a thermoelectric plant located in the city of Barranquilla, the origin of the same will be identified, and the design of a system of Early diagnosis of the conditions that allows the proper functioning of the system, the estimated energy generation and the reduction of NOx pollutants as established by regulations. All this takes a process that starts from the background check, the analysis of the system pump resume and control of previous maintenance, to the design of the system in general (pipes, accessories, supply pump, etc.), vibrations and the characteristics of the working fluid (demineralized water) whose chemical factors are the main influencing in the tragic consequences on the mechanical seals after a prolonged rest in the tanks.

Keywords: Centrifugal pump, nitrogen oxides, mechanical seal, thermal generation.

Contenido

	Pág.
Contenido	
1. Introducción y antecedentes	1
2. Preliminares del proyecto.....	4
2.1 Planteamiento del problema	4
2.2 Justificación.....	6
2.3 Objetivos	7
2.3.1 Objetivo General.....	7
2.3.2 Objetivos específicos.....	7
2.4 Metodología	8
3. Marco teórico.....	10
3.1 Generación eléctrica	10
3.2 Centrales termoeléctricas.....	13
3.3 Óxidos de Nitrógeno.....	14
3.4 Sistemas de inyección de agua.....	17
3.5 Bombas rotodinámicas.....	21
3.6 Sellos mecánicos	22
3.6.1 Materiales de sellos mecánicos	23
3.7 Cavitación	24
3.7.1 NPSH Disponible y Requerido	25
4. Central termoeléctrica.....	27
4.1 Planta de generación	27
4.2 Sistema de agua inyección CT2.....	27
4.2.1 Tanque de agua desmineralizada # 9.....	28
4.2.2 Bomba de suministro agua inyección CT2.....	29
4.2.3 Sistema de tuberías de transporte	29
4.2.4 Bomba principal de agua inyección CT2.....	30
4.3 Tratamiento de agua	31
5. Análisis de causa raíz	34
5.1 Antecedentes	34
5.1.1 Bomba P-3000 SUNFLO	38
5.2 Agua desmineralizada.....	41
6. Sistema de monitoreo para control y prevención de fallas.....	42
6.1 Resultados de análisis causa raíz	42
6.1.1 Evaluación de Vibraciones.....	42

VIII **Diseño de un sistema de monitoreo para el control y prevención de fallas en sello mecánico de la bomba de agua inyección P-3000 asociada a la turbina de combustión CT2 de una termoelectrica ubicada en Barranquilla – Colombia**

6.1.2	Propiedades del agua (Composición).....	48
6.2	Propuesta de solución	52
7.	Manual de mantenimiento para sistema de bombeo de agua inyección para turbina CT2.....	54
7.1	Revisión del sistema	54
7.2	Operación	55
8.	Conclusiones y recomendaciones	56
8.1	Conclusiones	56
8.2	Recomendaciones	56
9.	Bibliografía	57

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Consumo energético mundial. Proyección a 2050.....	11
Figura 2. Consumo energético mundial según fuente de energía. Proyección a 2050....	11
Figura 3. Sistema interconectado nacional de Colombia	12
Figura 4. Sistema de inyección de agua a cámara de combustión de turbina.....	18
Figura 5. Comportamiento de temperaturas en cámara de combustión vs carga y caudal de inyección de agua.....	19
Figura 6. Configuración seleccionada para el sistema de inyección de agua a cámara de combustión de turbina	20
Figura 7. Instalación equipo de bombeo, zona expuesta y en contacto con el fluido (señalado a la izquierda) y motor eléctrico (señalado a la derecha)	21
Figura 8. Principales partes de una bomba centrífuga	22
Figura 9. Sellos mecánicos para bombas centrífugas.....	23
Figura 10. Efectos de la cavitación sobre impulsor abierto	24
Figura 11. Instalación clásica de equipos de bombeo con accesorios y tubería.	25
Figura 12. Tanque de agua desmineralizada no. 9.....	28
Figura 13. Bomba de suministro agua inyección CT2.....	29
Figura 14. Succión de bomba suministro.....	30
Figura 15. Conjunto motor-bomba de sistema de agua inyección CT2.....	31
Figura 16. Composición interna de filtros multimedia multietapas	32
Figura 17. Sellos mecánicos en mal estado. En las 2 imágenes superiores se señala la cara rotativa; en las 2 imágenes inferiores se señala la cara estacionaria.....	35
Figura 18. Comparación cara de sello mecánico que ha sufrido picadura (Lado izquierdo), cara de sello mecánico que está en correcto estado (lado derecho).	36
Figura 19. Efectos de la erosión en las caras de los sellos mecánicos.....	36
Figura 20. Matriz de riesgos para bomba P-3000	37
Figura 21. Curva de operación Bomba P-3000.....	40
Figura 22. Puntos de medición de vibraciones.	42
Figura 23. Estado histórico de las mediciones de vibraciones.....	43
Figura 24. Registro de puntos con mayores niveles de vibración.	44
Figura 25. Medición de vibraciones motor bomba agua inyección CT2 - Baja frecuencia.	45
Figura 26. Niveles de vibración aceptables según norma ISO 10816 para equipos pertenecientes a grupo 2.....	46

X **Diseño de un sistema de monitoreo para el control y prevención de fallas en sello mecánico de la bomba de agua inyección P-3000 asociada a la turbina de combustión CT2 de una termoelectrica ubicada en Barranquilla – Colombia**

Figura 27. Medición de vibraciones motor bomba agua inyección - Media frecuencia.....	47
Figura 28. Medición de vibraciones motor bomba agua inyección - Alta frecuencia.	47
Figura 29. Análisis de condiciones de agua desmineralizada, septiembre de 2020	48
Figura 30. Toma de muestra no. 1. Succión bomba suministro agua inyección CT2.....	49
Figura 31. Resultado de análisis muestra no. 2. Bomba agua inyección CT2	50
Figura 32. Solubilidad de sílice amorfa vs pH para diferentes temperaturas	51
Figura 33. Esquema de instalación hidráulica para la medición de pH y TDS del agua en la succión de la bomba P-3000	53

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Frecuencia de cambio de sello mecánico de bomba para turbina CT2	5
Tabla 2. Estándares de emisión admisibles para generación con turbina a gas < 20MW.	16
Tabla 3. Niveles de emisión de Óxidos de nitrógeno.	20
Tabla 4. Condiciones de operación de bomba	38
Tabla 5. Desempeño de bomba	38
Tabla 6. Construcción y materiales de bomba.....	39
Tabla 7. Metalurgia de bomba	39

1. Introducción y antecedentes

Las turbinas de gas han sido un avance significativo en el área de la generación de energía en el mundo. El ciclo Brayton es el principal modelo que determina el funcionamiento de las turbinas de gas, siendo primeramente planteado de manera formal por James Joule en 1840, sin embargo, en 1872 George Brayton llevo a la práctica las líneas teóricas determinadas unos años atrás basado en la compresión de aire con pistones, luego calentado en cámaras y expandiéndose en otro cilindro generando trabajo. Este ciclo por procesos termodinámicos tomó reconocimiento tanto que, a la fecha, sigue siendo utilizado en plantas termoeléctricas.

La necesidad incrementada e indetenible por generar y consumir energía en todo el mundo con el fin de realizar distintas actividades, algunas cotidianas, otras industriales y demás que permitan el desarrollo sostenible y permanente de cierta localidad o según el contexto geográfico específico, ha sido la inspiración principal de la ingeniería por desarrollar e implementar tecnologías cada vez más eficientes a nivel global. En la actualidad existen muchas formas de generar energía, siendo la termoeléctrica una de las más significativas, por lo tanto, las centrales termoeléctricas tienen una labor severamente relevante donde los sistemas y subsistemas que permiten la generación de energía (Turbina generadora, compresor, bombas, intercambiadores de calor, etc) deben estar en óptimas condiciones para que el rendimiento general del sistema sea adecuado. Son varios los efectos adversos desde el punto de vista ambiental causados por las emisiones de gases contaminantes post combustión, debido a esto, se han realizado varios estudios para disminuir la cantidad de estos gases expulsados y reduciendo el efecto colateral como es el caso de Liu et al [1] quienes realizaron una investigación respecto a los efectos del combustible, composiciones y posición de los inyectores sobre el rendimiento y las emisiones de gases contaminantes en una microturbina de gas mientras que Ditaranto y Heggset [2] estudiaron las consecuencias en el rendimiento y la reducción de NOx a través de la recirculación de gases de escape por medio de simulaciones. En pro de resultados óptimos en la generación termoeléctrica, la ingeniería desarrolla sistemas y procesos tales como la compresión húmeda cuyo resultado es un incremento en la potencia. Betelmal y Farhat [3] estudiaron la cantidad máxima de agua que se puede inyectar durante la etapa de compresión y como varía la energía

y exergía en el sistema con respecto a una compresión seca y húmeda. Paralelo a esto, Tahani et al [4] estudiaron los efectos en el rendimiento de una turbina de gas V94.2 a través de la compresión húmeda a través de ecuaciones termodinámicas y transferencia de calor, evidencian el incremento de la potencia de salida posterior a dicha optimización. La inyección controlada de agua en la cámara de combustión de la turbina, es un proceso que trae efectos positivos con respecto a la generación de energía y la reducción de contaminantes, como lo muestra Amani [5] quien a través de un modelo Euleriano-Lagrangiano analizó el comportamiento de los NOx en una turbina de gas utilizando inyección de agua en spray y evidencia la interacción de esta agua pulverizada con respecto al rendimiento y eficacia del proceso. Las propiedades del agua antes de ser inyectada deben ser tenidas en cuenta, y estas a su vez dependen del funcionamiento del sistema impulsor de la misma, es por eso que los equipos de bombeo deben trabajar en condiciones óptimas de operación, tanto así que personas como Munyensanga et al [6] implementaron un sistema de mantenimiento preventivo computarizado en una bomba de agua con el fin de evitar pérdidas en la producción y alargar la vida útil del equipo mientras que Kallon et al [7] evaluaron y estudiaron matemática y experimentalmente los efectos de los parámetros de diseño, partes y medidas de bombas centrifugas sobre el rendimiento de la misma, concluyendo la necesidad de hacer modificaciones en los anillos de retención, la influencia del diámetro del impulsor en la eficiencia hidráulica y el requerimiento de desarrollar un modelo de predicción en la pérdida de eficiencia.

La presencia de fugas en bombas centrifugas puede generar pérdidas y condiciones de riesgo. Dentro de las causas de falla en este tipo de bombas se encuentran daños en elementos como sellos mecánicos (80%), rodamientos (10%), o-ring (5%), impulsor (3%), y otros daños (2%). Los sellos mecánicos son dispositivos utilizados para evitar la fuga de fluidos en un sistema o mecanismo, contener la presión y a su vez evitan el ingreso de contaminación a los mismos. [8] [9]. Los sellos mecánicos son dispositivos que se utilizan para evitar la fuga de fluidos ya sea al exterior del conjunto bomba – motor o al interior del rotor; contienen la presión dentro de los equipos a los cuales se los aplica y a su vez evitan el ingreso de contaminación a los fluidos a sellar [10].

Existen diversos factores por los cuales los sellos mecánicos fallan, desde el diseño y selección incorrecta de los mismos, hasta problemas generales del equipo de bombeo, por lo que debe realizarse un plan de acción organizado y analizar todas las posibles fuentes de fallas en estos

elementos; de esta manera aseguramos la vida del equipo de bombeo y la producción asociada a este [11].

En el año 2011 entró en operación la planta de ciclo combinado, ubicada en la ciudad de Barranquilla [12]. La planta cuenta con dos turbinas de combustión a gas, y una turbina de vapor. Como sistema auxiliar para la reducción de óxidos de nitrógeno y aumento de la eficiencia, la turbina de combustión CT2 posee sistema de inyección de agua desmineralizada en la cámara de combustión (agua-inyección). Se realiza la primera intervención de emergencia a la bomba del sistema en marzo de 2012, realizándose cambio de sello mecánico. Hasta la fecha se han realizado un total de 9 intervenciones con resultados poco satisfactorios.

En este proyecto se van a analizar las posibles fallas de los sellos mecánicos de la bomba P3000 y proponer una posible solución con respecto al causante principal, teniendo en cuenta la hoja de vida de cada dispositivo del sistema y las intervenciones a los equipos.

2. Preliminares del proyecto

2.1 Planteamiento del problema

En dicha central térmica, la bomba centrífuga P-3000 utilizada para el proceso de agua inyección en turbina de gas CT2 registra un historial de daños prematuros, principalmente sobre el sello mecánico, desde su instalación. Este equipo ha sido sometido a múltiples mantenimientos y cambios constantes de sellos ejecutados por el mismo fabricante (compañía estadounidense John Crane), sin embargo, la condición no mejora. El fallo de uno de los sellos mecánicos de la bomba permite la fuga interna de agua a la cámara donde se encuentra el sistema de transmisión por engranes emulsionando el aceite del mismo; esto incrementa el riesgo de daños colaterales graves como recalentamiento del sistema, picadura de dientes excesiva en engranes, atascamiento, pérdida de lubricación en rodamientos, entre otras, y reduce la vida útil del mismo.

John Crane establece que por diseño el sello mecánico 8AB seleccionado para esta bomba en condiciones óptimas tiene una vida útil de 45 mil horas, lo que es equivalente a 5,13 años de servicio aproximadamente.

Según los registros de reemplazos del sello mecánico para la bomba, como se muestra en la tabla 1, para el periodo 2012-2019 se tiene un tiempo medio entre fallas (MTBF) de 286,67 días, lo que equivale a 0,78 años. Es decir, los elementos solo están durando aproximadamente un 15% de la vida útil esperada.

FRECUENCIA DE CAMBIO SELLO MECANICO								
2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012
	5	10	2	4	6	12	3, 10	3
BOMBA DE AGUA INYECCIÓN CT-2								
	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012
Enero								
Febrero			x/1770					
Marzo							x/360	x/0
Abril				x/1470				
Mayo	x/2580							
Junio					x/1170			
Julio								
Agosto								
Septiembre								
Octubre		x/2370					x/570	
Noviembre								
Diciembre						x/990		
MTBF(días)	210	600	300	300	180	420	360	0
							210	
MTBF Promedio: 286,67 Días								

Tabla 1. Frecuencia de cambio de sello mecánico de bomba para turbina CT2
Fuente: Autores

Siendo el MTBF una medida de confiabilidad de sistemas, es evidente que, con valores muy por debajo de los aceptables, el sistema requiere atención inmediata, iniciando con un proceso investigativo que abrirá camino a la implementación de mejoras propuestas para la solución de la problemática.

2.2 Justificación

Debido a las consecuencias medio ambientales, y las implicaciones legales de la emisión de óxidos de nitrógeno como producto del proceso de combustión, el sistema de agua inyección se considera indispensable para la operación de la turbina CT2 en la central térmica; sin este, los niveles de contaminantes emitidos superarían los permitidos de acuerdo con lo establecido por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial en la resolución número 909 del 5 de junio de 2008 [13].

Además, siendo la bomba el elemento principal del sistema, una falla en este equipo se considera como emergencia prioritaria, llegando incluso a indisponer la unidad de generación por completo. Se estima que sin la operación del sistema agua inyección la turbina CT2 genera entre 5 y 10 MW menos por hora. Dicha indisponibilidad y decremento en generación, conlleva costos adicionales de mantenimiento, y a su vez pérdidas sobre los mil dólares por hora para la compañía.

Se hace necesaria la identificación y caracterización de la falla recurrente, así como también el desarrollo de herramientas para mejorar el tratamiento de esta, evitando así la destrucción de los elementos internos. A futuro, la presencia de un sistema de alarma temprana permitiría la detección oportuna de condiciones no favorables para la integridad del equipo.

2.3 Objetivos

2.3.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de monitoreo para el control y prevención de fallas en sello mecánico de la bomba de agua inyección P-3000 asociada a la turbina de combustión CT2 de una central termoeléctrica en Barranquilla, que permita la operación segura y confiable de la unidad.

2.3.2 Objetivos específicos

- Determinar las causas de falla presentada en el sello mecánico de la bomba, teniendo en cuenta condiciones de operación y hoja de vida del equipo.
- Desarrollar un sistema de monitoreo de condiciones de operación de la bomba, asegurando la detección oportuna de condiciones anormales en el comportamiento del equipo.
- Elaborar un manual de mantenimiento detallando el tratamiento e instalación adecuada de sellos mecánicos en bombas centrifugas modelo P-3000 asociadas al sistema de agua inyección de las turbinas de combustión de la central térmica.

2.4 Metodología

1) Revisión de estado del arte.

Para el desarrollo de este proyecto se realizará una investigación a fondo acerca de la problemática presentada. Se seleccionarán diferentes artículos científicos, publicaciones en revistas, normas, proyectos, libros y manuales enmarcados en el ámbito académico e industrial de la generación térmica. Se incluirán estudios referentes al análisis de fallas presentadas en bombas de similar modelo y aplicación a la estudiada.

2) Análisis de hoja de vida del equipo.

Se estudiará la trazabilidad del equipo, incluyendo condiciones de operación, número de fallas ocasionadas por daños en el sello mecánico desde su instalación, e intervenciones realizadas en mantenimientos programados y de emergencia.

3) Determinación de las causas de fallas.

De acuerdo con las especificaciones técnicas del equipo, instalación y operación, se procederá a modelar un perfil de operación ideal. Se pretende comparar con la operación real, identificando divergencias que permitan establecer las causas de fallas en los sellos mecánicos. Se considera enfatizar en el análisis de comportamiento previo y posterior a cada intervención de mantenimiento, así como en los intervalos entre fallas. Además, se tomará en cuenta no solo el equipo de bombeo, sino la instalación de todo el sistema desde la succión del fluido hasta las condiciones de descarga.

4) Diseño de sistema de monitoreo.

Se realizará el diseño del sistema a proponer para el seguimiento del estado operacional del equipo. De acuerdo con las causas de falla encontradas, se establecerá una jerarquía de variables críticas para tener en cuenta; entre ellas se considera la medición de niveles de vibraciones, evaluación de variaciones de temperatura y presión manométrica. Para

esto además se tendrá en cuenta intrínsecamente, el punto de operación del sistema hidráulico, red de tuberías y accesorios.

5) Elaboración del manual de mantenimiento.

Se elaborará un manual con instrucciones detalladas para el manejo, instalación y mantenimiento de los sellos mecánicos de las bombas centrífugas P-3000, instaladas en los sistemas de agua inyección. Se precisa de una guía estandarizada que permita regular los procedimientos para reducir el porcentaje de error proveniente de mal manejo o instalación de cada elemento.

6) Redacción del documento final.

Se redactará el documento final en el cual se incluirán los resultados arrojados por el proyecto, así como conclusiones y recomendaciones. Se realizará bajo formato establecido por la institución, atendiendo todas las recomendaciones para su presentación.

7) Preparación para sustentación.

Se preparará la sustentación de los resultados obtenidos del proyecto ante el comité evaluador.

3. Marco teórico

3.1 Generación eléctrica

Es sabido que la energía no se crea ni se destruye, por lo que la generación de energía eléctrica es en realidad una transformación de otros tipos de energía en eléctrica por medio de diferentes procesos que varían especialmente según el tipo de energía a convertir y la materia prima de la cual se obtiene. A grandes rasgos se diferencian dos grandes grupos: convencionales y no convencionales. Entre las convencionales o también conocidas como “energías tradicionales” se encuentran las que provienen de la utilización de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural y gas licuado de petróleo), la energía nuclear y la energía hidráulica. Energías no convencionales o “alternativas” son tipos de generación en desarrollo y se caracterizan por la utilización de fuentes de energía renovables como lo son la energía solar, eólica, marina, biomasa, hidrogeno y otras.

La forma de generación y consumo predominante en diferentes países varía de acuerdo con las condiciones naturales vigentes propias del lugar y su economía. Por ejemplo, Estados Unidos como mayor productor y consumidor de petróleo, y China como mayor productor y consumidor de carbón, tenían respectivamente en 2010 una generación del 69% y 82% basada en combustibles fósiles. [14]

La U.S. Energy Information Administration (EIA), presenta en el International Energy Outlook 2019(IEO2019) una proyección de incremento en el consumo energético mundial cercana al 50% (en base a valores de 2018) para el 2050; como se aprecia en la figura 1, dicho aumento se presenta en su mayoría en los países no pertenecientes a la OECD. [15]

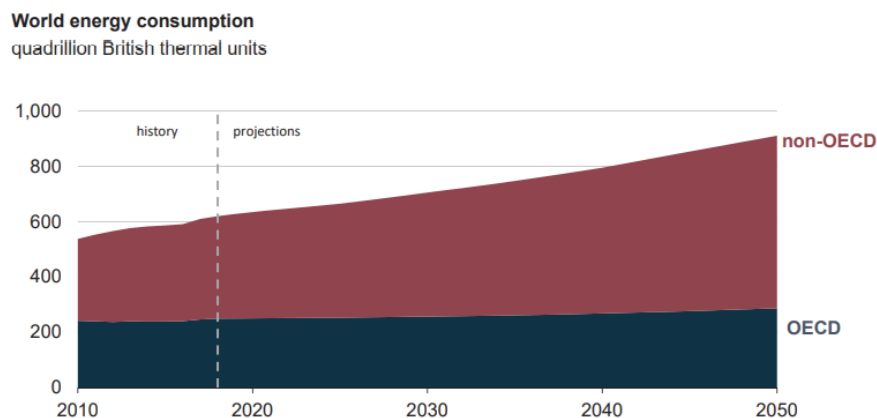


Figura 1. Consumo energético mundial. Proyección a 2050 [15]

Sin embargo, tomando como referencia la tendencia al aumento existente en la generación a partir de fuentes renovables, se muestra en la figura 2 que para dicha proyección se prevé que estas lideren el consumo energético para 2050, superando incluso la energía obtenida del petróleo y sus derivados. [15]

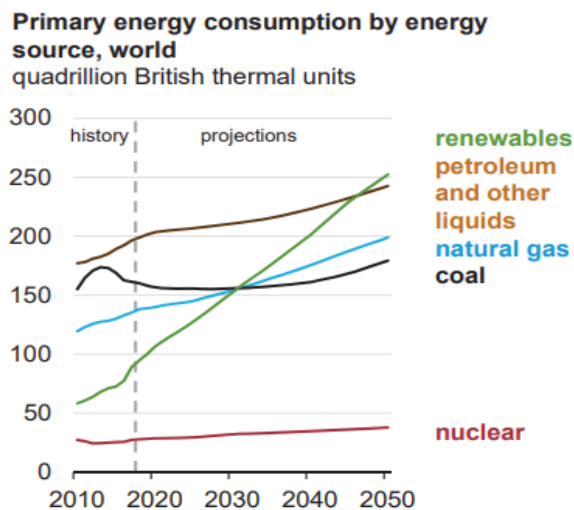


Figura 2. Consumo energético mundial según fuente de energía. Proyección a 2050 [15]

La generación de energía eléctrica se encuentra directamente relacionada con la oferta y demanda. Evaluar el comportamiento que tendrá a futuro la oferta permite establecer las condiciones para obtener márgenes de beneficio más altos partiendo de la capacidad instalada

con la que puede operar cada tipo de central generadora. Dicha demanda varía también en función de factores como el tipo de industrias existentes en la zona, el tipo y nivel de consumo residencial, y en general las condiciones ambientales.

En Colombia, el sector energético es dirigido por el gobierno nacional a través del Ministerio de Minas y Energía, y está compuesto por sectores de generación, transmisión, distribución y comercialización. Por medio del Sistema interconectado nacional (SIN) el cual es operado por el Centro Nacional de Despacho (CND), se encuentran integrados todos los sistemas eléctricos del país, como se ve en la figura 3, tanto de generación como de transmisión. Esto garantiza disponibilidad permanente de energía para todas las regiones del país sin importar los daños o indisponibilidad que alguna de las centrales pueda presentar.



Figura 3. Sistema interconectado nacional de Colombia [16]

En el sistema de generación colombiana se encuentran aproximadamente 209 plantas con una capacidad instalada de 17.326 MW, entre las que se destacan hidráulicas con un 82,16% y

térmicas con combustión de combustibles fósiles con un 16%. El 1,14% restante está distribuido entre biomasa, energía eólica y solar. [16]

Anualmente se viven en Colombia fenómenos que traen consigo sequias que afectan la producción hidroeléctrica, por lo que las centrales térmicas aumentan sus aportes. Durante el primer semestre de 2020 se reportó un incremento en la participación de las centrales térmicas de gas natural y carbón llegando a contribuir con aproximadamente 33,5% (17800 MW) de la demanda total nacional, siendo esto el doble en comparación a un 15% de aportes en el 2017. [17]

3.2 Centrales termoeléctricas

La industrialización acelerada ha hecho que la participación del ser humano en la generación de contaminantes y otros problemas medioambientales tenga un ritmo de crecimiento exponencial. Dentro de las industrias más contaminantes se encuentra la energética. Con una generación significativa de contaminantes como el dióxido de carbono y metano, la generación de electricidad basada en combustibles fósiles se sitúa como uno de los principales contribuyentes al calentamiento global.

Es el caso de las centrales termoeléctricas, que utilizan como fuente el calor obtenido de combustibles fósiles, de la fisión nuclear de combustibles nucleares, del sol, o incluso del interior de la Tierra. Entre los más utilizados se encuentran el petróleo, el gas natural y el carbón. En el caso de plantas operando en ciclo combinado, aplican dos ciclos consecutivos: ciclo Brayton y ciclo Rankine.

En un principio se realiza la compresión de aire en el compresor. Este es conducido hacia la cámara de combustión, donde es mezclado con el combustible para alimentar la turbina de gas. Dicha turbina se encuentra conectada a un generador de corriente alterna, y transmite el movimiento que impulsa al rotor. A su vez, los gases de escape son conducidos a una caldera de recuperación, donde debido a sus elevadas temperaturas, producen el vapor de alimentación para una segunda turbina que, dependiendo la configuración de la planta, se sitúa en el mismo eje e impulsa el mismo alternador, o realiza el trabajo para un segundo generador. A

continuación, el vapor de agua pasa a un condensador donde es enfriado a partir del intercambio con agua fría proveniente de torres de enfriamiento o caudal abierto de río.

Las centrales de ciclo combinado se consideran más eficientes que las convencionales ya que optimizan el uso del calor. Además, generan un menor impacto medioambiental, considerando menor cantidad de emisiones, menor consumo de agua de refrigeración, menor aporte térmico al ambiente y ahorro en combustible.

A partir de la quema de combustibles, se libera a la atmósfera dióxido de carbono (CO_2), y dependiendo del combustible, contaminantes como óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, partículas sólidas (polvo), y residuos sólidos.

3.3 Óxidos de Nitrógeno

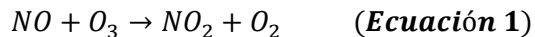
Mencionada anteriormente, una de las sustancias nocivas producto de estos procesos son los óxidos de nitrógeno. Estos, a excepción del óxido nitroso (N_2O), pertenecen al grupo de gases de efecto invernadero (GEI) indirectos. Como GEI indirectos tienen un rol importante en la formación de ozono (O_3) y “smog fotoquímico”. Otra de sus consecuencias son la acidificación directa del medio y su intervención en la concentración de radicales hidroxilos (OH), moléculas reactivas presentes en la atmósfera que controlan la oxidación de otros GEI, convirtiéndose también en GEI directos.

Los óxidos de nitrógeno tienen orígenes tanto naturales como antropogénicos, de estas últimas se resalta la combustión en motores. Son compuestos de nitrógeno y oxígeno en diversas proporciones entre los que se destacan el óxido nitroso (N_2O), óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2).

El óxido nitroso (N_2O) es incoloro y su presencia en la atmósfera es abundante; cumple un papel fundamental en el ciclo del nitrógeno. A pesar de no ser tóxico, es un gas de efecto invernadero fuente de otros óxidos de nitrógeno causantes de contaminación fotoquímica.

El óxido nítrico (NO), también incoloro, si es considerado tóxico. Su formación es propiciada por las altas temperaturas que permiten la combinación directa del nitrógeno con el oxígeno. Al

reaccionar con el ozono (ecuación 1) forma dióxido de nitrógeno, compuesto más estable y con mayor tiempo de residencia en la atmosfera. [18]



El dióxido de nitrógeno (NO₂) por su parte adquiere un color pardo rojizo y es el más tóxico o perjudicial. Este se forma a partir de la oxidación del óxido nítrico. Al encontrarse en la atmosfera, reacciona con partículas de agua, radicales OH o incluso el ozono, formando ácido nítrico (HNO₃) que posteriormente se precipita en el fenómeno conocido como lluvia acida.

Los óxidos de nitrógeno intervienen también en la destrucción de la capa de ozono. Aunque actúen sólo como catalizadores, pequeñas cantidades de óxido pueden destruir grandes cantidades de ozono. Se destruye la molécula de ozono, formando dos de oxígeno.

De dicho proceso los óxidos de nitrógeno no se consumen, por lo que siguen destruyendo ozono. Aquí se evidencia la importancia de los radicales hidroxilos, que actúan reaccionando con NO_x formando por ejemplo ácido nítrico (H₂NO₃).

En general se representa como NO_x la suma de óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂), por su abundancia y clasificación como nocivos. A su vez, el mayor porcentaje corresponde a óxido nítrico, sin embargo, son medidos por cantidad de dióxido de nitrógeno equivalente en aire seco, a 1 atm y 0°C. (mg/m³ mg/MJ, ppm, ppmv) [19]

Según su formación, los óxidos de nitrógeno se clasifican en tres tipos:

NO_x TÉRMICOS: Corresponde a la mayor parte de NO_x producidos durante la combustión. Zeldovich plantea en 1946 que a temperaturas superiores a 2700°F la oxidación del nitrógeno del aire atmosférico da lugar a la formación de este tipo de NO_x [20]. Dentro de esta categoría, un 95% corresponden a NO, siendo el 5% restante NO₂ y N₂O en menor cantidad.

La reducción de temperaturas es uno de los métodos claves para la disminución de NO_x térmicos, debido a que la producción de estos es función exponencial de la temperatura. [19]

NO_x DE COMBUSTIBLE: Corresponde a aquellos formados por la unión del nitrógeno contenido en el combustible, con el oxígeno del aire. Se presenta en mayor medida en

procesos con combustibles como el carbón o combustibles líquidos, no siendo así en combustión de gas natural. [19]

NOx RÁPIDOS: Generalmente son formados en menor proporción, a partir de la rápida reacción del nitrógeno atmosférico con los radicales hidrocarbonados (CH). Los factores más importantes en la generación de NOx son la temperatura de la llama, la cantidad de nitrógeno en el combustible, el exceso de aire y la temperatura del aire de combustión. Además, un tiempo de residencia más largo a altas temperaturas da como resultado un NOx más alto.

Debido al aumento de tamaño y eficiencia de las turbinas de gas, y a su vez cantidad de sustancias contaminantes producidas, a nivel mundial se han fortalecido las regulaciones medio ambientales sobre emisión de óxidos de nitrógeno. En Colombia, el sector de generación energética en centrales térmicas está regulado en base a la capacidad instalada. Según el artículo 11 de la resolución 909 de 2008, para centrales existentes con turbina a gas con una generación superior a 20MW, los estándares de emisión admisibles son los listados en la tabla 1. A tener en cuenta que dichos estándares deben ser cumplidos en todos los puntos de descarga existentes. [13]

Combustible	Estándares de emisión admisibles* (mg/m ³)		
	MP	SO ₂	NOx
Gaseoso	No aplica	No aplica	120
Líquido	No aplica	850	300

Tabla 2. Estándares de emisión admisibles para generación con turbina a gas < 20MW. [13]

*A condiciones de referencia (25°C, 760 mm Hg) y oxígeno de referencia de 15%.

3.4 Sistemas de inyección de agua

Diferentes fabricantes de turbinas a gas han realizado modificaciones enfocadas a procesos de disminución de contaminación a lo largo de los años.

Por ejemplo, Siemens-Westinghouse, dentro del programa ATS comenzado en el año 1992, se plantea objetivos de desarrollo tecnológico para hacer sus sistemas en turbinas a gas más eficientes, incluyendo evadir el uso de control de emisiones post-combustión. Uno de los principales enfoques en su fase 3 fue el desarrollo de combustiones con muy bajos niveles de NOx.

Aplicando a la serie W501, dentro de las últimas mejoras se selecciona un modelo de cámara de combustión Dry Low Nox (DLN), el cual está compuesto de 8 conjuntos de remolinos pre-mezcladores alrededor de la boquilla piloto con la misma configuración para mezcla. Esto permite una mezcla más homogénea y evita la recirculación. También incluyó el estudio de un sistema de combustión catalítica, por medio del cual se obtienen llamas más estables y se evita el apagado de la llama. [21]

Entre los métodos para la reducción de producción de NOx se destaca la inyección de agua y vapor como una de las más efectivas. Westinghouse comenzó la aplicación de estos sistemas en su mayoría en unidades W501B(70MW), donde se inyectaba agua atomizada a la cámara de combustión como se muestra en la figura 4.

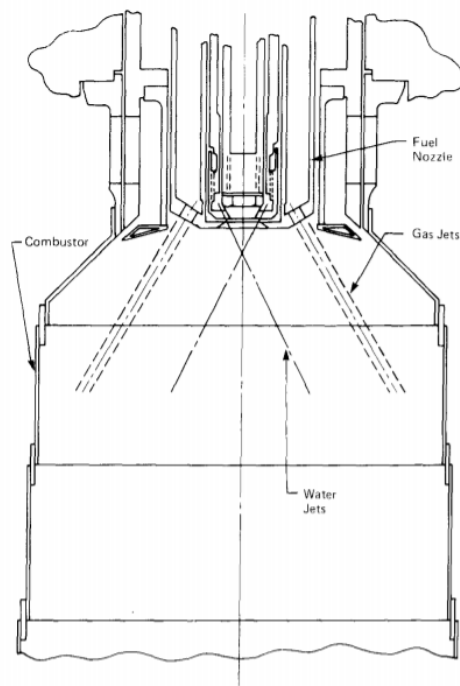


Figura 4. Sistema de inyección de agua a cámara de combustión de turbina. [22]

Se realizaron diferentes evaluaciones, concluyendo para un primer estudio que la inyección de agua con caudales superiores generó una disminución de temperaturas hasta el sobre enfriamiento en algunas zonas del anillo interno, mientras que otras no se vieron afectadas. Como se ve en la figura 5, la temperatura interna comienza a descender iniciada la inyección de agua, manteniéndose en sus niveles más bajos cuando el caudal de agua es alto. [22]

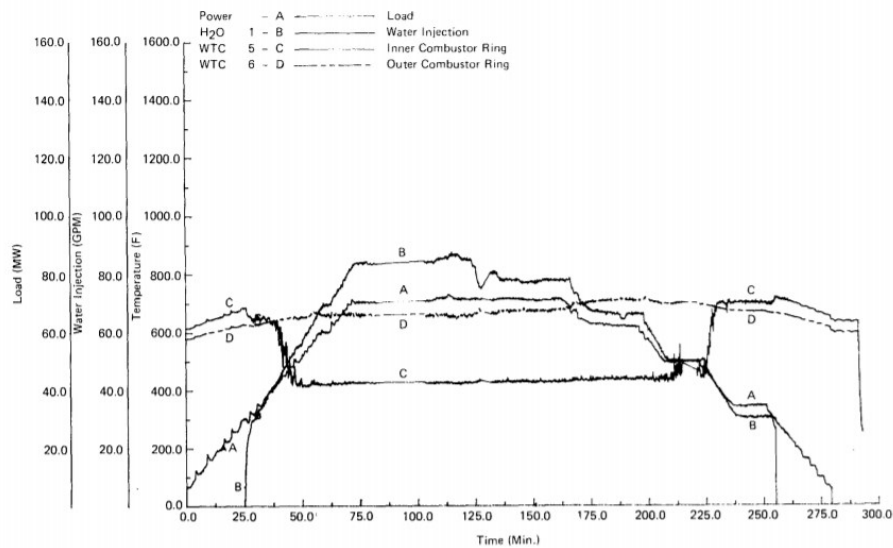


Figura 5. Comportamiento de temperaturas en cámara de combustión vs carga y caudal de inyección de agua. [22]

Para el segundo estudio, se probaron diferentes configuraciones de inyección de gas y agua, modificando ángulos de entrada de los fluidos. Este permitió advertir que, al incrementar los ángulos de entrada del agua hacia las paredes, el choque del agua causó sobre enfriamiento localizado en gran parte de la circunferencia; y que, modificando los ángulos de entrada del gas, se evitaba el impacto excesivo de agua con las paredes. [22]

Un tercer estudio con aplicación de los parámetros identificados en el segundo estudio y variando esta vez la cantidad y dirección de los orificios de entrada permitió distinguir variaciones tanto en la temperatura de las paredes como una disminución en los niveles de emisión de NOx. Para mayor cantidad de orificios, disminuyó el gradiente de temperatura, sin embargo, aumentó la emisión de NOx. Por su parte, al variar la dirección de los orificios hacia las paredes se consiguió un aumento del gradiente de temperatura y una disminución de NOx. [22]

Como resultado, se selecciona la configuración mostrada en la figura 6, donde la inyección de gas bloquea de manera parcial la inyección directa de agua contra las paredes.

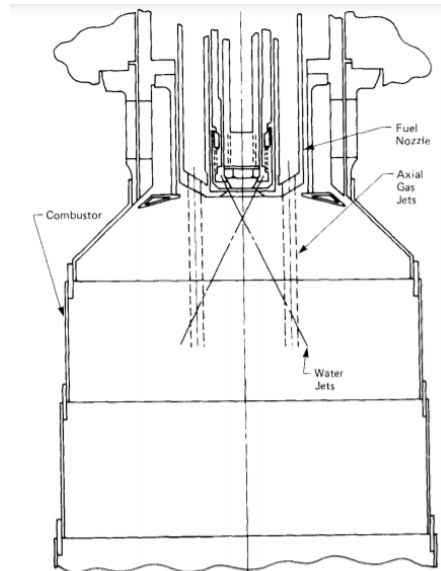


Figure 11. Gas Fuel and Water Injection System (Improved Configuration)

Figura 6. Configuración seleccionada para el sistema de inyección de agua a cámara de combustión de turbina [22]

Moore realiza una también una comparación entre valores aproximados de los niveles alcanzados de emisiones de óxidos de nitrógeno con y sin inyección de agua o vapor, obteniendo para la aplicación de gas natural una disminución del 80% de emisiones realizando únicamente inyección de agua con llamas de difusión. [19]

Niveles de emisión de NOx* (ppm)			
	Sin inyección	Inyección de agua	Inyección de vapor
Gas natural	150	30	35

Tabla 3. Niveles de emisión de Óxidos de nitrógeno.
Oxígeno de referencia a 15%. [19]

Los sistemas de inyección consisten en atomizar agua al aire, a la mezcla aire combustible o directamente en la cámara de combustión. Dicho fluido al tener un calor latente de vaporización alto hace que la capacidad calorífica de toda la mezcla aumente, disminuyendo la temperatura interna en la cámara y enfriando regiones calientes que puedan generar una ignición prematura

no deseada. Dicha reducción de temperatura conlleva a la disminución en la formación de NOx térmicos.

3.5 Bombas rotodinámicas

Las bombas rotodinámicas son todas aquellas turbomáquinas que se encargan de transformar energía mecánica en energía hidráulica en el fluido que la atraviesan cuyo principio de funcionamiento se basa en la ecuación de Euler y el transmisor de energía es el rodete o impulsor. [23]

Partes principales de una bomba rotodinámica: De manera general, las bombas rotodinámicas están constituidas por dos zonas principales: La zona trasera que es donde se encuentra el motor eléctrico que convierte la energía eléctrica en energía mecánica sobre un eje haciéndolo girar a determinadas revoluciones y la zona delantera que es donde se encuentra el rodete con características específicas de diseño, conectado al eje giratorio. El rodete va cubierto por una carcasa tipo caracol junto a los conductos entrada y salida del fluido.

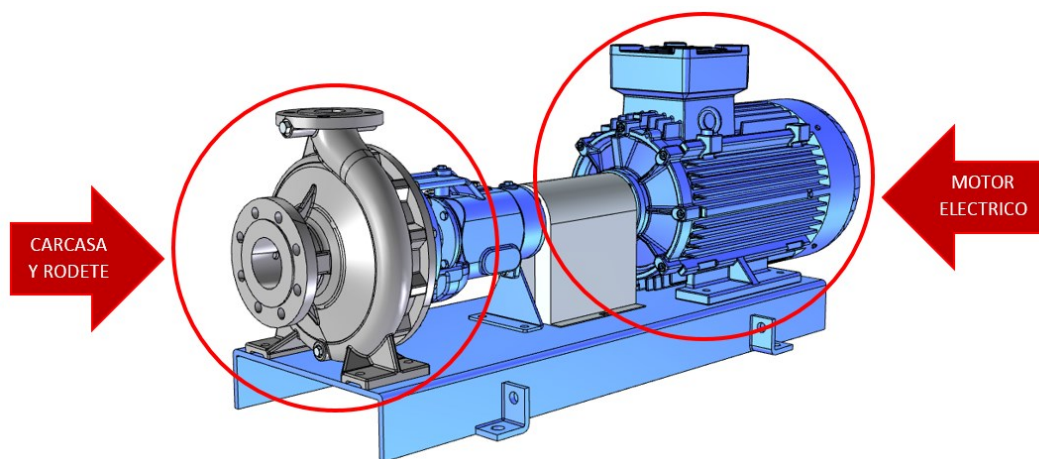


Figura 7. Instalación equipo de bombeo, zona expuesta y en contacto con el fluido (señalado a la izquierda) y motor eléctrico (señalado a la derecha) [24]

Las bombas rotodinámicas se componen de distintos elementos que trabajan en conjunto para un buen funcionamiento integral del dispositivo. Fallas en los componentes internos pueden

ocasionar una serie de problemas, viéndose afectada la integridad del dispositivo o la producción según las características del fluido a la descarga del mismo.

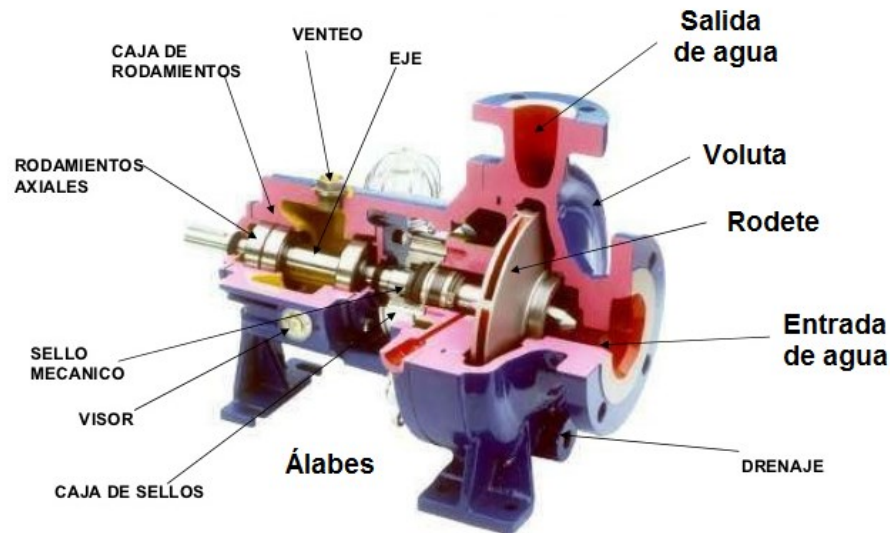


Figura 8. Principales partes de una bomba centrífuga [25]

Las empaquetaduras y sellos, son elementos de seguridad que permiten un ajuste entre componentes y evitando la interacción de fluidos entre las distintas zonas que componen esta máquina. En las bombas, los sellos mecánicos son los dispositivos se encargan justamente de evitar que el fluido de trabajo sea un intruso en la zona donde se encuentra el estator y el rotor del motor eléctrico que compone la bomba, con el fin de evitar daños eléctricos en la misma, pérdidas de energía, entre otras consecuencias.

3.6 Sellos mecánicos

Los sellos mecánicos son aquellos elementos ubicados entre el eje que gira y la parte fija posterior al impulsor o la voluta, cuya principal función es la estanqueidad, sin embargo, su evolución ha permitido que la implementación de estos elementos tenga otros beneficios como la reducción de fricción para evitar el desgaste del eje permitiendo mantener una potencia de funcionamiento adecuada. [26]



Figura 9. Sellos mecánicos para bombas centrifugas [26]

Su principio de funcionamiento es la estanqueidad dinámica, la cual se da cuando solo una pequeña capa del fluido de trabajo queda entre las 2 caras de rozamiento impidiendo que más fluido pase al exterior.

3.6.1 Materiales de sellos mecánicos

Los sellos mecánicos están diseñados según el fluido de trabajo que se esté operando, por lo que reconocer las características de este, permitirá una elección adecuada del sello y así evitar daños prematuros.

Para líquidos que se espera que no tengan sólidos en suspensión se utilizan sellos mecánicos cuya cara rotatoria y estacionaria es de carbón y cerámica respectivamente. Estos son los más usados para bombeo de agua potable. Estos sellos deben estar en contacto con el agua constantemente, en caso de fugas puede sufrir fracturas o reducción de la vida útil.

Si se requiere bombear fluidos con abrasivos, se recomienda utilizar sellos cuya cara rotatoria sea de carbón y silicio en la estacionaria. Por una parte, el silicio es altamente resistente a los materiales abrasivos presentes en el fluido de trabajo, mientras que el carbón

se encarga de evitar sobrecalentamientos en el sistema. En caso tal el fluido contiene una alta cantidad de abrasivos, se pueden usar sellos de carburo de silicio en ambas caras.

Aparte de las caras de los sellos, el elastómero es otra parte fundamental del sello cuyo material debe tenerse en cuenta según el fluido de trabajo que se utilice. Los materiales más reconocidos son Buna, Viton y EPR o EPDM. Los elastómeros de Buna se usan principalmente para agua potable, soluciones oleosas, combustibles aromáticos y solventes, mientras que el viton se utiliza para fluidos más agresivos como aceites y el EPR o EPDM se utiliza para ozono, ácidos, soluciones alcalinas, entre otros. [27]

3.7 Cavitación

La cavitación es un fenómeno que surge al interior de la bomba cuando se genera la formación y explotación de burbujas de vapor. Puede ocurrir en distintos puntos del interior de la bomba, donde la presión cae por debajo de la presión de vapor del fluido. Esto ocurre cuando el NPSHR (Altura neta positiva requerida) no está disponible. La cavitación afecta notablemente la integridad de la bomba, ejerce vibraciones excesivas, pérdida de presión en el fluido a la descarga, entre otros efectos negativos. Para evitar la existencia de este fenómeno, debe trabajarse sobre el NPSHD (altura Neta positiva disponible) en la succión del sistema de bombeo, garantizándose que la presión en la succión sea superior a la presión de vapor del fluido. [28]



Figura 10. Efectos de la cavitación sobre impulsor abierto [28]

3.7.1 NPSH Disponible y Requerido

Las alturas netas positivas, son variables que hay que tener en cuenta para poder determinar y reducir la posibilidad de cavitación durante el bombeo del fluido de trabajo. Para asegurar que no exista cavitación, $NPSHD > NPSHR + 0.5$.

El NPSHR es una variable que depende de las características de la bomba, principalmente del caudal y las revoluciones. Este determina la capacidad en la aspiración de cada bomba según la curva seleccionada de la bomba. Por otro lado, el NPSHD es una variable que depende de las características de la instalación hasta la brida de aspiración de la bomba, básicamente es la mínima presión por encima de la tensión de vapor del fluido a la que se opera. A continuación, se ilustra la configuración favorable y desfavorable para disminuir la posibilidad de cavitación.

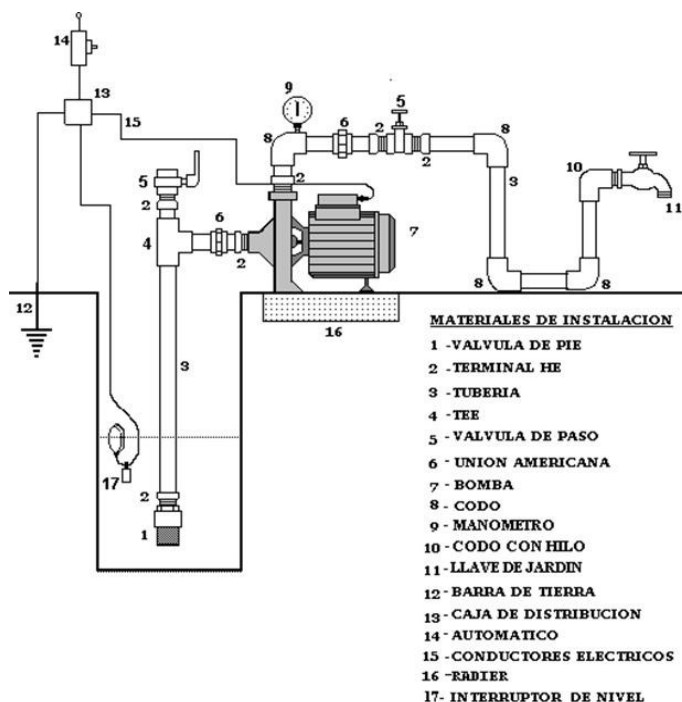


Figura 11. Instalación clásica de equipos de bombeo con accesorios y tubería. [29]

Para calcular el NPSHD en aspiración tenemos entonces:

$$NPSHD = \frac{P_l - P_v}{\gamma} - H_a - h_a \quad (\text{Ecuación 2.})$$

Donde P_l es la presión del fluido en el depósito, P_v es la presión de Vapor, H_a es la altura manométrica de aspiración y h_a las pérdidas menores (Tuberías, accesorios, etc.). Debido a que es necesario mantener por encima el NPSHD con respecto al NPSHR, se puede intervenir diferentes puntos. Podemos aumentar la presión en el depósito según sea posible, podría cambiarse el sistema en la succión (Material de tubería, diámetro, accesorios etc.) reduciendo el valor de h_a o modificar la configuración de tal modo que la bomba no deba romper con la resistencia ante la aspiración, a esta modificación se le conoce como configuración en carga, ubicando el reservorio por encima del nivel de la bomba, de tal modo que la ecuación para calcular el NPSH Disponible en carga ahora es:

$$NPSHD = \frac{P_l - P_v}{\gamma} + H_a - h_a \quad (\text{Ecuación 3})$$

4. Central termoeléctrica

La termoeléctrica de estudio, se encuentra ubicada en la ciudad de Barranquilla. Está conformada por dos plantas de generación, la primera entró en operación en 1993, que no sería la única puesto que empezó a operar otra en 2011 con la que aumentó su capacidad. La más antigua se encarga de una generación actual de 160 MW, mientras que la más moderna se encarga de generar 450 MW, en conjunto 610 MW posicionando la central termoeléctrica como una de las más importantes de la costa caribe colombiana.

4.1 Planta de generación

La planta opera en ciclo combinado, con una configuración 2x1: Dos turbinas a gas Westinghouse-Siemens CT2 y CT3 modelos W501D5 y W501FC+ respectivamente, y una turbina de vapor ST2 de intermedia y alta presión con recalentamiento Siemens modelo SST 900-RH. Actualmente CT2 genera 120 MW, CT3 160 MW y ST2 170 MW.

4.2 Sistema de agua inyección CT2

Las turbinas Westinghouse-Siemens modelo W501D5 no poseen sistema de agua inyección de fabricación. Es un sistema auxiliar planteado por el fabricante como complemento a las modificaciones realizadas al equipo para aumentar su rendimiento en generación. El sistema de agua inyección agrega 5 MW de generación, permitiendo alcanzar los 120 MW.

La inyección de agua a turbina se realiza en dos etapas, A y B.

Etapas A: Se realiza inyección de agua atomizada directo a cámara de combustión. Desde la descarga, la línea A se conecta a un manifold que distribuye a las boquillas piloto de las 14 toberas.

Etapa B: La línea B permite la atomización de agua al gas natural previa entrada del combustible a la cámara.

Ambas líneas cuentan con válvula de corte y una válvula proporcional que permite la regulación remota del caudal. Para el caso de la etapa A, son pilotadas hidráulicamente, y para etapa B, su accionamiento es neumático.

Adicional a esto, tiene una línea de recirculación proporcional al tanque de almacenamiento de agua desmineralizada número 9.

El sistema está conformado por:

4.2.1 Tanque de agua desmineralizada # 9

Tanque cerrado a condiciones atmosféricas con capacidad de 600 m³. En condiciones normales mantiene nivel de 80% de su capacidad.

Posee una boquilla de entrada de agua proveniente de planta de agua y una boquilla de salida con conexión a manifold de bombas de suministro para los sistemas de compresión húmeda e inyección de agua para turbinas. Adicional a esto, se tiene una boquilla de salida por rebose.



Figura 12. Tanque de agua desmineralizada no. 9.
Fuente: Autores

4.2.2 Bomba de suministro agua inyección CT2

Bomba SUNFLO P-3000 modelo P3DJF, cuya succión es directa del tanque de almacenamiento no. 9, aumenta de presión del fluido hasta 120 psi en la descarga.



Figura 13. Bomba de suministro agua inyección CT2.
Fuente: Autores

4.2.3 Sistema de tuberías de transporte

El sistema de tuberías de transporte del sistema es de acero inoxidable AISI 304 y consta de:

Tubería de 6" a la salida del tanque por zona inferior, el paso del fluido se genera por una válvula de mariposa a 30 cm del tanque, recorre 1.93 m en línea recta y baja 20 cm con un codo radio largo 90°. La tubería conecta con el manifold común que alimenta las bombas suministro, recorre 5 m en línea recta hasta la conexión del manifold para la alimentación de la bomba suministro de interés y 2m en línea recta de la succión cuyo diámetro es de 3" por lo que se requiere la implementación de reducciones a las salidas del manifold.

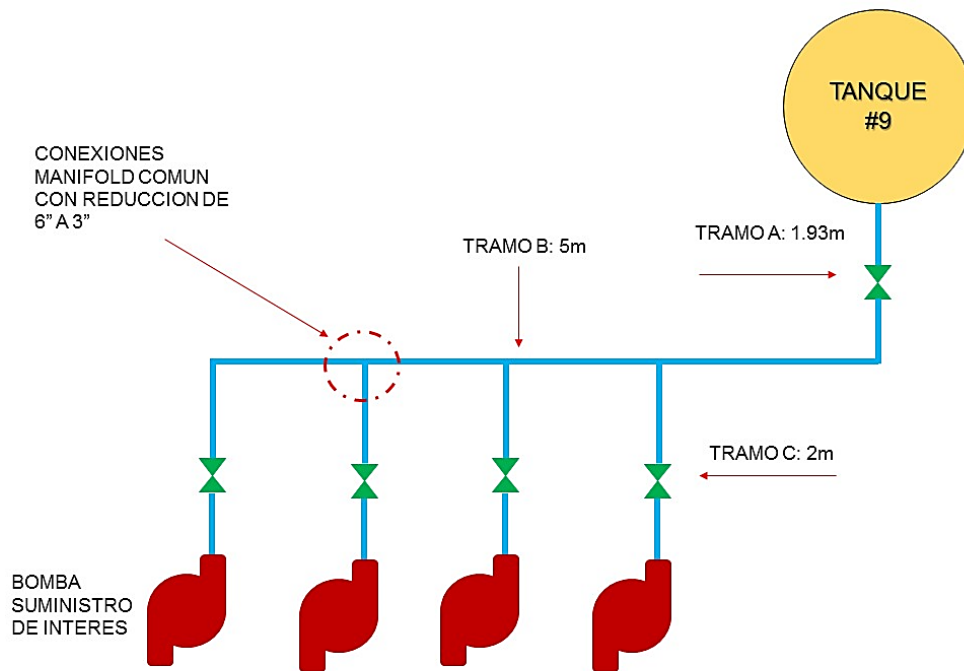


Figura 14. Succión de bomba suministro
Fuente: Autores

A la descarga de la bomba suministro, se aplica una ampliación de 1 ½ a 2", en la tubería de descarga se encuentra un manómetro, indicador de servicio, válvula cheque y el sistema de recirculación. Hay 25 metros aproximadamente en la descarga de la bomba suministro y 7 codos que redireccionan el flujo hasta que entra subterráneamente en busca de la bomba P-3000 del sistema agua inyección. La tubería recorre 65 metros aproximadamente por el subterráneo y sale para recorrer 2.5 metros hasta la succión de la bomba P-3000. En este último recorrido se tienen 3 codos y una válvula de mariposa.

4.2.4 Bomba principal de agua inyección CT2

Bomba SUNFLO P-3000 modelo P3DJF, con una presión de succión de 120 psi mantenidos por la bomba suministro.



Figura 15. Conjunto motor-bomba de sistema de agua inyección CT2.

Fuente: Autores

Su presión de descarga es de 1069 psi. En la descarga posee una válvula proporcional que permite regular el flujo de entrada hacia las toberas de acuerdo con la carga de operación a la que se encuentre la turbina. (Las características detalladas de la bomba P-3000, se encuentran en el apartado 5.2.1 del presente documento)

4.3 Tratamiento de agua

El agua utilizada en la mayoría de los procesos relacionados con operación de turbinas y calderas debe ser desmineralizada. Normalmente se tienen requerimientos específicos con respecto a valores de conductividad, pH, y contenido de minerales como sodio, magnesio, potasio, sílice y calcio.

La termoeléctrica posee sus propias plantas de desmineralización de agua cuyo proceso comienza en la toma de agua directa del río Magdalena. Dicha agua es succionada por 4 bombas y es transportada hacia los clarificadores. Cada ciclo posee su propio clarificador y tanque de agua clarificada.

En el clarificador son agregados compuestos químicos como policloruro de aluminio y polímeros, que ayudan a la agrupación-sedimentación de barro y partículas pesadas.

El agua que se encuentra suspendida en la superficie exterior de los clarificadores es captada por medio de flautas y conducida hacia los tanques de agua clarificada. Esto permite que se descarten las partículas de grandes tamaños y se realice una mejor filtración del agua.

Las bombas de agua clarificada impulsan el agua desde dichos tanques de almacenamiento y la conducen hacia planta de agua.

Dentro de las plantas de tratamiento de agua se identifican tres grandes procesos consecutivos:

FILTROS MULTIMEDIA: Consiste en filtros verticales de flujo descendente que permiten la retención de sólidos en suspensión entre 5 y 20 micras. Dicha filtración se hace a través de diferentes materiales porosos con densidades y granulometrías según los requerimientos.

Se utilizan como medios filtrantes la antracita para un pre-filtrado con densidad relativa media de $1,6 \text{ g/cm}^3$, Garnet, con un tamaño efectivo de 0,35 mm para filtrado de partículas entre 10 y 20 micrones, y la arena, al igual que la grava, cuya capacidad de filtración es proporcional al tamaño de grano. Es común encontrar diferentes combinaciones de los medios de filtración dispuestas según tamaño de granos, como se muestra en la figura 13.

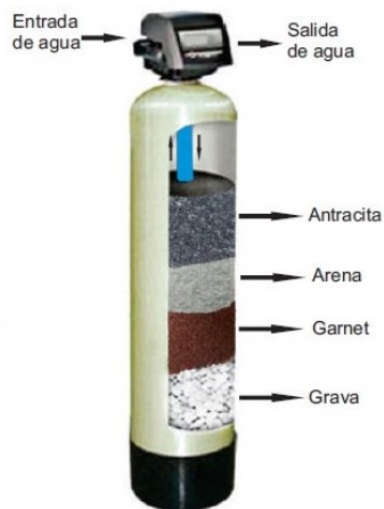


Figura 16. Composición interna de filtros multimedia multietapas. [30]

En algunos casos, se utiliza únicamente zeolita natural, cuya capacidad de filtrado cubre con todas las especificaciones reteniendo partículas de hasta 5 micras y tiene una vida útil más extensa.

OSMOSIS INVERSA: El proceso de osmosis consiste en poner en contacto dos soluciones con diferentes concentraciones salinas a través de una membrana con el fin de igualar concentraciones.

En la osmosis inversa, el fluido es forzado con altas presiones a atravesar la membrana, venciendo la presión osmótica y consiguiendo que el agua fluya hacia el lado de menor concentración. Esta es conocida como agua osmotizada. El cuerpo de agua que no logra pasar por la membrana se conoce como agua rechazada, y es expulsado para evitar el taponamiento de la unidad.

Las aplicaciones industriales de la osmosis inversa están enfocadas al tratamiento y purificación de aguas para alimentación de calderas, generación de electricidad, laboratorios, microelectrónica, entre otras, donde los equipos son muy delicados.

LECHOS MIXTOS: Se realiza un tratamiento con intercambio iónico y catiónico por medio de resinas. En un recipiente se encuentran partículas de resinas catiónicas y aniónicas mezcladas, formando un manto que actúa en conjunto como muchas etapas catión-anión. Debido a la continuidad de etapas de tratamiento se obtiene una calidad de agua superior, con conductividades alrededor de los 0,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y niveles de sílice por debajo de los 10 ppb.

El agua desmineralizada es conducida hacia el tanque número 9 de almacenamiento para su posterior suministro a diferentes procesos.

5. Análisis de causa raíz

5.1 Antecedentes

A partir del mes de marzo del año 2012 los daños de los sellos mecánicos de la bomba P-3000 de la turbina CT2 han sido continuos y muy tempranos con respecto al tiempo de vida según el fabricante (Véase la Tabla 1).

El tipo de falla es recurrente, y consiste en aparición de picaduras y erosiones sobre las superficies de las caras del sello. Dichas picaduras permiten la aparición de fugas tanto internas como externas, lo que puede ocasionar daños en el motor y pérdidas de presión en la descarga.

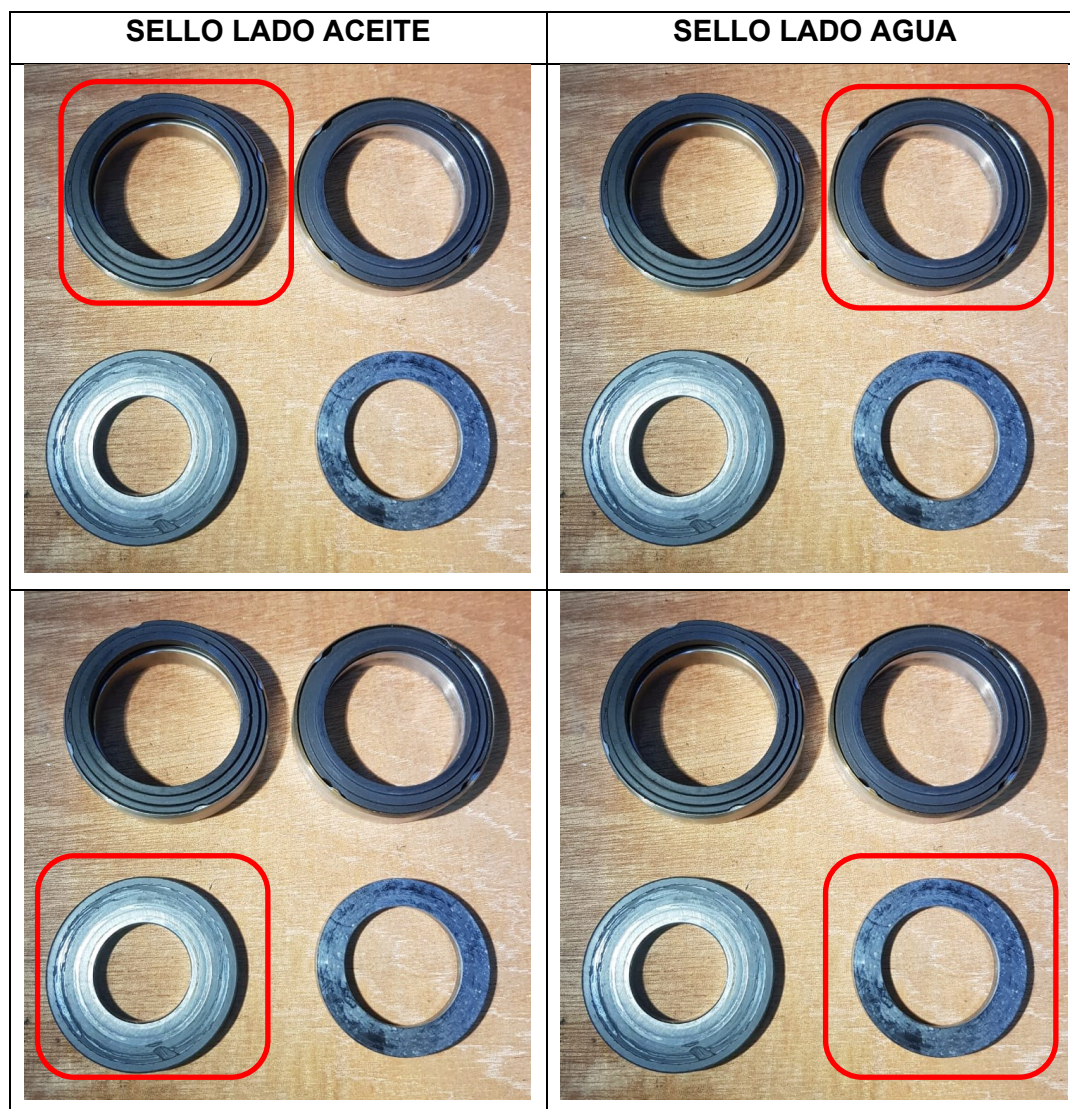
Modelo de sello John Crane 8AB single**Cara estacionaria de carbón****Cara rotativa de carburo de tungsteno** (Véase las características del sello y de la bomba en las tablas 4,5,6 y 7)

Figura 17. Sellos mecánicos en mal estado. En las 2 imágenes superiores se señala la cara rotativa; en las 2 imágenes inferiores se señala la cara estacionaria

Fuente: Autores



Figura 18. Comparación cara de sello mecánico que ha sufrido picadura (Lado izquierdo), cara de sello mecánico que está en correcto estado (lado derecho).

Fuente: Autores



Figura 19. Efectos de la erosión en las caras de los sellos mecánicos

Fuente: Autores

Se realiza una matriz de riesgos asociando los diferentes problemas que pueden ser presentados por la bomba P-3000, donde se ubica que los problemas de lubricación y de sellos mecánicos son catalogados muy graves. Ver figura 20.

MATRIZ DE RIESGOS BOMBA P-3000					LEYENDA						
RIESGO	Probabilidad (Ocurrencia)	Gravedad (Impacto)	Valor del Riesgo	Nivel de Riesgo	GRAVEDAD (IMPACTO)						
					MUY BAJO 1	BAJO 2	MEDIO 3	ALTO 4	MUY ALTO 5		
Problemas eléctricos en el motor provocados bajo aislamiento en las bobinas (problema de induccion)	1	4	4	Apreciable	PROBABILIDAD	MUY ALTO 5	5	10	15	20	25
Problemas eléctricos en el motor provocados por soltura de barras de la jaula de ardilla	2	4	8	Apreciable		ALTO 4	4	8	12	16	20
Problemas electricos del motor causados por fallas en el campo magnetico debido a una mala calidad de corriente	1	4	4	Apreciable		MEDIO 3	3	6	9	12	15
Problemas de desbalanceo probcados por el ventilador del motor o el impulsor de la bomba	2	2	4	Apreciable		BAJO 2	2	4	6	8	12
Problemas de soltura mecanica en la patas del motor	2	2	4	Apreciable		MUY BAJO 1	1	2	3	4	5
Problemas estructurales por una mala sedimentacion del hormigon	1	3	3	Apreciable							
Problemas de lubricacion en los cojinetes de la bomba provocado por contaminacion interna o externa	3	5	15	Muy grave							
Problemas en los rodamientos del motor debido a una mala practica en la instalacion	3	3	9	Importante							
Problemas de los rodamientos del motor debido a una mala fabricacion	1	3	3	Apreciable							
Problemas causados a la bomba debido a turbulencia o cavitacion en el fluido	3	3	9	Importante							
Problemas con los rodamientos del motor causados por un mal programa predictivo (lubricaciones a destiempo)	3	3	9	Importante							
Problemas con los sellos mecanicos de la bomba (fugas y partiduras)	3	5	15	Muy grave							
Problemas multiples provocados a la bomba por una mala operacion	2	4	8	Apreciable							
Problemas causados por una mala seleccion de bomba o una mal diseo de tuberias	1	5	5	Apreciable							
Problemas en la alineacion del conjunto motor-bomba	1	3	3	Apreciable							
Problemas con el enfriador de aceite	3	4	12	Importante							
Problemas con la instrumentacion de la bomba	2	3	6	Apreciable							
Problemas en cambios quimicos en el fluido a trasegar	3	4	12	Importante							





	Riesgo muy grave. Requiere medidas preventivas urgentes. No se debe iniciar el proyecto sin la aplicación de medidas preventivas urgentes y sin acotar solidamente el riesgo.
	Riesgo importante. Medidas preventivas obligatorias. Se deben controlar fuertemente las variables de riesgo durante el proyecto.
	Riesgo apreciable. Estudiar económicamente si es posible introducir medidas preventivas para reducir el nivel de riesgo. Si no fuera posible, mantener las variables controladas.
	Riesgo marginal. Se vigilará aunque no requiere medidas preventivas de partida.

Figura 20. Matriz de riesgos para bomba P-3000

Fuente: Autores

Aunque la selección e instalación incorrecta de los sellos con respecto al sistema de bombeo sea la principal causa de los fallos en los mismos, existen otras posibles causas por las que los sellos mecánicos se deterioran progresivamente, los principales se enumeran a continuación:

- Mala operación y mantenimiento

- Vibración excesiva en la bomba (Esta puede ser por agentes externos, mala instalación y principalmente Cavitación)
- Desalineación entre el motor y la bomba
- Propiedades del fluido de trabajo no óptimas para el material del sello

Para realizar el análisis de Causa Raíz, vamos a examinar cada una de las variables anteriormente mencionadas y determinar las posibles soluciones correspondientes.

5.1.1 Bomba P-3000 SUNFLO

La bomba del sistema de agua inyección encargada del transporte del agua a la turbina CT2, es la SUNFLO P-3000 modelo P3DJF. [31]

CONDICIONES DE OPERACIÓN					
FLUIDO	AGUA DESMINERALIZADA				
P.T, °F Norm	100	U.S Gpm, Norm	—	CAL.	200
S.G @ P.T	900	Pres. Desc, Psig	—		
Pres. De Vap @P.T Psia	0.95	Dif. De Pres, Psi	800		
Visc. @P.T Cp	1.0	Dif. De Cabeza, Ft	1861		
Corr/Eros	No	Npsh Disponible, Ft	Desconocido		

Tabla 4. Condiciones de operación de bomba [31]

DESEMPEÑO			
NPSH Requerido (Agua), ft	13.3	RPM	12696
No. Estaciones	1		
Eficiencia de diseño	58.8	Bhp de diseño	156.7
Max bhp, Rata de impulsión	181.8	Cabeza max, Rata de imp, ft	2079
Min. Cont. Gpm	40	Presión de cavidad en sello, psig	—
Interc. Calor de aceite lubricante	Yes	3X18 dos caras	316SS
Requerimiento de tubería auxiliar	Yes		
Por sundstrand	Yes		
Rotación de conductor	CW		

Tabla 5. Desempeño de bomba [31]

CONSTRUCCIÓN Y MATERIALES					
Montaje de carcasa	Pie	División	Radial	Tipo	Difusor
Aberturas con toma de aire		1/2"	NPT, con venteos y desagües		
Boquillas	Tamaño	ASA Rating	Frente	Posición	
Succión	3"	600 #	R.F	Final	
Descarga	2"	600 #	R.F	Vertical	
Diametro imp. Desc.	5.20	Max Dia.	5.30	Tipo	Abierto
Inductor	Yes	Diametro difusor	0.58	Acoplado	
Sello mecánico	John Crane 8AB Single				
O-RINGS	VITON	Plan de flush	13 a Intercambiador en caja de engrane		
Tipo de rodamiento		Deslizamiento	Lubricación	Por presion	

Tabla 6. Construcción y materiales de bomba [31]

METALURGIA			
Carcasa	316SS	Carcasa del sello	316SS
Impulsor	316SS	Inductor	316SS
Eje	AISI 4140	Piñón conducido	AISI 8620
Engrane conductor	AISI 8620	Carcasa de caja de engranes	Aluminio
Camisa del eje	316SS	Placa difusora	316SS
Cara estacionaria de sello	Carbón	Cara rotatoria del sello	Carburo de tungsteno

Tabla 7. Metalurgia de bomba [31]

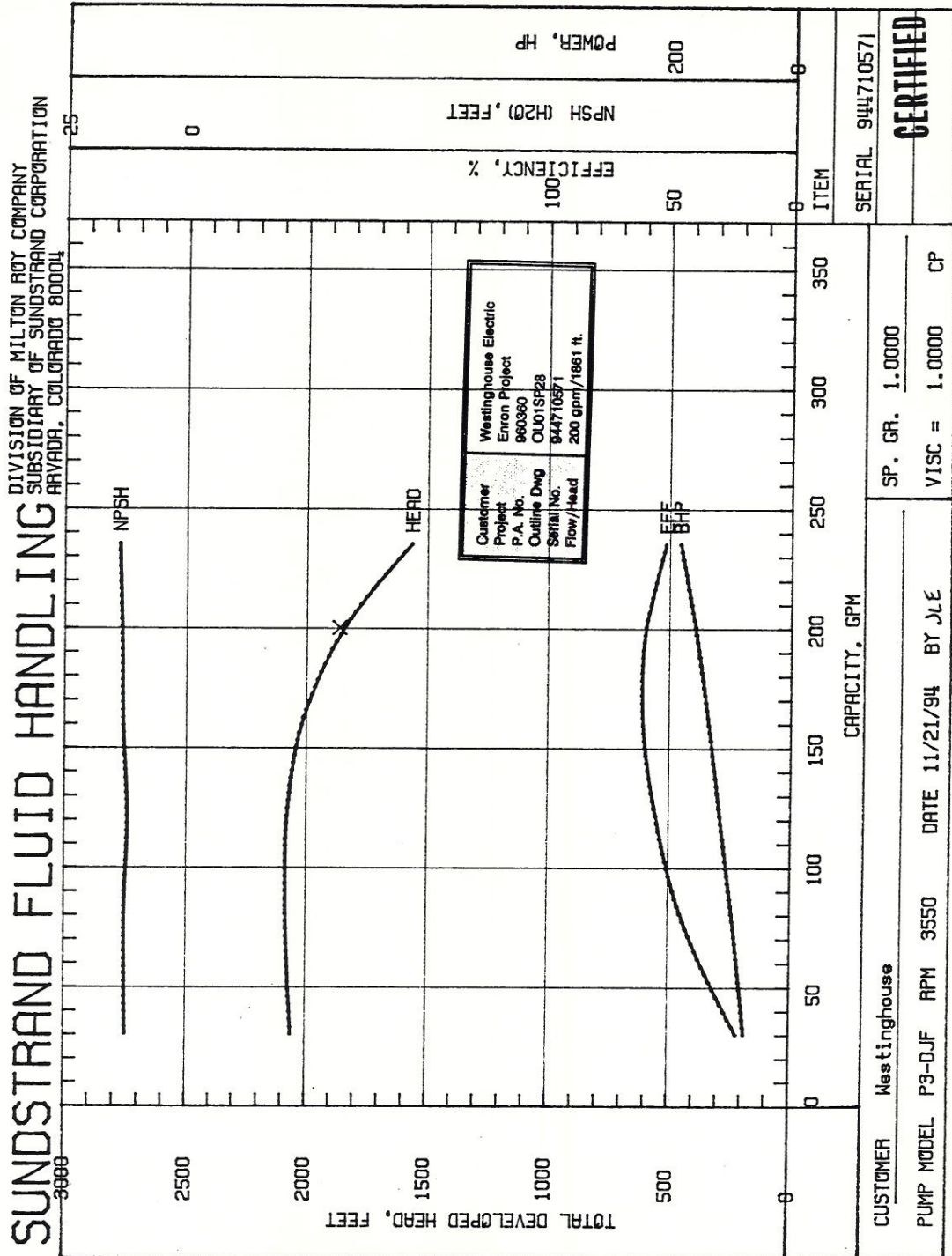


Figura 21. Curva de operación Bomba P-3000. [31]

5.2 Agua desmineralizada

Uno de los principales problemas en el manejo de agua desmineralizada es que luego de tratada es muy propensa a la absorción de contaminantes.

A pesar de que el tratamiento del agua elimina la mayoría de los minerales disueltos, no elimina los gases. El equilibrio dinámico genera una tendencia a la disolución de nitrógeno, oxígeno y dióxido de carbono, que generan ácidos. En el caso del CO₂, una pequeña cantidad de partículas por millón puede llevar a una caída hacia niveles ácidos del pH entre 4 y 5. Dicha solubilidad del CO₂ aumenta considerablemente con la disminución de la temperatura. A 25°C, es de 1,45 g/L, mientras que a 0°C supera los 3 g/L a 0°C. Es por esto que uno de los métodos para mantener los niveles de pH en el agua pura es el aumento de temperatura, llevando incluso hasta el punto de ebullición, con el fin de remover el dióxido de carbono de manera efectiva.

Además, la adición de químicos durante los tratamientos puede aumentar la conductividad por encima del nivel especificado. Una alta conductividad puede ser aceptada siempre y cuando los niveles de pH se mantengan, pero se debe tener en cuenta que una mayor conductividad acelera el proceso de corrosión.

Otro de los parámetros para tener en cuenta es la salinidad y los sólidos disueltos remanentes en el agua. Al igual que en el caso de la conductividad, la cantidad de sólidos disueltos tiene una relación directamente proporcional con la corrosión.

6. Sistema de monitoreo para control y prevención de fallas

6.1 Resultados de análisis causa raíz

6.1.1 Evaluación de Vibraciones

Se evalúan los resultados históricos recopilados durante la medición de vibraciones periódica que se realizan en el marco del plan de mantenimientos predictivos. Registros tomados del colector de vibraciones A-MAQ de segunda generación.

En la representación por gráficas, cada punto de apoyo es medido en los 3 planos y representado con un color:

Puntos en motor: Vertical #1 y 2, Horizontal #1 y 2, Axial #2.

Puntos en bomba: Vertical #3 y 4, Horizontal #3 y 4, Axial #3.

La línea roja representa un nivel de alarma, quiere decir que los parámetros se encuentran en valores críticos.

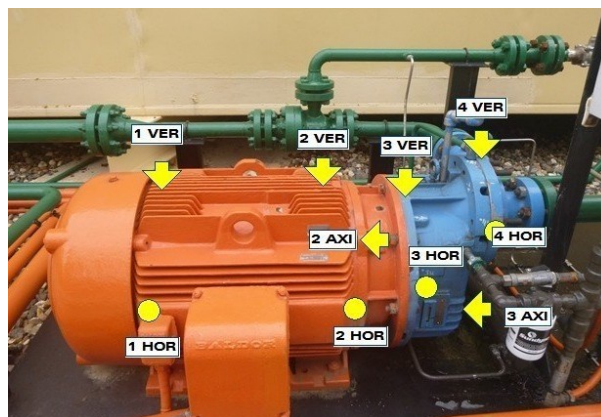


Figura 22. Puntos de medición de vibraciones.
Fuente: Autores

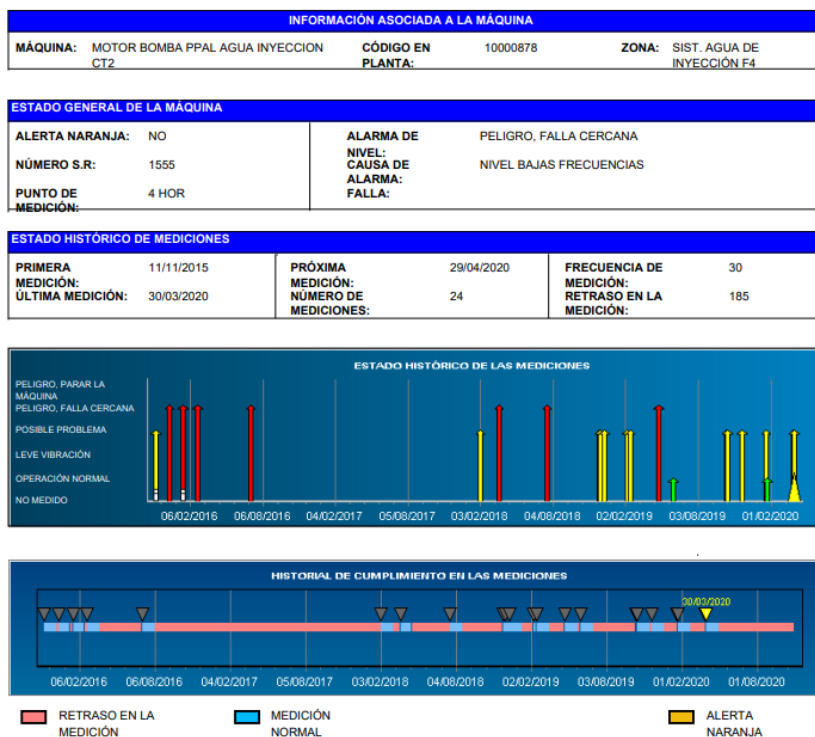


Figura 23. Estado histórico de las mediciones de vibraciones.
Fuente: Autores

En el informe mostrado en la figura 23, se observa de manera global las alarmas arrojadas desde el año 2016 hasta el 2020 por el equipo. Estas reflejan una posible falla cercana en diferentes momentos, sin embargo, la información de este informe no permite determinar el origen de dichas alarmas, es importante mencionar que esta bomba por su configuración de trabajo (sistema de autorecirculación variable permanente) su carga dinámica será siempre cambiante, es decir, sus vibraciones en media frecuencia (turbulencias y cavitaciones) pueden provocar en cualquier momento excitaciones en baja y alta frecuencia. Dicho lo anterior siempre al ver espectros de esta bomba se debe asegurar que este o no relacionadas con la turbulencia provocada por la válvula PID de recirculación.

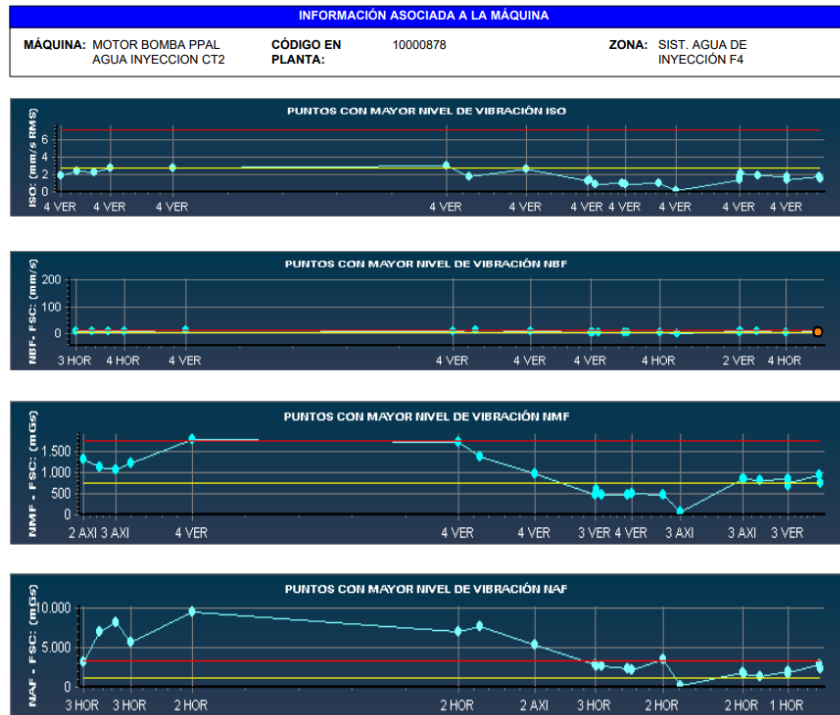


Figura 24. Registro de puntos con mayores niveles de vibración.
Fuente: Autores

En este registro histórico de puntos cuyos valores se destacan por ser los más altos registrados en una línea de tiempo, permite determinar o acercarnos de alguna manera a las causas que ocasionaron las alarmas. Ver figura 24. A tener en cuenta que los valores para NMF (Niveles de media frecuencia) y NAF (Niveles de alta frecuencia) muestran un comportamiento irregular. Este comportamiento es provocado por media frecuencia sin embargo su conclusión no fue fácil realizarla, solo fue posible esta conclusión después que en el 2018 debido a una desafortunada falla catastrófica en el sello mecánico en un arranque (aparentemente misteriosa) el cual provoco la emulsión del aceite cambiando sus propiedades y provocando daños severos en la caja de reductora en cuestión de minutos.

Debido a este daño severo en el equipo este tuvo que ser reemplazado en su totalidad junto con su válvula de autorecirculación PID el cual en este caso la nueva contenía mayor

tecnología y arrojaba mejores prestaciones al sistema, nótese que los niveles de vibraciones una vez puesta en servicio la nueva bomba estas bajaron aproximadamente 50%, lo que permite concluir que la tendencia que venía presentando el equipo si correspondía a un desajuste mecánico la cual se excitaba con facilidad con la turbulencia provocada por el fluido recirculando.

De esta experiencia se concluyó que los daños en los sellos mecánicos de la p-3000 no podían ser anticipados por tendencias de vibraciones de aquí el motivo de este proyecto de grado para poder diagnosticar la verdad de lo sucedido al sello mecánico y poder prevenirlo.

BAJA FRECUENCIA:

Las mediciones de baja frecuencia permiten detectar problemas de alineamiento, balanceo, transmisión o incluso problemas eléctricos. El equipo no presenta valores históricos muy por encima de 2.8 mm/s rms. No se registran problemas asociados.

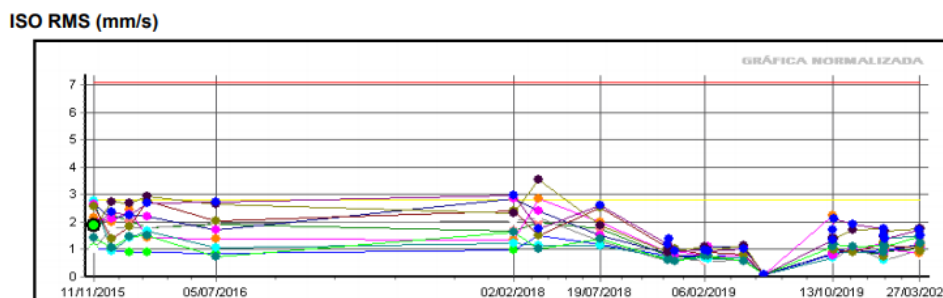


Figura 25. Medición de vibraciones motor bomba agua inyección CT2 - Baja frecuencia.

Fuente: Autores

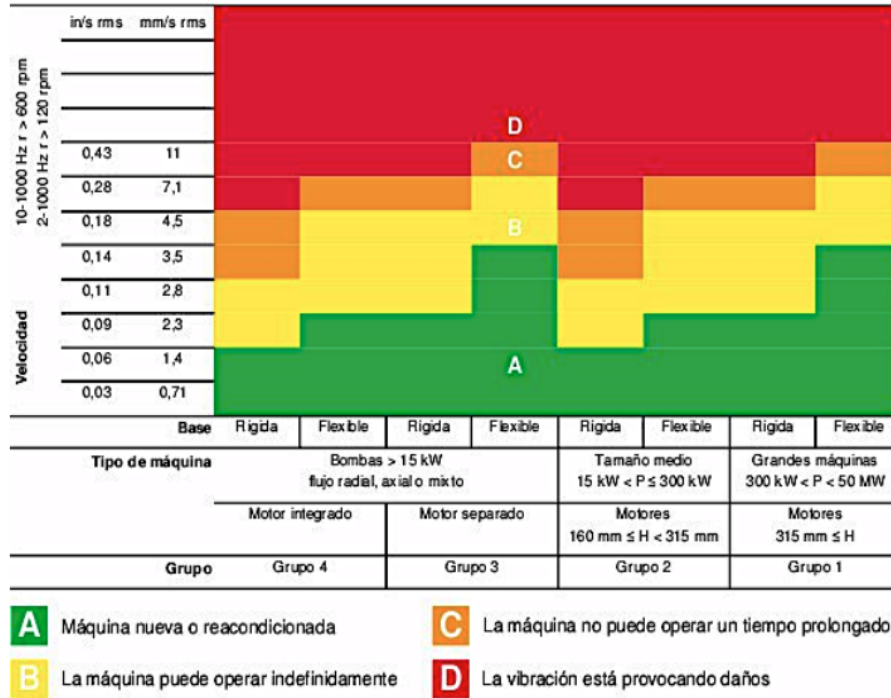


Figura 26. Niveles de vibración aceptables según norma ISO 10816 para equipos pertenecientes a grupo 2. [32]

MEDIA FRECUENCIA:

Las mediciones de media frecuencia permiten detectar problemas de turbulencia, cavitación o desajustes. No se registraron parámetros en niveles críticos. Se considera que, debido a que los eventos presentados por el equipo no son permanentes y los problemas de vibraciones procedían de un desajuste en la bomba, se debe descartar problemas de turbulencia o cavitación en el agua como causal de daños en los sellos a futuro.

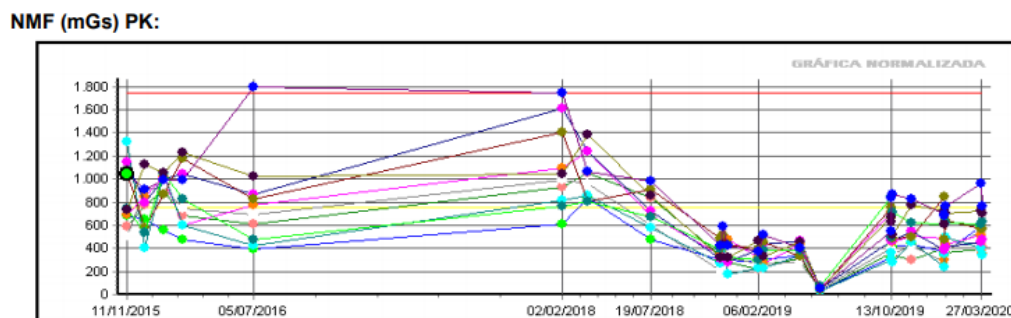


Figura 27. Medición de vibraciones motor bomba agua inyección - Media frecuencia.

Fuente: Autores

Se destaca el punto azul, correspondiente a punto vertical #4 en la bomba, que mantiene un nivel muy alto en vibraciones entre 2016 y 2018, por encima de lo permisible. Dicho periodo concuerda con falla catastrófica presentada por el equipo.

ALTA FRECUENCIA:

Las mediciones de alta frecuencia permiten detectar problemas en rodamientos y engranajes del motor, valores fuera de lo normal pueden indicar también problemas de lubricación. El equipo presentó puntos con comportamientos muy variables, que corresponde a la línea trazada de color gris, sin embargo, a partir del cambio de equipo, la tendencia de vibraciones ha mantenido comportamiento regular para todos los puntos.

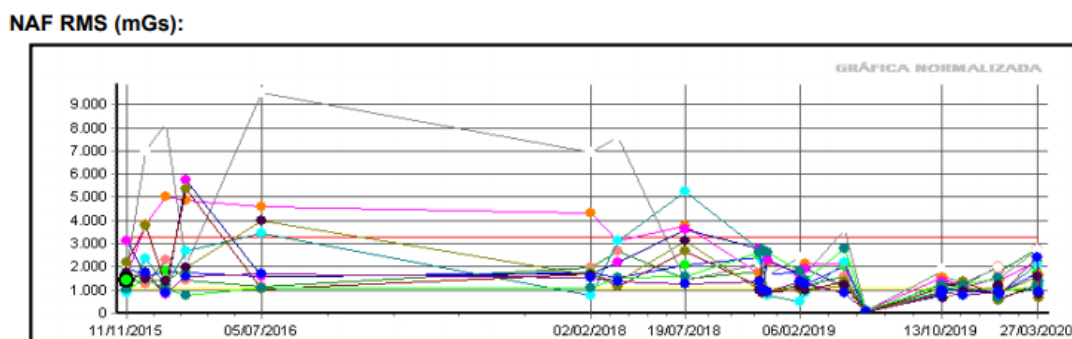


Figura 28. Medición de vibraciones motor bomba agua inyección - Alta frecuencia.

Fuente: Autores

Según lo observado en los registros de vibraciones, se considera que no existe relación de causalidad con los eventos ocurridos. Se presentan algunos picos, sin embargo, estos obedecen a fenómenos presentados por el motor y no por la bomba.

6.1.2 Propiedades del agua (Composición)

Los requerimientos del agua a utilizar en turbina y calderas son establecidos por el fabricante según el tipo de planta y aplicación para la correcta operación del equipo. En las plantas modernas, se debe utilizar agua desmineralizada.

Siemens plantea valores de referencia para el pH entre 6 y 7,5, y para conductividad menor a 0,5 μ S/cm.

Ciudad: Barranquilla - Atlántico

ID Lab	ID de muestra	Tipo de muestra	Lugar de muestreo	Fecha de muestreo	Hora de muestreo
4390-1	AGUA DESMINERALIZADA TK 9	AGUA DESMINERALIZADA	SIN REGISTRO	SIN REGISTRO	SIN REGISTRO
4390-2	AGUA SALIDA LECHO MIXTO 2 B		SIN REGISTRO	SIN REGISTRO	SIN REGISTRO

Plan de muestreo:	Muestras entregadas por el cliente	Fecha de recepción:	2020-08-12	Inicio de ensayos:	2020-08-12	Finalización de ensayos:	2020-09-03
Proc. de muestreo:	No aplica	Fecha de reporte de informe de ensayos:	2020-09-09				

ENSAYO	MÉTODO DE REFERENCIA	UNIDAD	VALOR DE REFERENCIA	LDM	LCM	RESULTADOS	
						4390-1	4390-2
pH	SM 4500-H ⁺ B / Electrométrico	U de pH	6 - 7,5	No aplica	No aplica	7,42	7,15
Conductividad	SM 2510 B / Electrométrico	μ S/cm	> 0,5	No aplica	No aplica	0,30	0,45
Sólidos Disueltos Totales	SM 2540 C / Gravimétrico - Secado a 180°C	mg/L	> 1	1	25,0	0,8	1,0
Dureza Total	SM 2340 C / Volumétrico con EDTA	mg CaCO ₃ /L	No aplica	No aplica	10,00	0,1	0,5
Dureza Cálcica	SM 3500-Ca B / Volumétrico con EDTA	mg CaCO ₃ /L	0,4	0,4	10,00	0,0	0,1
Calcio Total	SM 3500-Ca B / Volumétrico con EDTA	mg Ca/L	-	No aplica	4,00	0,1	0,3
Magnesio Total	SM 3500-Mg B / Cálculo	mg Mg/L	-	No aplica	6,00	0,1	0,12
Alcalinidad Total	SM 2320 B / Volumétrico	mg CaCO ₃ /L	-	No aplica	6,00	0,3	0,5
Cloruros	SM 4500-Cl ⁻ B / Argentométrico	mg Cl ⁻ /L	0,25	0,25	3,00	0,1	0,21
Sulfatos	SM 4500-SO ₄ ²⁻ E / Turbidimétrico	mg SO ₄ /L	-	No aplica	10,00	0,1	0,1
⁵⁷ Hierro Total	Spectroquant Merck test Hierro 114761/ Fotométrico	mg/L	0,01	0,001	0,005	0,01	0,01
⁶³ Cobre Total	EPA 200.8: Determination of Trace Elements in Wastes by Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry. Rev. 5.4. 1994	mg/L	0,01	No aplica	0,0030	0,01	0,01
²³ Sodio Total		mg/L	0,02	0,02	0,1500	0,01	0,02
³⁹ Potasio Total		mg/L	0,02	0,02	0,1500	0,01	0,02

LDM: Límite de detección del método; es la menor cantidad del mensurando que puede ser detectada en la matriz sujeta a ensayo.

LCM: Límite de cuantificación del método; es la menor cantidad a partir de la cual se puede determinar el mensurando con exactitud y precisión aceptadas bajo las condiciones del laboratorio, en la matriz sujeta a ensayo.

⁵⁷ Ensayo subcontratado no acreditado

Figura 29. Análisis de condiciones de agua desmineralizada, septiembre de 2020.

Fuente: Autores

En el mes de septiembre se realiza muestreo de condiciones de agua en la salida de los lechos mixtos y en el tanque de almacenamiento no. 9. Ver figura 24.

Los resultados arrojan que tanto en la salida de planta de agua, como en el tanque 9, los valores se encuentran dentro del rango permitido.

Se decide evaluar las condiciones del fluido en puntos posteriores del sistema, seleccionando puntos de referencia en las bombas que intervienen en el transporte del agua.

Una primera muestra es tomada en la succión de la bomba suministro de agua inyección CT2, en la salida del TK9, encontrando valores de pH de 6,9 y conductividad 1,1 μ S/cm.



Figura 30. Toma de muestra no. 1. Succión bomba suministro agua inyección CT2.
Fuente: Autores

Para este, el valor del pH se mantiene en rango aceptable, considerándose aun neutro, sin embargo, la conductividad ha aumentado sobrepasando el límite establecido.

Una segunda muestra es tomada en la succión de la bomba de agua inyección, con 7 días de no operación. Se encuentra un pH de 4,574 y conductividad de 7,7 μ S/cm.



Figura 31. Resultado de análisis muestra no. 2. Bomba agua inyección CT2.

Fuente: Autores

Se consideran los valores muy por encima del nivel permisible. El pH entra en rango de valores ácidos y la conductividad se encuentra totalmente desfasada.

Se destaca también el hallazgo del nivel de sílice, SiO_2 cercano a 9ppb. Siendo 10 ppb el máximo, se considera que se encuentra en nivel crítico. La sílice, como compuesto en estado sólido, generalmente encontrada de geometría amorfa, es utilizada usualmente como medio filtrante en el tratamiento de aguas, sin embargo, puede disolverse o quedar en suspensión. Como muestra la figura 31, dicha solubilidad es función de la temperatura y el pH del agua, siendo su relación con ambos parámetros directamente proporcional.

[33]

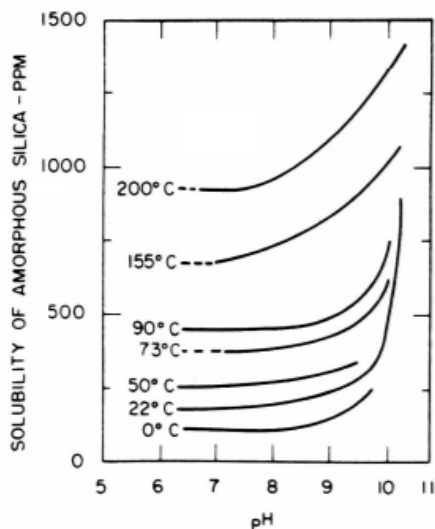


Figura 32. Solubilidad de sílice amorfa vs pH para diferentes temperaturas. [33]

La disminución significativa del pH provoca la precipitación de partículas capaces de atacar las paredes internas de la tubería y los componentes del sistema con el que interactúa. **Por las características de los deterioros encontrados en las caras de los sellos, la incrustación o impacto de estas partículas sobre el material es la principal razón de falla.**

Debido a que son condiciones que, si bien no son permanentes, son repetitivas, se considera como causal principal la permanencia en reposo de los fluidos dentro de las tuberías de transporte.

Se debe tener en cuenta que, para el presente año 2020, no se han presentado fallas en los sellos mecánicos del equipo a pesar de su uso excesivo, contrario al periodo 2016-2018, en el que la generación de energía era muy fluctuante. Lo anterior reafirma que, con una reducción de tiempos de permanencia estática del fluido en las tuberías, las probabilidades de sufrir efectos nocivos para la vida útil de los sellos mecánicos por las causales estudiadas con anterioridad tienden a cero.

6.2 Propuesta de solución

Como se evidenció en la sección anterior, la causa de la falla de los sellos mecánicos se debe a la composición del agua y los abrasivos que esta conduce cuando el sistema inicia operación posterior a una parada. Para poder mitigar el asunto, se propone:

1. Evaluación de los estados de los filtros previamente al arranque del sistema.

Es posible que los filtros en la succión se encuentren ya en mal estado o no son lo suficientemente capaces de filtrar todos los sólidos que pueda conducir el agua, deteriorando las caras de los sellos mecánicos.

2. Instalación de medidores TDS y pH en la succión del sistema de bombeo. Estos medidores permiten visualizar la cantidad de TDS (Total de sólidos disueltos) en el agua y el pH. Es importante la medición de estas variables para evitar sólidos abrasivos que desgasten innecesariamente a los sellos y el nivel de acidez del agua, capaz de afectar las paredes de las tuberías, deteriorándolas y llevando sólidos de las mismas al interior de la bomba. Al reconocer estos valores, se plantean acciones correctivas desde el área de la química y mecánica que permita mantener el agua en condiciones deseadas y evitar daños prematuros en los sellos.

Se propone una modificación en la succión de tal manera como que el sistema en la succión quede de la siguiente manera:

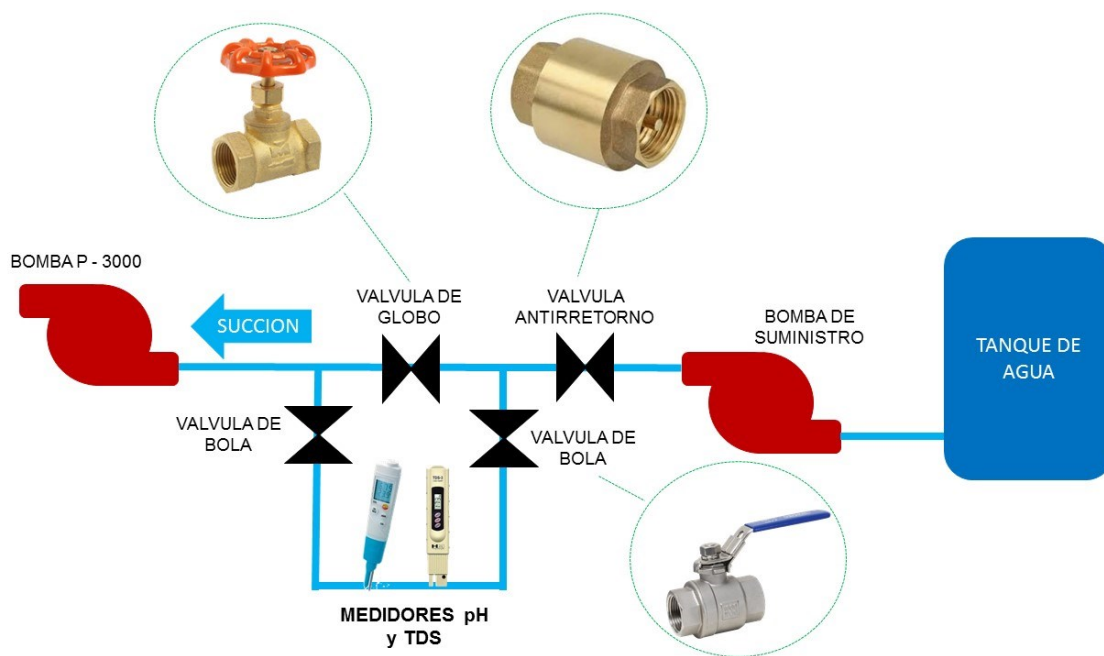


Figura 33. Esquema de instalación hidráulica para la medición de pH y TDS del agua en la succión de la bomba P-3000

Fuente: Autores

Consiste en crear un Bypass a la descarga de la bomba suministro. Para la medición de pH y TDS, previo al funcionamiento de la bomba P-3000 para el proceso de inyección de agua, se activa la bomba suministro por pocos segundos y se cierra la válvula de globo, se abre la válvula de bola del ingreso del bypass (Lado derecho) y se mantiene cerrada la válvula de bola de la salida (Lado izquierdo), se apaga la bomba suministro y se toman las lecturas de pH y TDS. Posterior a esto se cierran ambas válvulas de bola y se abre la válvula de globo. Una vez se tomen las medidas correctivas en el fluido, se arrancan las bombas de manera habitual. Un tapón en la zona inferior o de estanque permite la evacuación del fluido cuanto sea necesario posterior a la medición de pH y TDS. La válvula antirretorno funciona como elemento de seguridad, evitando el regreso del fluido a la bomba suministro causando daños. Es importante medir la presión a la descarga de bomba suministro para evitar daños por sobrepresión.

7. Manual de mantenimiento para sistema de bombeo de agua inyección para turbina CT2

7.1 Revisión del sistema

Como los antecedentes evidencian, los problemas que afectan los sellos mecánicos de la bomba P-3000 surgen posterior a un tiempo prolongado de reposo del agua en la tubería, por lo que antes de iniciar la operación, se recomienda realizar una inspección general sobre los elementos de todo el sistema:

- Estado de tuberías
- Estado de filtros
- Funcionamiento de válvulas
- Lubricación de equipos
- Nivel adecuado de agua en el tanque
- Funcionamiento de la bomba suministro
- Estado de sello mecánico de bomba P-3000 (Si es posible)

Además, se deben verificar los siguientes parámetros:

- Condiciones de operación de bombas
- Historial de operación del sistema
- Historial de mantenimiento de bombas
- Horas de trabajo de sellos mecánicos instalados.

7.2 Operación

1. Verifique la calibración de los instrumentos de medición de pH y TDS ubicados en el bypass a la descarga de la bomba suministro. El procedimiento de calibración de estos instrumentos lo determina el fabricante de los mismos.
2. Realice la medición de pH y TDS del agua de trabajo por lo menos 5 veces; los valores suministrados por los instrumentos le permitirán saber si hay que tomar medidas correctivas (verter químicos sobre el agua, cambio de filtros, etc). Tenga en cuenta que puede generarse sobrepresión en el sistema, por lo que se recomienda estar atento a la presión a la descarga de la bomba suministro
3. Una vez el fluido de trabajo se encuentre en óptimas condiciones, se inicia el sistema de agua inyección de manera habitual (las válvulas de bola del bypass totalmente cerradas). Antes de iniciar con la operación del sistema sobre la turbina correspondiente, verificar las presiones y el caudal del fluido a atomizar en cámara de combustión para asegurar el funcionamiento.
4. Inspeccione los niveles de vibración y ruido sobre el sistema. Estas dos variables son las principales señales de efectos por cavitación en las bombas. Los sensores implementados en el sistema le permitirán identificar si hay variaciones con respecto al último funcionamiento del mismo, lo que le indica tomar acciones correctivas.
5. Realice el mismo proceso cada vez que sea necesario o cada vez que el agua se mantenga en reposo. Tenga en cuenta la vida útil de los sellos mecánicos.
6. Verifique la calidad del agua a la descarga de los inyectores en cámara de combustión. Recuerde que el propósito del sistema de agua inyección es la reducción de NOx, por lo que la calidad del agua debe estar en óptimas condiciones.

8. Conclusiones y recomendaciones

8.1 Conclusiones

- ✓ Se determinó que la causa del deterioro prematuro y constante de los sellos mecánicos está relacionada a las propiedades que adquiere el agua tras mantenerse en reposo por periodos de tiempo prolongados, puntualmente el nivel de acidez y los sólidos totales disueltos.
- ✓ Se propuso la implementación de un sistema para la medición de los parámetros pH y TDS como solución que permiten tomar acciones correctivas a tiempo. Esto ayudará a mantener el sello mecánico en óptimas condiciones y alargando su vida útil.
- ✓ Se estableció un plan de mantenimiento y monitoreo para el sistema de tuberías y agua inyección lo que permite estar al tanto del funcionamiento del sistema en general y aplicando acciones correctivas y preventivas según sea necesario.

8.2 Recomendaciones

Se recomienda a operación como medida prioritaria la apertura de venteos en la línea de succión de la bomba principal agua inyección. Como también la evacuación de aguas estancadas para el desecho de aguas acidificadas.

9. Bibliografía

- [1] Y. Y. L. C. Aiguo Liu, «Experimental study of biogas combustion and emissions for a micro gas,» *FUEL*, p. 267, 2020.
- [2] T. H. D. B. Mario Ditaranto, «Concept of hydrogen fired gas turbine cycle with exhaust gas,» *ENERGY*, nº 116646, p. 192, 2020.
- [3] S. A. F. E. H. Betelmal, «Energy and Exergy Analysis of a Simple Gas Turbine Cycle with Wet Compression,» *Canadian Center of Science and Education*, vol. 8 , nº 1, 2018.
- [4] M. M. M. S. N. A. Mojtaba Tahani, «Optimization of wet compression effect on the performance of V94.2 gas Turbine,» *Applied Thermal Engineering* , nº 143, pp. 955-963, 2018.
- [5] E. H. E. A. A. Farokhipour, «A numerical study of NOx reduction by water spray injection in gas turbine combustion chambers,» *FUEL*, nº 212, pp. 173-186, 2018.
- [6] S. M. A. R. P. P. Munyensanga, «Information management to improve the effectiveness of preventive maintenance activities with computerized maintenance management system at the intake system of circulating water pump,» *PROCEDIA CIRP*, nº 78, pp. 289-294, 2018.
- [7] M. M. S. S. P. M. D.V.V. Kallo, «Impact of Design Parameters on the Performance of Centrifugal Pumps,» *Procedia Manufacturing*, nº 35, pp. 197-206, 2019.
- [8] J. C. Regil Gonzalez, *Factibilidad de sustitución de un equipo de bombeo con sello mecánico por un equipo tipo seal-less*, Universidad Nacional Autonoma de Mexico, 2012.
- [9] M. C. Aliendres, *ANÁLISIS DE FALLAS DE LOS SELLOS MECÁNICOS EN LAS BOMBAS DE PROCESO DE UNA PLANTA CERVECERA*, Barcelona: UNIVERSIDAD DE ORIENTE, 2009.
- [10] A. C. Marcelo Baque, *CREACIÓN DE UNA UNIDAD DE NEGOCIOS DE EQUIPOS DE*, Guayaquil Ecuador: Universidad Catolica de Santiago de Guayaquil, 2014.
- [11] I. T. A. D. Molina, «PREDICTIVA 21,» [En línea]. Available: <https://predictiva21.com/analisis-causa-raiz-aplicado-fallas-sellos-mecanicos-bombas/>. [Último acceso: 10 08 2020].

- [12] CELSIA, «CELSIA EMPRESA DE ENERGIA DE GRUPO ARGOS,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.celsia.com/es/nuestra-empresa/sobre-nosotros>. [Último acceso: 08 2020].
- [13] R. d. Colombia, «Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial RESOLUCIÓN (909),» 05 Junio 2008. [En línea]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/f0-Resoluci%C3%B3n%20909%20de%202008%20-%20Normas%20y%20estandares%20de%20emisi%C3%B3n%20Fuentes%20fijas.pdf>. [Último acceso: 20 08 2020].
- [14] J. Rosero, L. Garza, L. Minchala, D. Pozo y L. Morales, «Fuentes de Generación de Energía Eléctrica Convencional y renovable a nivel mundial,» *Revista Politécnica*, vol. 32, nº 2, pp. 1-13, 2013.
- [15] EIA, «International Energy Outlook 2019,» 24 September 2019. [En línea]. Available: www.eia.gov/ieo. [Último acceso: Septiembre 2020].
- [16] CELSIA, «Sistema Interconectado Nacional,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.celsia.com/Portals/0/Documentos/Documento%20de%20trabajo%20sobre%20el%20Sistema%20Interconectado%20Nacional.pdf>. [Último acceso: Septiembre 2020].
- [17] V. Analitik, «Plantas térmicas en Colombia aportaron 33 % de generación eléctrica en primer semestre de 2020,» 13 Julio 2020. [En línea]. Available: <https://www.valoraanalitik.com/2020/07/13/plantas-t-rmicas-en-colombia-aportaron-33-de-generaci-n-el-ctrica-en-primer-semester-de-2020/>. [Último acceso: Septiembre 2020].
- [18] D. J. Mackinnon, «Nitric oxide formation at high temperature,» *Air Pollution Control Association*, vol. 24, nº 3, pp. 237-239, 1974.
- [19] M. J. Moore, «Nox emission control in gas turbines for combined cycle gas turbine plant,» *IMechE*, vol. 211, nº 1, pp. 43-52, 1997.
- [20] G. Jarquin, G. Polupan, J. Jimenez y Y. Pysmenny, «Metodología de cálculo de NOx en generadores de vapor que queman gas natural,» *Científica*, vol. 15, nº 2, pp. 93-100, 2011.
- [21] Siemens Westinghouse Power Corporation, «SIEMENS WESTINGHOUSE ADVANCED TURBINE,» de *ASME TURBO EXPO 2002*, Amsterdam, The Netherlands, 2002.

-
- [22] Westinghouse Electric Corporation, *THE EFFECT OF WATER INJECTION FOR EMISSIONS CONTROL ON INDUSTRIAL GAS TURBINE COMBUSTORS*, New York: ASME, 1984.
- [23] C. Mataix, «Mecánica de Fluidos y maquinas hidraulicas,» de *Mecánica de Fluidos y maquinas hidraulicas*, Madrid, Ediciones del Castillo S.A, 1986, p. 355.
- [24] P. GROSCLAUDE, «GROSCLAUDE,» [En línea]. Available: <https://www.pompes-grosclaude.com/pompes/bombas-centrifugas-normalizadas-alfa/>. [Último acceso: 16 09 2020].
- [25] P. Electromecanico, «Portal Electromecanico,» [En línea]. Available: http://www.portalelectromecanico.org/CURSOS/BombasHidraulicas/partes_de_una_bomba_centrifuga.html#. [Último acceso: 20 09 2020].
- [26] J. G. Sellados, «TecnoPeg Juan Gomez Sellados,» [En línea]. Available: http://www.portalelectromecanico.org/CURSOS/BombasHidraulicas/partes_de_una_bomba_centrifuga.html#. [Último acceso: 08 09 2020].
- [27] G. D. Bombas, «Guia de Bombas,» [En línea]. Available: <https://guiadebombas.com/tipos-y-materiales-de-sellos-mecanicos/>. [Último acceso: 11 09 2020].
- [28] Pricast, «Canales Sectoriales Interempresas,» 07 10 2009. [En línea]. Available: https://www.interempresas.net/Componentes_Mecanicos/Articulos/34521-Cavitacion-en-el-bombeo-de-fluidos.html. [Último acceso: 20 09 2020].
- [29] B. Ideal, Datos Tecnicos de Hidraulica: BOMBAS, VALENCIA: Bombas Ideal S.A.
- [30] Osmosistem, «Filtros multimedia,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.osmosistemperu.com/filtros-multimedias/>. [Último acceso: Octubre 2020].
- [31] S. F. HANDLING, «SUNFLO PUMP SPECIFICATION,» de *Water Injection Pump*, 1994.
- [32] «ISO 10816-6. Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts.,» 1995.
- [33] A. Ayral, A. Julbe, S. Roualdes, V. Rouessac, J. Durand y B. Sala, «Silica membranes. Basic principles.,» *PERIODICA POLYTECHNICA SER. CHEM. ENG*, vol. 50, nº 1, pp. 67-79, 2006.