ELABORAR UN MODELO DE GESTIÓN DE CONFIABILIDAD EN MANTENIMIENTO BASADO EN SUPERVISIÓN AUTOMÁTICA Y CONTROL OPERATIVO PARA BOMBAS CENTRÍFUGAS DE LAS PLANTAS DE HIDROTRATAMIENDO DE LA GRB

WILLIAN VARGAS SILVA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
PROGRAMA DE POSGRADOS
BUCARAMANGA
2017

ELABORAR UN MODELO DE GESTIÓN DE CONFIABILIDAD EN MANTENIMIENTO BASADO EN SUPERVISIÓN AUTOMÁTICA Y CONTROL OPERATIVO PARA BOMBAS CENTRÍFUGAS DE LAS PLANTAS DE HIDROTRATAMIENDO DE LA GRB

WILLIAN VARGAS SILVA

Trabajo de grado para optar el título de Magíster en Gerencia de Mantenimiento

Director: CARLOS BORRÁS PINILLA, Ph.D.,M.Sc.
Ingeniero Mecánico.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
PROGRAMA DE POSGRADOS
BUCARAMANGA
2017

DEDICATORIA

A Dios, Padre creador, quien hace posible lo imposible para el hombre, quien cumple los sueños de los corazones que aman, quien cada día me da nuevas fuerzas para llegar a la meta y cumplir el propósito de mi vida: llevar felicidad a todos los que me rodean.

A mi esposa, que amo con todas mis fuerzas porque cada día me anima en medio de las dificultades, me da esperanza y reconforta mi vida. Ella me lleva a un futuro donde todo tiene color, donde los sueños se cumplen, donde todo tiene un sentido.

A mis hijos, quienes día a día me trasmiten amor con su particular forma de llamar la atención, los que dicen te amo, los que me enseñan a disfrutar esos momentos especiales de la vida que siempre quedan en la mente y el corazón.

A mis padres y hermanos, quienes con mucho esfuerzo me ayudaron para que hoy, este sueño, sea una realidad.

A mis amigos de historias y consejos: Jorge Riveros, Myriam Moreno, Camilo García, Olmar Ayala, Harbin moreno, Vivian Muñoz, Nina Pacheco, Edwin Severo, Damaris Riveros, Laidi Pérez, Elvis Mendoza, Marylena Muñoz, Alby Zulay Vargas, Sandra Vargas, Elena Vargas, Silvia Garcés, Viviana Quezada, Oscar Suarez, Luz Marina Herrera, Samuel Ruge; todos ellos que me hicieron reír y me dieron la mano cuando más necesitaba.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis sinceros y profundos agradecimientos a:

A Dios por darme la vida, al hacer que los sueños se hagan realidad.

A mi esposa, quien siempre me alienta a seguir soñando.

A mis hijos, Juan David, Isabel, Santiago, que son mi más grande motivación para ser cada día mejor padre, amigo y profesional.

A mis padres, que han sido un apoyo incondicional en este camino.

A los docentes Carlos Borras Pinilla y Edwin Ferney Quintero Rangel, por sus excelentes aportes en el desarrollo de este proyecto.

A los ingenieros Iván Mocada Montoya y Jesús David Cubillos, por su colaboración y constante disposición.

A Ecopetrol S.A por la importante ayuda académica que me han brindado al otorgarme una beca para continuar con mi crecimiento profesional.

A la Universidad Industrial de Santander y a sus docentes, por el conocimiento brindado durante mis estudios de maestría.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN **15**

1 GENERALIDADES DEL PROYECTO **17**
1.1 CONTEXTO 17
1.1.1 Generación de hidrógeno 18
1.1.2 Propósito del proceso 19
1.1.3 Propósito del proceso U4700. 21
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 22
1.3 JUSTIFICACIÓN 23
1.4 OBJETIVOS 23
1.4.1 Objetivo general 23
1.4.2 Objetivos específicos 23

2 MARCO REFERENCIAL **25**
2.1 MARCO TEÓRICO 25
2.2 MARCO CONCEPTUAL 27
2.2.1 Bombas centrífugas 27
2.2.2 Frecuencia de mantenimiento 34
2.3 MARCO LEGAL 35
2.4 MARCO REFERENCIAL REDES NEURONALES 37
2.4.1 Red neuronal artificial 37
2.4.2 Red neuronal dinámica 37
2.4.3 Alternativas de red neuronal para el modelo de gestión de confiabilidad en mantenimiento 38

3 ESTANDARIZACIÓN DE LOS FACTORES **40**
3.1 CABEZA NETA DE SUCCIÓN REQUERIDA (NPSHR) 41

3.1.1 Energía de succión baja . . . 43
3.1.2 Energía de succión alta . . . 44
3.1.3 Energía de succión muy alta . . . 44
3.2 CONTAMINANTES EN LA LUBRICACIÓN . . . 51
3.2.1 Película lubricante . . . 51
3.2.2 Control de desgaste en los mecanismos lubricados . . . 52
3.3 CORROSIÓN EN BOMBAS . . . 62
3.3.1 Corrosión con erosión . . . 63
3.3.2 Corrosión localizada por picadura . . . 63
3.3.3 Corrosión localizada en rendijas . . . 63
3.3.4 Corrosión con agrietamiento . . . 63
3.3.5 Corrosión con cavitación . . . 64
3.4 TEMPERATURA CAJA DE RODAMIENTOS Y CHUMACERAS . . . 65
3.5 DESVIACIÓN DEL FLUJO . . . 68
3.6 PUNTO DE MEJOR EFICIENCIA (BEP) . . . 68
3.7 PARÁMETROS DE VIBRACIÓN . . . 72
3.7.1 Monitoreo de vibraciones y señales de muy alta frecuencia . . . 72
3.7.2 Predicción de fallas . . . 73

4 DESARROLLO DEL MODELO EN MATLAB 78
4.1 RED NEURONAL FEED-FORWARD . . . 78
4.1.1 Descripción código de Matlab - Feedforward . . . 78
4.2 RED NEURONAL NARX . . . 79
4.2.1 Descripción código de Matlab - red Narx . . . 80
4.3 RED NEURONAL RECURRENTE (LAYER RECURRENT NETWORK) . . . 81
4.4 RED NEURONAL BASADA EN RETARDOS DE TIEMPO . . . 81
4.5 ENTRENAMIENTO DE LAS REDES NEURONALES . . . 82
4.5.1 Entrenamiento red neuronal Feedforward . . . 83
4.5.2 Entrenamiento red neuronal Narx . . . 83
4.6 VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS MODELOS . . . 85
4.6.1 Validación red neuronal Feedforward . . . 87
4.6.2 Validación red neuronal Narx . . . 87
4.6.3 Validación de las otras redes neuronales . . . 90

5 PLAN DE MANTENIMIENTO **91**

6 CONCLUSIONES **99**

BIBLIOGRAFÍA **101**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama en bloques de la planta de HDT. 18
Figura 2 Diagrama de bloques de la unidad de generación de H2. 19
Figura 3 Planta Hidrotratamiento de gasolina. 20
Figura 4 Diagrama simplificado de control de la unidad de generación de H2 y Diésel. 21
Figura 5 Planta hidrotratamiento diésel U4700. 22

Figura 6 Partes de la bomba centrífuga. 28
Figura 7 Flujo mínimo según su NSS. 30
Figura 8 Bombas centrífugas en paralelo. 31
Figura 9 Red neuronal Feedforward. 38
Figura 10 Red neuronal basada en retardos de tiempo. 39
Figura 11 Red neuronal Narx. 39

Figura 12 Diferencia entre las márgenes mínimas de NPSHD y NPSHR. 42
Figura 13 Comparación de daño por caída de 3 % del NPSHR. 42
Figura 14 Parámetros de energía de succión. 43
Figura 15 Factor de confiabilidad de la energía de succión. 45
Figura 16 Margen de confiabilidad NPSH. 46
Figura 17 Tendencia de presión succión SP4703. 47
Figura 18 Factores de fricción para tubería de acero. 48
Figura 19 Factor K para válvulas y accesorios. 49
Figura 20 Pérdidas por accesorios sistema de succión de cada bomba. 49
Figura 21 Cálculo pérdidas por velocidad. 50

Figura 22 Película de lubricante. 51
Figura 23 Curva de vida confiable. 52
Figura 24 Afectación de la humedad en los rodamientos. 54
Figura 25 Relación de la viscosidad con la temperatura. 55
Figura 26 Influencia de las partículas en el lubricante. 56
Figura 27 Resultados de análisis de muestras de aceite de equipos rotativos. . . 58
Figura 28 Registro de contaminantes en el aceite lubricante de las bombas de HDT. 59
Figura 29 Viscosidad Requerida. 60
Figura 30 Viscosidad Operativa. 61
Figura 31 Curva de vida positiva. 62
Figura 32 Curva de vida negativa. 62
Figura 33 Valores promedio anual de velocidad de corrosión en mpy. 66
Figura 34 Vida disponible en un rodamiento Vs temperatura operación. 67
Figura 35 Estandarización factor temperatura caja de rodamiento y chumacera. 68
Figura 36 Relación entre cargas radiales y flujo. 69
Figura 37 Factores impactan la confiabilidad de la bomba. 70
Figura 38 Prueba de variación de flujo bomba SP4705B. 71
Figura 39 Espectro punto PCH de la SP4705. 71
Figura 40 Parámetros de severidad de vibración norma API 610. 76
Figura 41 Rangos de severidad para bombas centrifugas. 77

Figura 42 Arquintetura de la red neuronal Feed-Forward. 78
Figura 43 Arquintetura de la red neuronal Narx. 80
Figura 44 Arquintetura de la red neuronal recurrente. 81
Figura 45 Arquintetura de la red neuronal basada en retardos de tiempo. 82
Figura 46 Evolucion del entrenamiento red Feed-Forward. 83
Figura 47 Error de entrenamiento de la red neuronal Feed-Forward. 84
Figura 48 Evolución del error cuadrático durante entrenamiento red Feed-Forward. 84
Figura 49 Gradiente y validación red Feed-Forward. 85
Figura 50 Evolucion del entrenamiento red neuronal Narx. 85
Figura 51 Error de entrenamiento de la red neuronal Narx. 86
Figura 52 Gradiente y validación red Narx. 86
Figura 53 Comportamiento de vida útil remanente para bomba de prueba - Feed-forward. 88

Figura 54 Respuesta Command Window para bomba de prueba. 88
Figura 55 Comportamiento de vida útil remanente para red Narx. 89
Figura 56 Respuesta Command Window para red Narx. 90

Figura 57 Vida restante bomba SP4759A. 92
Figura 58 Vida restante bomba SP4714A. 92
Figura 59 Vida restante bomba SP4701A. 93
Figura 60 Vida restante bomba SP4704A. 93
Figura 61 Vida restante bomba SP4705A. 94
Figura 62 Vida restante bomba SP4703A. 94
Figura 63 Vida restante bomba SP4756A. 95
Figura 64 Vida restante bomba SP4754A. 95
Figura 65 Vida restante bomba SP4753A. 96
Figura 66 Vida restante bomba SP4752A. 97
Figura 67 Vida restante bomba SP4755A. 97
Figura 68 Vida restante bomba SP4651A. 98
Figura 69 Vida restante bomba SP4751A. 98

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Lista de escritos que tienen relación con la cavitación. 26
Tabla 2 Normas de severidad de vibración de máquinas. 36

Tabla 3 Resultados Energía de succión bombas HDT. 46
Tabla 4 Factores de seguridad referente al NPSHA. 47
Tabla 5 Parámetros de control de los contaminantes en el lubricante de los mecanismos. 57
Tabla 6 Guias y ventanas para control de corrosion. 64
Tabla 7 Factor de velocidad de corrosión. 65
Tabla 8 Parámetros de desviación de flujo. 69
Tabla 9 Rangos de Punto de mejor eficiencia (BEP). 72

Tabla 10 Estándares de vibración. 76

Tabla 11 Base de datos de prueba Feedforward. 87

Tabla 12 Base de datos de prueba para Narx. 89

RESUMEN

TÍTULO: ELABORAR UN MODELO DE GESTIÓN DE CONFIABILIDAD EN MANTENIMIENTO BASADO EN SUPERVISIÓN AUTOMÁTICA Y CONTROL OPERATIVO PARA BOMBAS CENTRÍFUGAS DE LAS PLANTAS DE HIDROTRATAMIENDO DE LA GRB*.

AUTOR: WILLIAN VARGAS SILVA**.

PALABRAS CLAVES: Red neuronal, equipos rotativos, predictivo.

DESCRIPCIÓN: El presente trabajo se basa en la creación de un modelo de mantenimiento predictivo confiable aplicado a bombas centrífugas, diferente a los que se aplican en el sector Oíl & Gas. Este, es un modelo que calcula la vida remanente de equipos rotativos. Con este trabajo se busca reducir el tiempo muerto del equipo y maximizar la vida activa del mismo, logrando menores costos del ciclo de vida. Para el desarrollo del modelo se recopiló una base de datos (seis años) de trece bombas centrífugas (operacionalmente activas) de las plantas de hidrotratamiento de combustible de la refinería de Barrancabermeja, las cuales tuvieron fallas solo por desgaste natural de acuerdo a sus condiciones operacionales. Se utilizó la librería de redes neuronales del programa Matlab para crear 4 modelos de predicción de vida remanente de las bombas, utilizando las siguientes arquitecturas: Feed-forward, Nonlinear AutoRegressive model with eXogenous input NARX, Red neuronal recurrente y Red basada en retardos de tiempo. Se evaluaron las cuatro opciones y finalmente se seleccionó la red neuronal Feedforward como la más precisa y confiable para el modelo. Con lo anterior se logró crear un nuevo modelo innovador de mantenimiento, donde se asocian todas las variables operacionales del equipo, con resultados que aumentan la vida útil de las bombas.

*Trabajo de grado.

**Facultad de Ingenierías Físico–Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: PhD. Carlos Borrás Pinilla.

ABSTRACT

TITLE: TO DESIGN A RELIABILITY MANAGEMENT MODEL IN MAINTENANCE BASE ON AUTOMATIC SUPERVISION AND OPERATIVE CONTROL FOR CENTRIFUGAL PUMPS OF HYDRO TREATMENT PLANTS AT GRB[***].

AUTHOR: WILLIAN VARGAS SILVA[****].

KEYWORDS: Neural network, Rotating Equipment, Predictive.

DESCRIPTION: This work is based on the creation of a predictive and reliable maintenance model applied to centrifugal pumps, different from those applied in Oil & Gas sector. This is a model that calculates the remaining life of rotating equipment. With this work, it is sought to reduce equipment downtime and maximize the active life of it, achieving lower life cycle costs. For the development of this model, it was collected a six-year database of thirteen operationally active centrifugal pumps, from the hydrotreating plants of Barrancabermeja refinery, which had failures only due to their normal wear accordig to therir operating conditions. The neural network library of Matlab program was used to create four architectures: Feedforward network, Nonlinear AutoRegressive model with eXogenous input NARX, Layer-recurrent network and focused Time-Delay Neural Network. The four options were evaluated and finally the Feedforward network was chosen as the more precise and trustworthy to the model. With the aforementioned, it was possible to create a new innovative model of maintenance, where all the operational variables of the equipment are associated, with results that increase the useful life of pumps.

[***]Bachelor Thesis.

[****]Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: PhD Carlos Borrás Pinilla.

INTRODUCCIÓN

El acelerado crecimiento económico, tecnológico y social que atraviesan actualmente los países y ciudades de todo el mundo ha generado una fuerte batalla competitiva en todos los sectores de la economía. El reto actual es contar con plantas e industrias que generen altos índices de calidad, productividad, seguridad y medio ambiente, con bajos costos, para así poderse mantener en el mercado.

Durante muchos años las plantas industriales han tenido que sortear diferentes tipos de inconvenientes que desencadenan en problemas significativos para la operabilidad y correcto funcionamiento de las mismas. Sin embargo, uno de los más usuales son aquellos que se originan por fallas en los equipos y máquinas activas, alterando el curso normal de los procesos y causando pérdidas de todo tipo. Para muchas organizaciones el tiempo muerto es el origen más grande en la disminución de ingresos y oportunidad de ganancias, lo que conlleva a planear mejoras que permitan aumentar la disponibilidad de estos y por ende el rendimiento sobre activos.

Es importante recalcar que todo equipo se enfrenta a un proceso normal de degradación debido al uso continuo; no obstante, las reparaciones durante paros programados permiten una planeación adecuada del mantenimiento y una mínima pérdida de tiempo mientras se reestablece el rendimiento, sin embargo genera altos costos (mantenimiento frecuente). Pese a esto, las complicaciones aumentan cuando una unidad se para inesperadamente retardando, no solo los tiempos de producción, sino la calidad de la operación.

El mantenimiento predictivo se ha convertido es una excelente opción para mitigar todos los problemas anteriormente mencionados, pues permite identificarlos antes de que estos afecten los procesos. En el presente documento se mostrará cómo, a través del uso de redes neuronales artificiales, se ha logrado crear un sistema que predice con un alto grado de

exactitud, la vida útil remanente de uno de los equipos más importantes para las operaciones de las plantas de hidrotratamiento de combustible de la refinería de Barrancabermeja: las bombas centrífugas. Esta herramienta hace parte de un plan de mantenimiento predictivo cuyo objetivo principal es evitar todo tipo de inconvenientes que pueda desencadenar una falla inesperada del equipo.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1. CONTEXTO

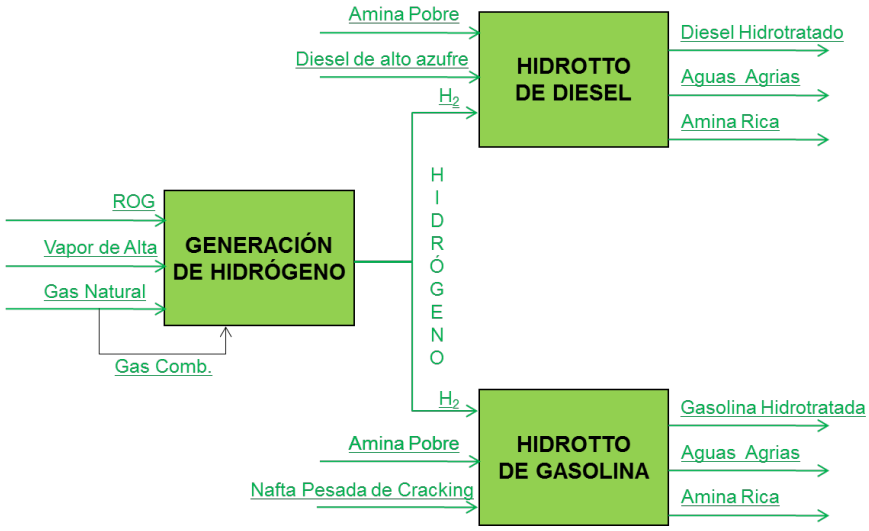
Las unidades de hidrotratamiento de combustibles diésel y gasolina, son las unidades más importantes dentro del proceso de producción de combustibles limpios de Ecopetrol S.A. Estas plantas, construidas en el 2010 con el propósito y compromiso ambiental de satisfacer las regulaciones colombianas (Ley 1205 de 2008) mediante la reducción del contenido de azufre en los combustibles líquidos, utilizan una significativa cantidad de hidrógeno para poder realizar las reacciones de hidrodesulfurización (HDS).

El equipo rotativo de las tres unidades está compuesto por 3 compresores centrífugos, 4 compresores reciprocaste, 2 bombas verticales, 4 bombas de desplazamiento positivo, 36 ventiladores enfriadores, 2 ventiladores de tiro inducido, 2 ventiladores de tiro forzado, 32 bombas centrífugas; de los cuales operan 69 equipos las 24 horas del día los 365 días del año, y se cuenta con 38 equipos disponible en SB. El modelo de gestión de mantenimiento que se va a elaborar mediante este proyecto de investigación está enfocado en optimizar el mantenimiento de las 32 bombas centrífugas de estas plantas.

La reducción del contenido de azufre en los combustibles se logra utilizando una cantidad significativa de hidrógeno a altas presiones y temperaturas; para ello, la planta de hidrotratamiento (HDT) cuenta con tres unidades de proceso: unidad de generación de hidrógeno (U4650), unidad de hidrotratamiento de diésel (U4700) y la unidad de hidrotratamiento de gasolina (U4750).

En la Figura 1, se muestra un diagrama en bloques que describe la interacción de cada una de estas unidades mencionadas para la operación de la planta de HDT.

Figura 1: Diagrama en bloques de la planta de HDT.



Fuente: Ecopetrol.

1.1.1. Generación de hidrógeno

La unidad de generación de hidrógeno U4650 es la encargada de la producción de hidrógeno de alta pureza, la Figura 2, muestra el diagrama de bloques del proceso, mediante el cual se convierte vapor y gas natural en hidrógeno (H_2).

Una carga de diseño de gas natural de 6.97 MPCED a una presión de 100 PSIG y una temperatura de 650 °F y una carga de vapor de agua de alta presión (400 PSIG) con un flujo de diseño de 21.56 MPCED, son mezcladas y llevadas a través de un horno reactor de reformado con un lecho catalítico en el interior de sus tubos con oxido de níquel (N_iO), generando las siguientes reacciones:

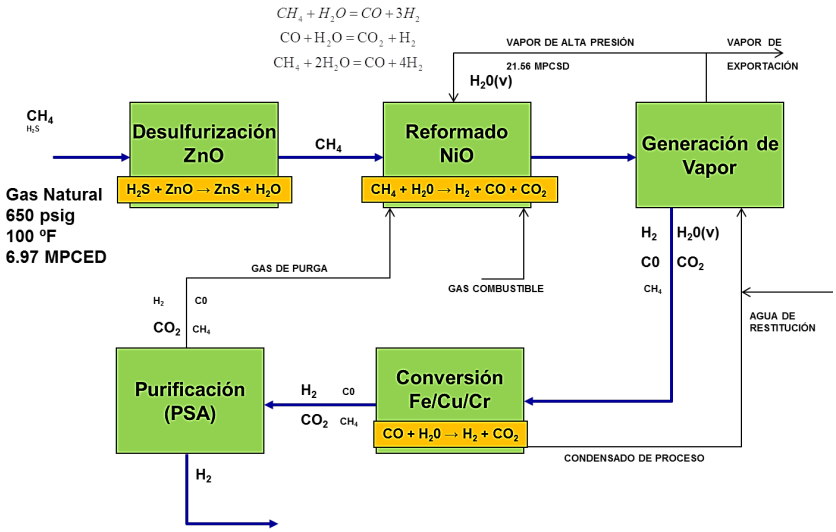
$$\begin{aligned} CH_4 + H_2O &\rightarrow CO + 3H_2 \\ CO + H_2O &\rightarrow CO_2 + H_2 \\ CH_4 + 2H_2O &\rightarrow CO_2 + 4H_2 \end{aligned} \tag{1.1}$$

Luego, realizando una integración energética con la temperatura excedente del gas de síntesis ($CO + H_2 + CO_2 + CH_4 + H_2O$) de la reacción endotérmica generada en el horno, se realiza un intercambio de calor a través de una caldera para la producción del vapor que se carga a la misma unidad (autosuficiente), más adelante, se realiza una conversión adicional

de CO en H_2 a través de un reactor de lecho fijo con catalizador de Fe, Cu y Cr en base alúmina, generando la reacción 3.7.

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \tag{1.2}$$

Figura 2: Diagrama de bloques de la unidad de generación de H2.



Fuente: Ecopetrol.

El efluente de esta reacción es enviado a una sección de purificación de hidrógeno PSA (Pressure swing adsorcion) que a través de lechos adsorbentes, realiza una purificación molecular del H_2 generando dos corrientes, la primera es un gas de purga a baja presión (5 PSIG) enviado como gas combustible para el horno de reformado (integración energética) y una segunda corriente con una pureza del 99.99 % mol de hidrógeno, la cual es enviada a las unidades de hidrotratamiento de gasolina (U-4750), y de diésel (U-4700) para el proceso de hidrodesulfurización.

1.1.2. Propósito del proceso

Hidrotratamiento de gasolina U4750. El propósito de la unidad Prime G+ es alcanzar una profunda hidrodesulfurización de la nafta pesada, alimentación de la FCC de gasolina. La mayoría del azufre en el pool de gasolina de una refinería típica proviene de la gasolina craqueada. Este producto también se caracteriza por un alto contenido de olefina. En la Figura 3 se presentan los R4751 Diolefinas y R4752 de hidrodesulfurización selectiva.

Figura 3: Planta Hidrotratamiento de gasolina.



Fuente: Ecopetrol.

La tecnología de hidrodesulfurización convencional da como resultado una pérdida significativa del número de octano debido a la saturación de olefinas de alto octano convirtiéndolas en parafinas de bajo octano. En altos niveles de desulfurización, el número de octano (RON+MON)/2, puede ser reducido de 5 a 10 puntos, lo cual es inaceptable. El contenido olefínico de la alimentación de nafta pesada es pequeño comparado con la gasolina craqueada, incluso es importante la pérdida de octano experimentada cuando se usa una tecnología de hidrodesulfurización convencional. El objetivo del proceso de Prime G+ es remover el azufre mientras se evita la pérdida sustancial en número de octano.

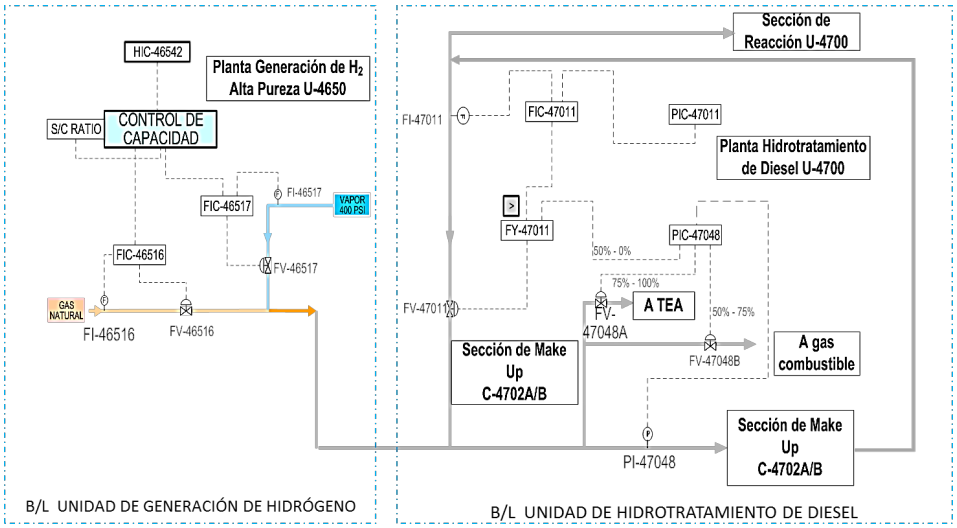
La unidad de Prime G+ emplea la tecnología de reactor de lecho fijo comercialmente probada. Esta tecnología permite la carga y descarga fácil del catalizador. Los catalizadores HR-845 y HR-806 han sido probados comercialmente y son regenerables, esto da como resultado un modesto costo de procesamiento de catalizadores. Ciclos de tres años de uso de catalizadores en exceso han sido demostrados comercialmente procesando nafta FCC y usando esta combinación de catalizadores de hidrogenación selectiva (Reactor de Diolefinas) y de hidrodesulfurización selectiva (Reactor HCC).

1.1.3. Propósito del proceso U4700.

El propósito de ésta Unidad Prime D es producir un diésel de ultra bajo contenido de azufre (25 ppm en peso de azufre) de una mezcla de diésel virgen y un diésel de craqueo por medio de reacciones de hidrodesulfurización. La alimentación a la unidad es una mezcla de destilados vírgenes y craqueados. La alimentación proveniente del craqueo consta de FCC aceites livianos cíclicos. La capacidad de diseño de la unidad es de 56600 BPDS para el caso de diseño. La unidad también está diseñada para una mínima carga parcial del 50 % (Turndown).

En la Figura 4, se muestra un diagrama de flujo simplificado de la unidad de generación de H_2 y diésel. La unidad de generación de hidrógeno trabaja con un control de capacidad "manual", introducido por el operador de consola, que de acuerdo a las necesidades observadas en los procesos de tratamientos con hidrógeno, aumenta o disminuye el porcentaje (%) de capacidad, envía un comando de control en cascada sobre dos líneas de carga, gas natural y vapor de agua, en una relación de 2.13 lbh. Steam/carbon, mezclándose y pasando por todo el proceso de reformado con vapor, suministrando un flujo de H_2 hacia la succión del compresor C4702 de diésel, elevando la presión de 327 psig a 995 psig en dos etapas.

Figura 4: Diagrama simplificado de control de la unidad de generación de H2 y Diésel.



Fuente: Ecopetrol.

Este hidrógeno a alta presión es entregado hacia las unidades de hidrotratamiento por un control de flujo que trabaja en cascada con el sistema de reciclo "spillback" de la máquina

FIC47011. En la Figura 5 se muestra las bombas de carga de la U4700.

Figura 5: Planta hidrotratamiento diésel U4700.



Fuente: Ecopetrol.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La estrategia de mantenimiento de los equipos rotativos de las tres unidades está basada en RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad), la cual fue elaborada con base en recomendaciones del fabricante de los equipos y de normas API610, donde previamente, se asegura la reducción del riesgo de falla, protegiendo la garantía, a través de MST (tareas programadas de mantenimiento definidas con una frecuencia).

Durante los 6 años de operación de las plantas se ha identificado, en los mantenimientos realizados, que se puede disminuir la frecuencia de mantenimiento y compra de repuestos. Por tanto, es necesario optimizar el mantenimiento de las bombas centrífugas a través de un modelo nuevo de gestión de confiabilidad basado en supervisión y control operativo de cada uno de los factores que influyen en el contexto operacional relacionados con la confiabilidad del mecanismo.

El desarrollo de la presente investigación pretende resolver la siguiente pregunta: ¿puede un nuevo modelo de gestión de confiabilidad basado en supervisión inteligente y control

operativo de los factores, elevar la confiabilidad operacional por encima de los estándares establecidos por los fabricantes de bombas centrífugas de las plantas de Hidrotratamiento de la GRB (Gerencia Refinería de Barrancabermeja)?

1.3. JUSTIFICACIÓN

Desde 1940 los planes de mantenimiento han tenido constantes cambios y mejoras para aumentar la disponibilidad y disminuir las fallas de las máquinas, esto indica que se debe adoptar maneras de pensar completamente nuevas, para ser competitivos a nivel mundial en la industria del petróleo.

Se busca disminuir la frecuencia de mantenimiento por los altos costos que esto acarrea sin mitigar la disponibilidad de la planta de hidrotratamiento de combustible, logrando que la vida esperada o imaginaria sea mayor a las estadísticas de los fabricantes.

Por lo anterior se plantea desarrollar un nuevo modelo de mantenimiento predictivo basado en red neuronal artificial [35], [42], [41], [7], [43], [34], aplicado a bombas centrífugas que operan con sistema de supervisión automático y control de la condición operativa, de tal forma, que permita predecir la vida útil remanente de las mismas en base al histórico de sus factores de operación.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Elaborar un modelo de gestión de la confiabilidad en el mantenimiento para las bombas centrífugas de las plantas U4650, U4700, U4750 de Hidrotratamiento de combustible de la Refinería de Barrancabermeja, basado en sistema de supervisión automático y control de la condición operativa del equipo en función de los factores asociados a su contexto operacional.

1.4.2. Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo de confiabilidad en el mantenimiento aplicado a bombas centrífugas de las U4700, U4750, U4650 de Hidrotratamiento de combustible de la Refinería de

Barrancabermeja, basado en una metodología de supervisión inteligente automática y control de la condición operativa en función de 7 factores asociados a su contexto operacional, los cuales son: Flujo operacional BEP (punto de mejor eficiencia), Desviación del flujo operacional, Nivel de vibración, velocidad de corrosión del fluido bombeado, Factor de cavitación, Temperatura caja de rodamiento y Estado de la película lubricante (contaminantes del aceite), cada uno de los factores está en control para garantizar una operación confiable segura, sin fallas aleatorias solo cambio de partes por edad o envejecimiento. Esto disminuye considerablemente la frecuencia y costos de mantenimiento.

- Evaluar y validar el modelo de supervisión automática y control operativo, dado que la vida esperada real de los equipos es mayor a la disponible, tiene un impacto positivo en la reducción de costos asociados al mantenimiento de los equipos rotativos de las plantas U4650, U4700, U4750 de Hidrotratamiento de combustible de la Refinería de Barrancabermeja. El ajuste del modelo se realizará con datos reales del histórico de los sistemas de información de PI Data link (es un complemento para Microsoft Excel que permite recuperar información), RIS (sistema información de la refinería), AMS Machinery Health Manager, SYSTEM1 (software desarrollado por Bently Nevada y posteriormente comprado por General Electric que permite observar la información estática y dinámica de vibraciones de turbomaquinaria o equipo rotativo, de manera gráfica en forma de tendencias, orbitas, cascadas, espectros, entre otros) y SAP disponible en planta usados como información para el desarrollo de este proyecto.

- Definir y establecer con el nuevo modelo de gestión una nueva frecuencia de intervención optimizada por operación confiable de mantenimiento a cada una de las bombas centrífugas de las plantas de Hidrotratamiento.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. MARCO TEÓRICO

Existen tres formas de determinar la frecuencia de falla: utilizando métodos estadísticos, utilizando modelos matemáticos o basándose en la experiencia de los técnicos que elaboran el plan de mantenimiento. Los métodos estadísticos son complejos, y no siempre se dispone de datos suficientes para realizar un estudio estadístico adecuado. En estos casos se utiliza la distribución de Weibull el cual permite fijar el momento más adecuado para llevar a cabo una tarea de mantenimiento.

También se utilizan modelos matemáticos capaces de predecir la duración de una pieza, y por tanto, la necesidad de sustituirla antes de que se produzca un posible fallo. Son modelos complejos, por tanto, las empresas no se arriesgan a aplicarlos a sus equipos través del departamento de mantenimiento.

El fabricante de la pieza puede disponer de modelos o herramientas suficientes para determinar la vida de cada componente, aunque desde luego no son técnicas sencillas de aplicar ni ofrecen resultados exactos. Hay una brecha que se debe cerrar, y para ello se propone un sistema de supervisión automático y control de la condición operativa de equipo rotativo en función de los factores asociados a su contexto operacional. Por otro lado, la frecuencia se puede fijar con base en la experiencia de los técnicos de mantenimiento e ingenieros de confiabilidad encargados de elaborar el plan de mantenimiento; esta es la forma más habitual que utilizan la mayoría de las empresas, sencillamente porque las dos anteriores resultan complejas y riesgosas para la toma de ese tipo de decisiones que afectan la disponibilidad de los equipos y producción de una planta.

Los siete factores asociados al contexto operacional de equipo rotativo son: flujo operacio-

nal BEP, factor de desviación de flujo, nivel de vibración, corrosividad del fluido de bombeo, factor de cavitación, temperatura, caja de rodamiento y estado de la película lubricante (contaminantes del aceite).

- **Amplitud de la señal de vibración:** la vibración habitualmente se mide en la estructura principal de la máquina (tapas de cojinetes o soportes) donde los niveles de vibración son indicativos de las fuerzas de excitación generadas en el rotor como consecuencia de desequilibrios, rozamientos, deformaciones térmicas, vórtices y otros tipos de excitación [25]. Los parámetros sobre severidad de vibraciones de máquinas fueron definidos según la normalización internacional (International Standard Organization).
- **Factor de cavitación:** este fenómeno genera la pérdida de la función principal de una bomba: mantener un caudal fijo; además produce daños físicos evitando su correcto funcionamiento. A continuación, en la Tabla 1, se podrá observar un resumen de las referencias.

Tabla 1: Lista de escritos que tienen relación con la cavitación.

FECHA	**AUTOR**	**TEMA**
2003	José Francisco González Castillo.	Cálculo para evitar la cavitación en un sistema de bombeo mediante el uso de NPSHA y NPSHR [20].
mar-13	TAN Lei, ZHU BaoShan, CAO ShuLiang, WANG YuMing.	Cavitation flow simulation for a centrifugal pump at a low flow rate [38].
nov-13	Chudina, M.	Noise as an indicator of cavitation in a centrifugal pump [13].

Fuente: Autor.

- **Factor de corrosión:** los valores de velocidad de corrosión se determinaron bajo estándares de Ecopetrol, de acuerdo al tipo de fluido que maneja cada bomba.
- **Flujo operacional BEP:** en las curvas características se indica el comportamiento de una bomba bajo las condiciones de operación. Para determinar la mejor región de operación de las bombas se tomó como referencia el libro *Centrifugal Pump Handbook, Third edition, Sulzer Pumps Ltd, Winterthur, Switzerland* [33].
- **Contaminantes del aceite:** la lubricación tiene como objetivo reducir al máximo la fuerza de fricción entre dos superficies cuando se ponen en movimiento la una con

respecto a la otra [3]. Para evitar la falla por lubricación se debe controlar el desgaste progresivo en los componentes de las máquinas. Para ello es indispensable asegurar la película lubricante y evitar los contaminantes en el aceite.

- **Temperatura caja de rodamientos:** para asegurar y controlar el desgaste en los mecanismos lubricados se fue muy conservador con los parámetros definidos, basándose en el libro: Análisis de lubricantes de Pedro Albarracín Aguillón.
- **Desviación del flujo:** da una medida de que tan fluctuante es el caudal que entrega la bomba, e indica los tiempos de los estados de flujo mínimo o flujo máximo.

2.2. MARCO CONCEPTUAL

2.2.1. Bombas centrífugas

Las bombas son dispositivos utilizados para inducir líquidos a través de sistema de tuberías. Para ello deben movilizar la cantidad de caudal requerido venciendo la carga que el sistema le impone [39]. Para una velocidad de rotación dada, la bomba centrifuga es capaz de manejar una capacidad de flujo desde cero, hasta un máximo que depende del diseño y condiciones de succión presente. La cabeza total desarrollada por la bomba, la potencia requerida para moverla y la eficiencia resultante, varían con la capacidad de flujo. La interrelación de estas variables se conoce comúnmente como curvas características de la bomba.

Funcionamiento

El flujo entra a la bomba a través del centro u ojo del rodete y el fluido gana energía a medida que las paletas del rodete lo transportan hacia fuera en dirección radial.

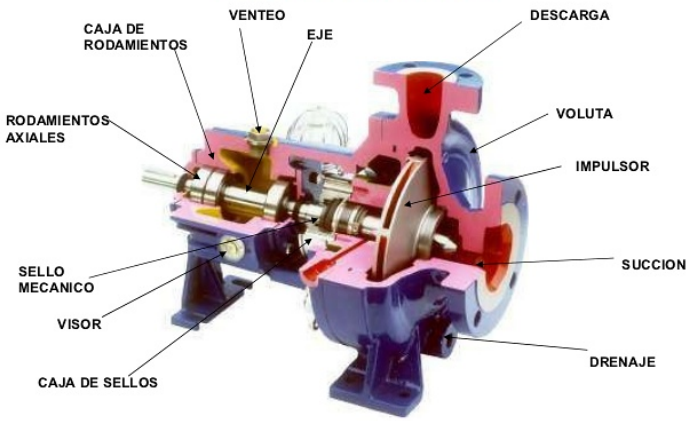
Esta aceleración produce un apreciable aumento de energía de presión y cinética, lo cual se debe a la forma de caracol de la voluta para generar un incremento gradual en el área de flujo de tal manera que la energía cinética a la salida del rodete se convierte en cabeza de presión a la salida [17].

Partes de una bomba centrífuga [23]

La Figura 6 muestra las partes de una bomba centrífuga:

- **Carcasa:** es la parte exterior protectora de la bomba y cumple la función de convertir la energía de velocidad impartida al líquido por el impulsor, en energía de presión. Esto se lleva a cabo mediante reducción de la velocidad por un aumento gradual del área.

Figura 6: Partes de la bomba centrífuga.



Fuente: Módulo Bombas [36].

- **Impulsor:** es el corazón de la bomba centrífuga. Recibe el líquido y le imparte una velocidad de la cual depende la carga producida por la bomba.
- **Anillos de desgaste:** cumplen la función de ser un elemento fácil y barato de remover en aquellas partes en donde, debido a las cerradas holguras entre el impulsor y la carcasa, el desgaste es casi seguro, evitando así la necesidad de cambiar estos elementos y quitar solo los anillos.
- **Sello mecánico:** es el cierre mecánico más usado, compuesto por carbón y cerámica. Se lubrica y refrigera con el agua bombeada, por lo que se debe evitar el funcionamiento en seco porque se daña irreparablemente.
- **Eje:** es el eje de todos los elementos que giran en la bomba centrífuga, transmitiendo además el movimiento que imparte la flecha del motor.
- **Cojinetes:** Sirven de soporte al eje de todo el rotor en un alineamiento correcto en relación con las partes estacionarias. Soportan las cargas radiales y axiales existentes en la bomba.

- **Bases:** sirven de soporte a la bomba, sosteniendo su peso.

Leyes de Afinidad

Tratándose de bombas, las leyes funcionan bien en los casos en que el diámetro del impulsor sea constante y la velocidad sea variable. Un cambio en el tamaño del diámetro del impulsor o de la velocidad del eje afecta al flujo volumétrico o a la velocidad al primer orden [26], la presión estática al segundo orden y la potencia eléctrica del motor de la bomba al tercer orden.

Estas leyes establecen que:

1. La capacidad varía directamente como la relación de velocidad.
2. La cabeza varía como el cuadrado de la relación de velocidad.
3. Los caballos de fuerza al freno varían como el cubo de la relación de velocidad.

Condición operacional de flujo mínimo

Todas las bombas centrífugas en operación continua tienen ciertas limitaciones que deben ser consideradas y tratadas cuando resulta un deficiente funcionamiento [24]:

- **Aumento de temperatura:** es el punto crítico cuando el líquido será degradado o vaporizado, afectando negativamente los componentes de la bomba.
- **Flujo inestable:** principalmente debido a las condiciones de diseño y succión de la bomba. Los flujos mínimos - mayores son necesarios para evitar un flujo inestable recircula internamente entre el impulsor y la carcaza. El flujo inestable es detectado por ruido, vibración y cavitación.

El flujo estable puede ser evaluado como una función de la velocidad específica de succión, gráficamente [39]. Como un porcentaje de capacidad de mejor eficiencia, el punto de flujo mínimo se incrementa mientras la velocidad de succión específica se incrementa.

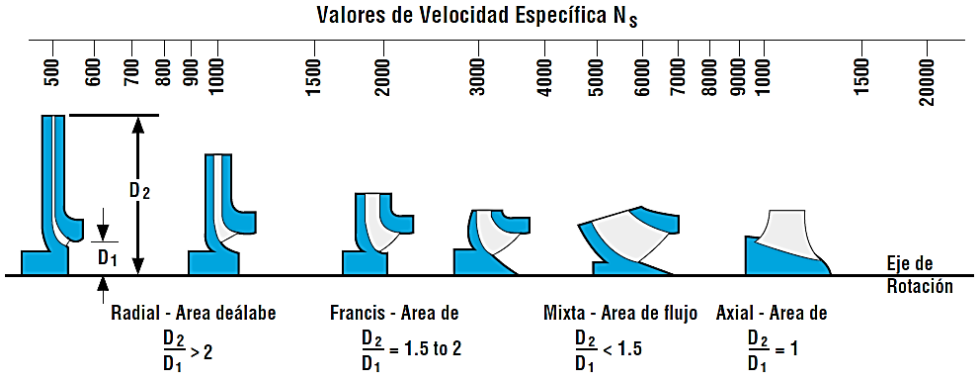
Velocidad específica de succión

La velocidad específica de succión es un número índice de diseño que indica la habilidad relativa de las bombas centrífugas para operar en condiciones de baja cabeza neta de succión

positiva disponible.

Dependiendo del diseño del impulsor, la velocidad específica de succión variará en valor desde 4,000 hasta 20,000 m/s; los valores altos indican menores requerimientos de cabeza de succión neta positiva [32]. Entre mayor sea el valor, el diseño del impulsor es menos estricto y más limitado es el rango de operación. Dependiendo de la aplicación, los impulsores con Nss de 8500 a 11000 son de uso común. En la Figura 7 se determina cual tan lejos puede operar la bomba sin dañarse.

Figura 7: Flujo mínimo según su NSS.



Fuente: Flowserve curvas y variables de bombas centrifugas.

El Ns es un índice que determina si la bomba se debe especificar con voluta singular o con voluta doble.

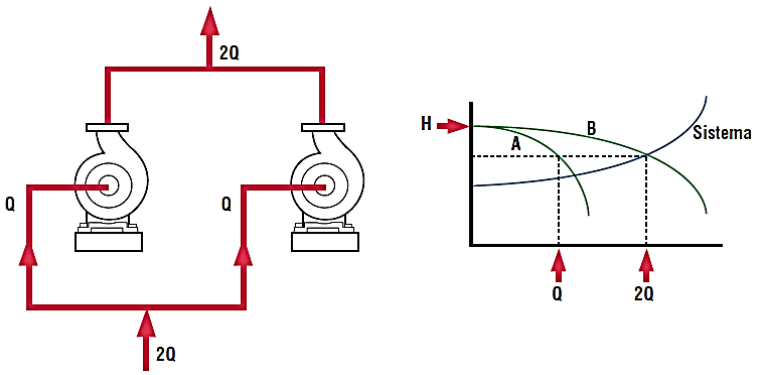
Operación en serie o paralelo

- **En serie:** para aplicaciones de cabeza alta - flujo bajo, más de una bomba en serie puede proveer la cabeza total requerida.
- **Paralelo:** para flujo alto - cabeza baja, múltiples bombas pequeñas pueden proveer el funcionamiento deseado comparado a una bomba grande, ver Figura 8.

Es recomendable que siempre se construya una curva de sistema de cabeza cuando considere el uso de múltiples bombas en un sistema. Luego las curvas de bombas individuales pueden ser usadas para sobreponer la curva de cabeza del sistema para determinar la cabeza total de las bombas combinadas y los puntos de capacidad de la curva.

Para operaciones en serie, agregue las cabezas verticalmente en la curva compuesta en los mismos puntos de capacidad en la curva compuesta.

Figura 8: Bombas centrífugas en paralelo.



Fuente: Seminario Flowserve.

Para operación paralela [6], se agregan las capacidades horizontalmente en la curva compuesta en los mismos puntos de cabeza. En operaciones que usan bombas en serie siempre se considera la presión de succión: los límites de presión de la bomba.

Modos de fallas típicos en las bombas centrífugas

Los modos de fallas más frecuentes en bombas centrifugas son fallas hidráulicas relacionadas directamente con el fluido, el cual está determinado por el caudal y presión que desarrolla la bomba. Por otro lado fallas mecánicas están relacionadas directamente con el comportamiento de los elementos mecánicos que componen el sistema tales como: rodamientos, sellos mecánicos, anillos de aceite etc. Las causas de las fallas que se presentan en las bombas centrifugas pueden pertenecer a otras categorías tales como.

- Mal diseño de la bomba.
- Material defectuoso.
- Deficiencia de proceso y fabricación.
- Defectos en el ensamble y/o instalación.
- Operación fuera del punto de diseño o condiciones de servicio distintas a las recomendadas.

- Mantenimiento inadecuado.
- Operación inadecuada.
- **Controlando el desgaste en las bombas centrifugas:** aunque el diseño y la operación sea el correcto, existe la condición de desgaste interno. No obstante, si lo controlamos, podemos extender la vida útil de la bomba.
- **La Erosión:** la erosión [5] es el desgate de las partes internas de la bomba por partículas sólidas contenidas en el líquido bombeado. Las partes más afectadas son:

  1. Anillos de desgaste.
  2. La camisa de la bomba.
  3. Las empaquetaduras.
  4. Las caras del sello.
  5. Sello de aceite.
  6. Impulsor de la bomba.
  7. Carcaza de la bomba.

  La erosión puede ser causada por minerales presentes en el agua. Sólidos como arena y óxido puede causar erosión dentro de las bombas.

- **La corrosión:** el daño de corrosión se causa por un ataque electroquímico en la superficie del metal. La corrosión se acelera por:

  1. Aumento de temperatura.
  2. La presencia de oxígeno en el fluido o a la superficie del fluido.
  3. Movimiento relativo entre partes no propiamente encajados.
  4. Cambios bruscos de presión.
  5. Cavitación.
  6. La erosión.
  7. Viscosidad aumentada en el fluido.

- **Anillos de Desgaste:** los anillos de desgaste son normalmente colocados en las carcasas y/o en los impulsores. Estos anillos de desgaste proporcionan una dimensión de tolerancia estricta que mantienen la eficiencia original de la bomba, separando las presiones [32]. Estos anillos dependen del líquido en la bomba para su lubricación. El índice de desgaste depende de varias características del fluido. Los anillos estropeados producirán una degradación severa de eficiencia de la bomba, particularmente en las bombas pequeñas de alta velocidad. El mantener las tolerancias estrictas entre los anillos de desgaste, permite conservar la eficiencia de la bomba.

  Una bomba pierde entre 1.5 % – 2 % de puntos de eficiencia por cada 0.025 mm del desgaste en el anillo sobre la tolerancia original de fábrica.

- **La velocidad del fluido acelera el desgaste:** impulsores de diámetro pequeño que operan a su velocidad más alta producen la presión deseada del sistema. Sin embargo, estas velocidades del fluido causan el desgate rápido de sus componentes. Este desgaste se observa en el diámetro exterior de las aletas del impulsor. Normalmente la alta velocidad del fluido es la causa principal del desgaste excesivo.

- **La Turbulencia:** el desgaste desigual en las piezas de la bomba, es originado a la turbulencia del fluido. Arreglos inadecuados en la colocacion de las tuberias y sus conexiones, causan esta turbulencia. El flujo turbulento causa problemas en las bombas creando zonas de presion e inbalance que conduce al desgaste excesivo.

- **Estrangulando las valvulas (control de flujo):** una bomba centrífuga nunca debe operar continuamente o cerca de su punto de altura maxima (PMA). Esto normalmente sucede cuando un tanque esta cerca de su capacidad maxima y el operador o sensor de nivel comienza cerrando la valvula de llenado al tanque con la bomba prendida [26]. La energía consumida en cero flujo se transfiere al fluido. Esto recorta la vida de la bomba, y ciertamente aumenta el tiempo parado y de mantenimiento, conviertiendo la energía en calor y vibración aumentando la temperatura del fluido. Al estrangular o controlar la valvula de salida de la bomba, se genera una carga radial intensiva, el eje defleta proximadamente 60° del punto de divergencia.

- **Minimiza problemas de NPSH:** se debe tener en cuenta lo siguiente.

  - El tamaño de la tubería debe ser suficientemente grande para cargar el volumen deseado por la bomba.

- Velocidades excesivas incrementan pérdidas por fricción (rango deseado de 5-8 pies/s).
- La tubería debe conducir apropiadamente el líquido a la bomba.
- La tubería de elevación de succión debe ser exactamente horizontal o con una inclinación ascendente del depósito.
- Las aberturas de la succión deben ser propiamente diseñadas y colocadas para eliminar turbulencias.

2.2.2. Frecuencia de mantenimiento

Las investigaciones y estudios realizados como guía para el presente trabajo se basó en datos que guiaran la construcción de una estrategia de mantenimiento confiable y que pudiera mantener la disponibilidad de los equipos de una planta a bajo costo, dicho de otra manera, calcular el tiempo sobre la vida real o imaginaria del componente la cual podría ser mayor o menor de acuerdo a los factores del contexto operacional del activo [19]. Sin embargo, se encontró poca información sobre el cálculo de frecuencias de mantenimiento basado en supervisión automática y control operativo. Estas teorías son innovadoras en la rama del mantenimiento y sólo aplica para equipos que están en contacto directo con otros productos, en los que existen fenómenos de fatiga, corrosión, evaporación, abrasión y desgaste constante. Aunque están clasificados dentro del patrón de falla aleatorio, a través del control operativo se llevará a modo de falla por edad o envejecimiento. Para el desarrollo del modelo de gestión de mantenimiento se utilizará el programa Matlab.

Del libro mantenimiento centrado en confiabilidad de John Moubray [31] se tomaron conceptos referentes a estándares de funcionamiento y análisis de modos de fallas y sus efectos, además de fallas potenciales, tareas predictivas y recomendaciones.

El escrito por Raphael Suarez [37], hace buenos aportes sobre cómo calcular la frecuencia de inspección de mantenimiento predictivo, el cual se desarrolló en un modelo matemático que da una idea cercana del valor del tiempo entre inspecciones predictivas. El valor del intervalo entre inspecciones es directamente proporcional a tres factores: el factor de costo, el factor de falla y el factor de ajuste. Así, la relación matemática estará definida como: $I = C \times F \times A$. Donde C es el factor de costo, F es el factor de falla y A es el factor de

ajuste.

La literatura actual nos ofrece calcular la frecuencia de inspección del mantenimiento predictivo de una manera que se basa en la curva P-F, donde el tiempo entre inspecciones para algunos, debe ser la mitad del tiempo entre la falla potencial y la falla funcional (intervalo P-F) y para otros, el tiempo entre inspecciones debe ser menor que el intervalo P-F asegurando que la diferencia entre ambos sea mayor que el tiempo de reparación. Lamentablemente esta forma de calcular la frecuencia de inspección predictiva tiene los siguientes inconvenientes:

- No se posee suficientes datos para construir una curva para cada modo de falla.
- La curva varía si es afectada por factores externos tales como variaciones en el contexto operativo, fallas operacionales y deficiencias relacionadas con ingeniería y mantenimiento. En la mayoría de los casos, la frecuencia es calculada con la ayuda de una curva P-F general sólo para algunos componentes principales del equipo a ser inspeccionado, o utilizando criterios gerenciales no formales, basados en el costo de las inspecciones versus el costo de no poder predecir la falla.

Con base en el análisis de la información recopilada se estableció que la mejor forma para desarrollar el modelo de gestión de confiabilidad en mantenimiento basado en supervisión automática y control operativo aplicado a bombas centrifugas, es a través de la implementación de una red neuronal artificial para el reconocimiento y predicción de fallas.

2.3. MARCO LEGAL

La realización del presente trabajo de investigación y desarrollo está basado en la norma internacional PI 610 / ISO 13709 la cual establece los requisitos para bombas centrífugas en voladizo, entre cojinetes y montadas verticalmente que se utilizan en los servicios de proceso de la industria del petróleo, petroquímica y del gas.

De igual manera las implementaciones se fundamentan en el RBI (Inspección basada en el riesgo) [22] cuyo enfoque basado en el riesgo para la priorización y planificación de las inspecciones, principalmente en la industria del petróleo y el gas, analiza la planificación de la probabilidad de fracaso y las consecuencias de la misma con el fin de desarrollar el plan de inspección. Está relacionado con la Gestión de Activos Basado en el Riesgo, Gestión de

Integridad basado en el riesgo y Gestión de resultados basada en el riesgo. Se utiliza para dar prioridad a la inspección, por lo general por medio de ensayos no destructivos (END), los requisitos para las principales plataformas petrolíferas, centros mineros, refinerías e instalaciones químicas en todo el mundo.

Además, se encontraron las siguientes normas relacionadas con la severidad de vibración en equipos industriales, que aplica a uno de los 7 factores de la operación de bombas centrifugas. En la Tabla 2 se muestra un resumen estos estándares de referencia que poseen relación con el proyecto.

Tabla 2: Normas de severidad de vibración de máquinas.

NORMA	**TÍTULO**
ISO 3945	Medida y evaluación de la severidad de vibración en grandes máquinas rotativas, in situ; velocidades de operación entre 10 y 200 rev/s.
ISO 2373	Vibración mecánica en cierta maquinaria eléctrica rotativa con alturas de eje entre 80 y 400 mm – Medida y evaluación de la severidad de vibración.
ISO 10817-1	Sistemas de medida de vibración en ejes rotativos, Parte 1: Señal relativa y absoluta de la vibración radial de ejes rotativos.
ISO 7919	Vibración mecánica de máquinas no alternativas - Medidas en ejes rotativos y evaluación.
ISO 2372-1974	Vibración mecánica de máquinas.
GUIA	CARTA DE RATHBONE
Departamento Ingeniería mecánica, energética y materiales.	NORMATIVA SOBRE VIBRACIONES

Fuente: Autor.

2.4. MARCO REFERENCIAL REDES NEURONALES

2.4.1. Red neuronal artificial

Las redes neuronales han atraído la atención de los investigadores debido a su capacidad para aprender funciones no lineales complejas [21], [8], [10], [9]. La arquitectura de red neuronal más empleada es la Perceptrón Multicapa MLP (MultiLayer Perceptron) [43], [34], [7], [41], alimentada hacia adelante, la cual es entrenada por medio del algoritmo de Back propagation para reducir el error cuadrático. Farokhzad [15] propuso un modelo de detección y diagnóstico de fallas aplicado a bombas centrífugas de agua, basado en una red neuronal Perceptrón Multicapa, con la cual logró clasificar correctamente cuatro estados de operación de la bomba: bomba sana, falla en el impulsor, sellos defectuosos y cavitación. Wang et al. [42] también emplearon MLP para la clasificación y detección de patrones de vibración, utilizados para la detección de fallas en bombas centrífugas, sin embargo, ellos se basaron únicamente en un análisis de señales de vibración, análisis de espectros y sus amplitudes.

Otras arquitecturas de red neuronal artificial que se pueden usar para el desarrollo del modelo son las redes dinámicas, con la capacidad de tener en cuenta el histórico o la tendencia de comportamiento de los factores de operación de la bomba durante cierto periodo de operación, gracias a que estas redes contienen retardos o memorias para almacenar información. A continuación se mencionan los tipos de arquitectura de red neuronal empleadas para la detección de fallas en equipos industriales, y arquitecturas empleadas en aplicaciones de predicción, para el aprendizaje de sistemas dinámicos variables en el tiempo, las cuales se encuentran programadas dentro de la librería de Redes Neuronales de Matlab, ANN (Artificial Neural Network) y serán empleadas en el desarrollo de esta propuesta.

2.4.2. Red neuronal dinámica

Son aquellas que contienen retardos (o integradores para redes en tiempo continuo) y que operan en una secuencia de entradas, el orden de las entradas es importante . Una red neuronal dinámica tiene memoria, y su respuesta no solo depende de la entrada actual, sino también del histórico de una secuencia de entradas. Este tipo de redes dinámicas tiene aplicación en diversas áreas como control de sistemas dinámicos, predicciones en el mercado financiero,

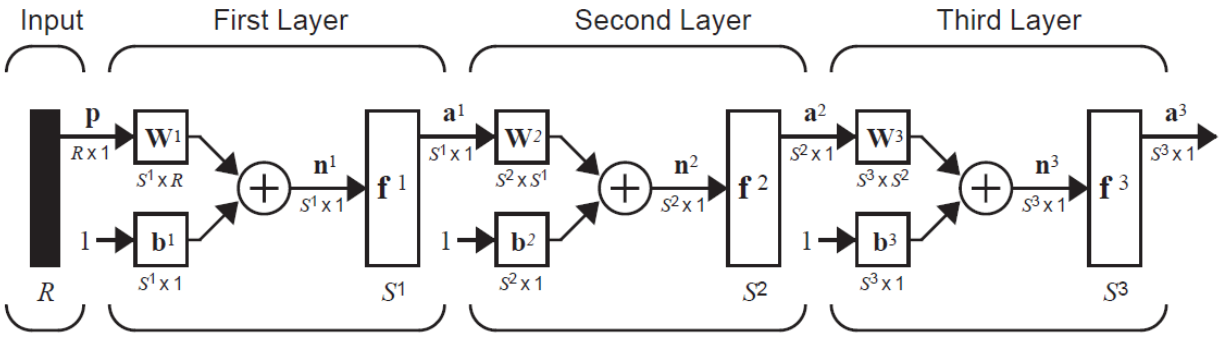
detección de fallas, reconocimiento de voz, aprendizaje de gramática en lenguajes [35], [40], entre otras. Los algoritmos de entrenamiento de las redes dinámicas son: backpropagation-through-time (BPTT) y real-time recurrent learning (RTRL), de las cuales, la RTRL es la más eficiente ya que puede ser implementada en la vida real, mientras que la técnica BPTT requiere de todos los valores iniciales para calcular el gradiente actual, lo que la hace poco viable su ejecución.

2.4.3. Alternativas de red neuronal para el modelo de gestión de confiabilidad en mantenimiento

Red neuronal Feedforward o Perceptrón Multicapa

La red neuronal Feedforward consiste en una serie de capas, la primera capa tiene una conexión con la capa de entrada y cada una de las capas subsecuentes tiene conexión con la capa previa, ver la Figura 9. La capa final produce la salida de la red neuronal. Una red feedforward con una capa oculta y suficientes neuronas en esta, puede ajustarse a cualquier problema finito de mapeo entrada – salida. Este tipo de red es entrenada por medio del algoritmo back propagation, el cual calcula los gradientes locales de cada neurona y gradualmente va ajustando sus pesos y byas para minimizar el error cuadrático.

Figura 9: Red neuronal Feedforward.



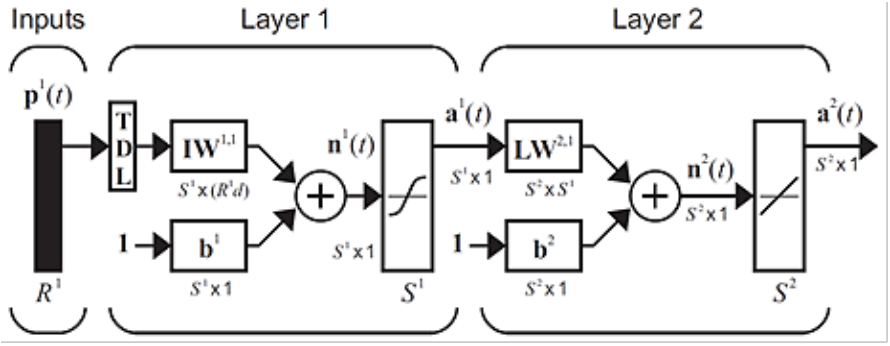
Fuente: Libro Neural network Desing [21].

Red neuronal basada en retardos de tiempo

La red neuronal basada en retardos de tiempo (focused time-delay neural network) es un tipo de red neuronal dinámica empleada para realizar predicciones de series temporales,

con aplicación en detección y predicción de fallas. A continuación se muestra la arquitectura básica de la red neuronal basada en retardos de tiempo (ver Figura 10).

Figura 10: Red neuronal basada en retardos de tiempo.

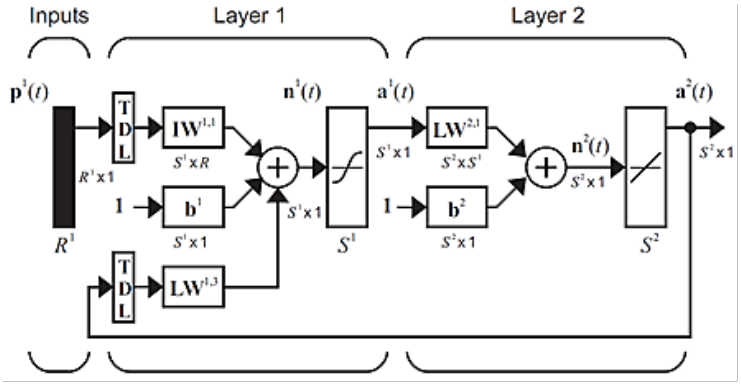


Fuente: Libro Neural network Desing [21].

Red Neuronal Narx

La red neuronal tipo NARX (Nonlinear AutoRegressive model with eXogenous input), es un tipo de red neuronal dinámica empleada para la predicción de series temporales y reconocimiento de patrones dinámicos. Esta es otra alternativa para la elaboración del modelo de gestión de mantenimiento basado en supervisión automática y control operativo aplicado a las bombas centrífugas de las plantas de Hidrotratamiento de la GRB. A continuación se muestra la arquitectura de la red neuronal NARX, ver la Figura 11.

Figura 11: Red neuronal Narx.



Fuente: Libro Neural network Desing [21].

3. ESTANDARIZACIÓN DE LOS FACTORES

La vida proyectada de las máquinas se basa en los parámetros que el fabricante tuvo en cuenta durante su diseño como cargas, velocidades, temperatura, medio ambiente y materiales utilizados. Según la norma API 610 por diseño la vida disponible mínima de los componentes de desgaste es 3 años, en la práctica, varios equipos rotativos de las plantas de HDT llevan una vida de operación continua estable de 7 años, por consiguiente, se tomará como referencia para calcular la vida esperada o real de los componentes de las bombas centrifuga de HDT, en función de la vida disponible y 7 factores del contexto operacional que puede afectar la vida útil de los componentes, según la ecuación 3.1.

$$Vida = f\left(V_D, f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7\right) s \tag{3.1}$$

Donde,
$f_1 = flujo\ según\ BEP$
$f_2 = desviación\ de\ flujo$
$f_3 = NPSH\ disponible$
$f_4 = tempertura\ caja\ rodamientos$
$f_5 = nivel\ vibración$
$f_6 =$índice de corrosión
$f_1 = contaminantes\ aceite$

Debido a la misma dinámica del proceso hace que sea muy complejo calcular la vida remanente de las bombas centrifugas por consiguiente no existen modelos con tal fin. Los avances de la ciencia y tecnología utilizando de las redes neuronales han sido exitosos para solucionar problemas complejos. Para obtener una respuesta confiable con el mínimo error, se realizó un estudio de cada uno de los factores asociados a la operación de la bomba para

estandarizar los 7 factores, los cuáles serán las variables de entrada de la red neuronal artificial con una variable de salida expresada en tiempo.

3.1. CABEZA NETA DE SUCCIÓN REQUERIDA (NPSHR)

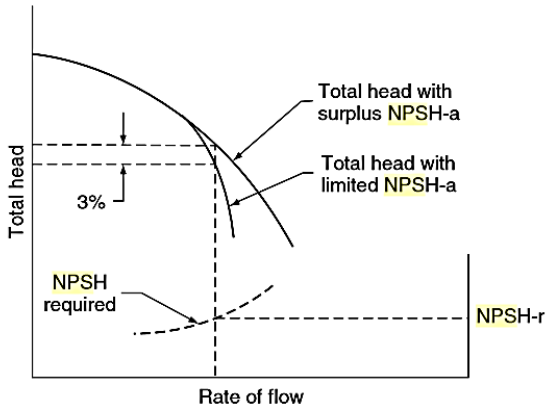
Esta variable, representa la energía con que llega el fluido a la succión de la bomba. Es deseable que a la succión de la bomba la energía no sea demasiado baja, especialmente el termino de presión, ya que, si esto sucede, parte del líquido que es bombeado, puede evaporarse, lo que formaría burbujas que pueden afectar enormemente el desempeño de la bomba presentando ruido y vibraciones que influyen directamente en los costos de mantenimiento. Para evitar esto, se debe garantizar, que el NPSHD debe ser mayor al NPSHR debido a la presión de vapor del fluido. Dependiendo de lo crítico del proceso se puede especificar que esta desigualdad sea desde mínimo de 10 % hasta un 100 % para evitar el fenómeno de la cavitación recurrente en las bombas centrifugas fundamentalmente. Este fenómeno genera la pérdida de la función principal de una bomba: mantener un caudal fijo. Además, produce daños físicos a la bomba. El objetivo es impedir la cavitación trabajando con los valores de $NPSHA$ (Net Positive Suction Head Available), que se relaciona con la energía que está en el líquido en la conexión de succión de la bomba.

Según los estándares del instituto hidráulico y normas API 610 edición septiembre 2010, para definir el NPSHR es una prueba realizada por el fabricante restringiendo la presión en la succión de la bomba hasta el punto donde la bomba sufre la disminución de 3 % de la altura total. Este punto es llamado el NPSHR, para reducir la presión en la succión algunos fabricantes cierran una válvula, otros suprimen la presión y otros rebajan la elevación del fluido en la succión de la bomba. En la Figura 12 se muestra en la curva el punto del NPSHR a 3 % de la altura total.

Otro referente a la cavitación se presenta en una caída de la altura de NPSHR del 3 % genera recirculación en la bomba ocasionando daños mecánicos e hidráulicos como muestra la Figura 13.

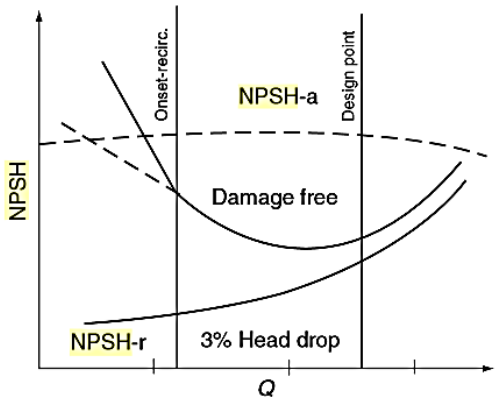
La condición suficiente para evitar la cavitación como guía general, debe ser como mínimo un 10 % mayor que el NPSHR. Expertos indican que el NPSHA recomendado es de 50 % sobre el NPSHR o con un margen de 3 pies.

Figura 12: Diferencia entre las márgenes mínimas de NPSHD y NPSHR.



Fuente: Libro Practical Centrifugal Pumps [18].

Figura 13: Comparación de daño por caída de 3 % del NPSHR.



Fuente: Libro Practical Centrifugal Pumps [18].

Un artículo escrito por José Francisco González Castillo [20] realizo pruebas en laboratorio y determina un margen de seguridad que corresponde al 18 % del NPSHR máximo de la bomba para evitar la cavitación en la bomba.

un artículo escrito por ingeniero Allan R Budris [11] experto en sistemas de bombeo desarrollo un método que predice cuando las bombas son susceptibles al ruido de cavitación, vibración y daño; Y cuando están libres de estos efectos perjudiciales. El método se denomina .Enërgía de succión", con valores específicos de .Enërgía de succiónïdentificados para diferentes

tipos de bombas. La cantidad de energía en un fluido bombeado que parpadea en vapor y luego se colapsa de nuevo en un líquido en las áreas de alta presión del impulsor determina la cantidad de ruido o daño por cavitación.

La energía de succión es otro término para el momento, líquido en el ojo de succión de un impulsor de la bomba, lo que significa que es una función de la masa y velocidad del líquido en la entrada, se define como:

$$S.E = De * N * S * SG \tag{3.2}$$

$De = Diámetro\ del\ impulsor\ (in).$
$N = velocidad\ (rpm).$
$NSS = velocidad\ específica\ de\ succión.$
$SG = Gravedad\ específica.$

Basado en la experiencia de cientos de bombas centrífugas, el escritor establece los siguientes valores específicos mostrados en la Figura 14 para diversos tipos de bombas.

Figura 14: Parámetros de energía de succión.

Pump Type	Start of "High Suction Energy"	Start of "Very High Suction Energy"
2-Vane Sewage Pumps*	100 x 10^6	150 x 10^6
Double Suction Pumps	120 x 10^6	180 x 10^6
End Suction Pumps	160 x 10^6	240 x 10^6
Vertical Turbine Pumps	200 x 10^6	300 x 10^6
Inducers	320 x 10^6	480 x 10^6

* - Applies to all pumps with less than 15° of impeller vane overlap

Fuente: Avoiding cavitation [12].

3.1.1. Energía de succión baja

Se considera que las bombas con niveles de energía de succión inferiores a los valores tabla tienen baja energía de succión. En términos generales, las bombas de baja energía de succión no son propensas a ruido, vibración o daños por cavitación o recirculación. Sin

embargo, podrían producirse efectos perjudiciales en los sellos mecánicos debido al aire o en los vapores que pueden liberarse del líquido durante la formación de las burbujas de cavitación, bajo condiciones de bajo margen de NPSH (por debajo de 1.1 a 1.3 NPSH).

3.1.2. Energía de succión alta

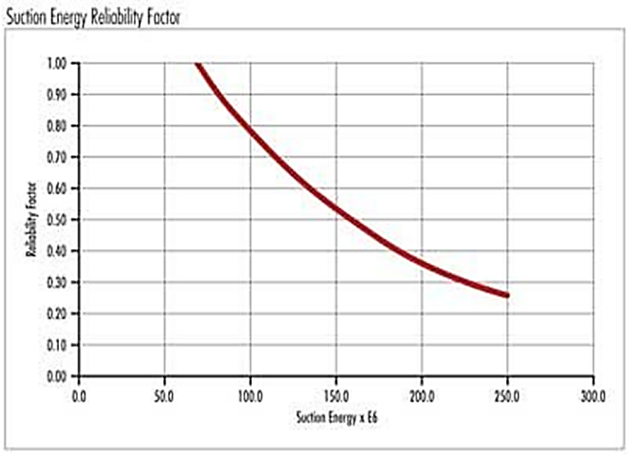
Las bombas con alta energía de succión y bajos márgenes de NPSH, especialmente cuando operan en el rango de flujo de recirculación de succión, pueden experimentar ruido, vibración y/o daño de erosión de cavitación menor con materiales de impulsor que tienen baja resistencia a cavitación, como hierro fundido. La alta energía de succión comienza en aproximadamente 3.560 rpm en las bombas de succión de extremo con tamaños de boquillas de succión de 6 ” y mayores, y bombas de caja dividida con boquillas de succión de 8 ” y mayores. A $\sim$ 1.780 rpm, la alta energía de succión comienza con las bombas de aspiración de extremo de boquilla de succión de 10”, y bombas de caja de succión de 12”. Un Margen NPSH mínimo debe estar en el rango de 1,5 a 2,0 dentro de la zona de funcionamiento permisible AOR.

3.1.3. Energía de succión muy alta

Las bombas con una energía de succión muy alta y márgenes bajos de NPSH, especialmente cuando funcionan en el rango de flujo de recirculación de succión, pueden experimentar daños por erosión, incluso con materiales resistentes a la cavitación, como acero inoxidable. la relación mínima de margen NPSH debería ser de al menos 2,0 a 2,5 dentro de la zona de funcionamiento permisible (AOR). Resumiendo, la energía de succión de una bomba es el producto del diámetro del ojo del impulsor, velocidad, velocidad específica de succión y gravedad específica del líquido. Las bombas con una alta energía de succión y bajos márgenes de NPSH (por debajo de NPSHA / NPSHR = 3), especialmente cuando operan en el rango de flujo de recirculación de succión, pueden experimentar daños por ruido, vibración y / o erosión por cavitación. Esto se puede ver en la Figura 15, la línea de tendencia definitivamente muestra una reducción en la confiabilidad de la bomba con valores crecientes de Energía de succión.

La mejor manera de aumentar el margen de NPSH para una aplicación de bomba es generalmente reducir la velocidad de la bomba mediante un variador de velocidad, que no sólo mejorará la fiabilidad de la bomba de la cavitación y otros factores relacionados con la velocidad, donde se demostró una reducción del 50 % de la velocidad para mejorar la vida útil

Figura 15: Factor de confiabilidad de la energía de succión.



Fuente: Avoiding cavitation [12].

de la bomba en un 75 %, pero también aumentará la eficiencia del sistema de bombeo y, por lo tanto, tendrá un impacto importante en la minimización del "Costo total del ciclo de vida".

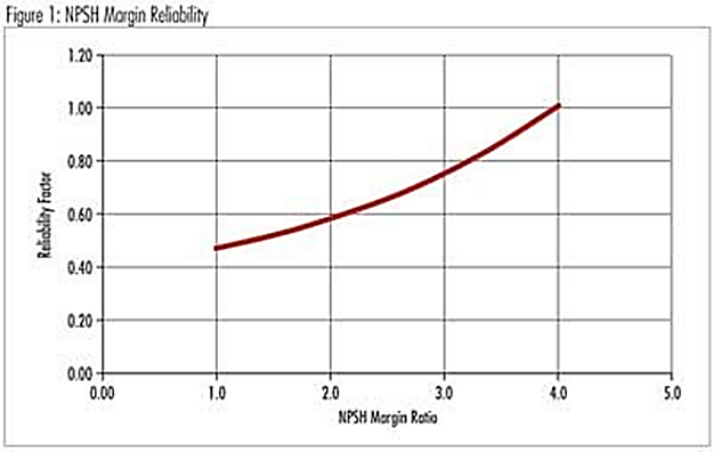
Para concluir el estudio realizado por Allan R Budris, cuanto mayor es la energía de succión, más importante es suprimir la cavitación residual que existe por encima de la NPSHR, para evitar daños. Este factor de fiabilidad sólo es aplicable dentro de la zona de flujo de funcionamiento admisible, por encima del inicio de la recirculación de succión. Se requieren valores de margen NPSH mucho mayor en la región de recirculación de succión para aplicaciones de bombas de energía de succión altas y muy altas. Cuanto mayor sea el margen NPSH mayor será la fiabilidad de la bomba, Como se puede observar en la Figura 16, existe una tendencia definida de mayor fiabilidad de la bomba con valores crecientes de la relación de margen de NPSH (NPSHA / NPSHR).

Se hicieron los cálculos para hallar la energía de succión de cada una de las 13 bombas en estudio, para tener como referencia que margen de seguridad se debería tener para evitar la cavitación, ver Tabla 3.

El principal daño al tener cavitación en una reducción significativa en la vida del cojinete y del sello.

Por lo anterior se definieron márgenes altos de seguridad debido al proceso, y altos valores de energía de succión calculados en la Tabla 3. Con esto aseguramos que los equipos operen

Figura 16: Margen de confiabilidad NPSH.



Fuente: Avoiding cavitation [12].

Tabla 3: Resultados Energía de succión bombas HDT.

EQUIPOS	**NSS**	**Gravedad especifica SG**	**N (RPM)**	**Diámetro impulsor (in)**	**Energía de succión (SE)**
SP4704A	10950	0,66	3600	22,07	574.199.604
SP4714A	7585	1	3600	7,56	206.433.360
SP4701A	10690	0,87	3600	11,51	385.367.231
SP4751A	10980	0,61	3600	12,87	310.322.470
SP4752A	10250	0,75	3600	8,36	231.363.000
SP4753A	8050	0,8	3600	12,4	287.481.600
SP4754A	8950	1	3600	9,625	310.117.500
SP4755A	7600	0,64	3600	8,31	145.511.424
SP4756A	10970	0,63	3600	19,8	492.623.208
SP4759A	10335	0,9	3600	13,98	468.125.892
SP4651A	7582	0,94	3600	7,8	200.128.406
SP4703A	9890	0,73	3600	8,78	228.200.278
SP4705A	10720	0,74	3600	13,38	382.107.110

Fuente: Autor.

lejos de la presión de vapor, evitando daños al tener cavitación en una reducción significativa en la vida del cojinete y del sello. los valores se especifican en la Tabla 4.

El factor más favorable corresponde al 50 % del NPSHR máximo de la bomba es un mar-

Tabla 4: Factores de seguridad referente al NPSHA.

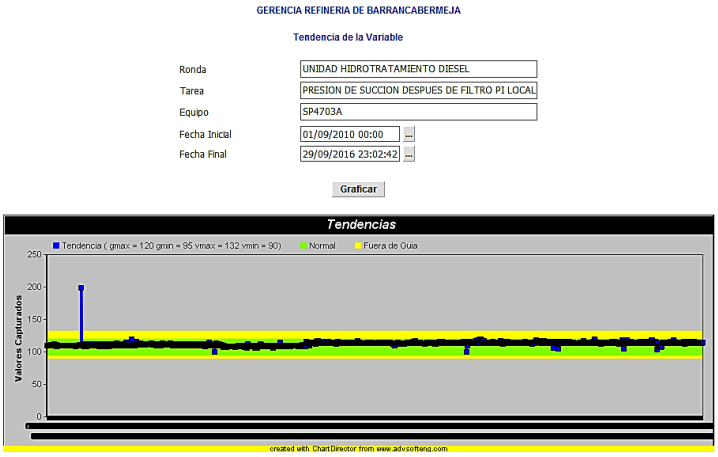
Factor (F3)	**(NPSHA)**
1,2	$> NPSR + 50\,\%$
1,1	$> NPSR + 40\,\%$
1,0	$> NPSR + 30\,\%$
0,9	$> NPSHR + 20\,\%$
0,8	$> NPSR + 10\,\%$
0,6	$> NPSR + 5\,\%$
0,4	$NPSR = NPSHA$
0,2	$NPSHR \leq 3\,\%$

Fuente: Autor.

gen muy conservador debido a altas temperatura del proceso, el valor mínimo del factor es 0,2 corresponde al $3\,\% \leq$ NPSHR punto de operación donde inicia la cavitación.

Durante el periodo del año 2010 al 2016 se tiene un histórico en el RIS (sistema de información de la refinería), contiene los datos de la variable presión de succión para cada uno de las bombas de HDT a continuación, se muestra en la Figura 17 la tendencia de la presión de succión de una de las bombas de HDT el equipo SP4703.

Figura 17: Tendencia de presión succión SP4703.



Fuente: Gerencia Refinería de Barrancabermeja.

Además de la presión de succión es necesario conocer las pérdidas por tubería y accesorios

del sistema de succión de cada bomba para calcular el NPSHD, se utilizó la ecuación 3.3.

$$NPSHD = H_a + H_s - H_{vp} - H_v - H_f - H_i \tag{3.3}$$

Donde,
H_a = presión atmosférica
H_s = Altura estática.
H_vp = Presión de vapor.
H_f = las pérdidas de fricción en la tubería y conexiones de la succión.
H_i = Perdidas que ocurren en la boquilla de succión.
H_v = perdidas por la velocidad.

Para calcular las pérdidas por fricción H_f se empleó el libro de flujo de fluidos en válvulas y accesorios y tuberías de CRANE [14]. Además, es necesario tener conocimiento del factor K para válvulas y accesorios, de su resistencia al paso de fluidos en un sistema de tuberías completo.

Las válvulas se clasificarán según su resistencia que ofrecen al flujo, las que presentan un paso directo del flujo, como las válvulas de compuerta, bola, macho y de mariposa pertenecen al grupo de baja resistencia; las que tienen un cambio en la dirección del flujo, como las válvulas de globo y angulares, están en el grupo de alta resistencia. Los conectores de reducción o ampliación son aquellos que cambian la superficie de paso del fluido. En esta clase están las reducciones y los manguitos. Los accesorios de desvío, curvas, codos, curvas en U, etc., son los que cambian la dirección de flujo. Para determinar la longitud equivalente en diámetros de tubería y factor de resistencia para válvulas, codos, conexiones de la línea de succión se utilizaron las tablas de las Figuras 18 y 19.

Figura 18: Factores de fricción para tubería de acero.

Diámetro Nominal mm / pulg	15 / ½	20 / ¾	25 / 1	32 / 1¼	40 / 1½	50 / 2	65, 80 / 2½, 3	100 / 4	125 / 5	150 / 6	200,250 / 8: 10	300400 / 12-16	450-600 / 18-24
Factor de fricción (f_T)	.027	.025	.023	.022	.021	.019	.018	.017	.016	.015	.014	.013	.012

Fuente: Libro de Crane [14].

Conociendo los factores de fricción (ft) de los accesorios, la cantidad y la longitud de la tubería de succión se calcularon las pérdidas totales por fricción para cada una de las bombas,

Figura 19: Factor K para válvulas y accesorios.

Accesorios	Factor K
Codos 45°	16 ft
codo 90°	30 ft
Curva Escuadra 45°	15 ft
Curva Escuadra 60°	25 ft
Curva Escuadra 75°	40 ft
Curva Escuadra 90	60 ft
Válvula de globo abierta 100%	3 ft
Válvula compuerta abierta 100%	8 ft
conexión en T	20 ft

Fuente: Libro de Crane [14].

ver la Figura.

Figura 20: Pérdidas por accesorios sistema de succión de cada bomba.

Equipos	Tubería succión ft	Ft factor de fricción K	Hf Tubería succión	HF Codos 45°	HF Conexión Estándar en T	Hf Válvulas compuerta	HF Pérdidas totales por fricción
SP4704A	50	0,013	0,65	1,60724502	0,26	0,208	2,72524502
SP4714A	6561	0,018	118,098	15,6172889	0,36	0,288	134,363289
SP4701A	60	0,014	0,84	1,59496739	0,28	0,224	2,93896739
SP4751A	55	0,015	0,825	0,94493337	0,3	0,12	2,18993337
SP4752A	50	0,017	0,85	3,7924623	0,34	0,136	5,1184623
SP4753A	40	0,015	0,6	0,6277758	0,3	0,24	1,7677758
SP4754A	6800	0,019	129,2	7,45785782	0,38	0,304	137,341858
SP4755A	25	0,019	0,475	2,30130839	0,38	0,152	3,30830839
SP4756A	55	0,014	0,77	0,68342185	0,28	0,224	1,95742185
SP4759A	25	0,017	0,425	0,82730306	0,34	0,136	1,72830306
SP4651A	70	0,018	1,26	7,32237698	0,36	0,288	9,23037698
SP4703A	45	0,018	0,81	1,20073893	0,36	0,144	2,51473893
SP4705A	25	0,017	0,425	1,13496225	0,34	0,136	2,03596225

Fuente: Autor.

Para medir las pérdidas por la velocidad se realizaron en los siguientes pasos.

1. Se calcula el área con el diámetro de succión aplicando la siguiente fórmula 3.4.

$$A = \pi D^2/4 \tag{3.4}$$

2. Al tener el área se calcula la velocidad con la siguiente fórmula 3.5.

$$V = \frac{Q\,[m^3/s]}{A\,[m^2]} \tag{3.5}$$

3. Al hallar la velocidad Se calcula las perdidas por la velocidad mediante la fórmula 3.6.

$$H_v = \frac{v^2}{2g},\ con\ g = 9,81[m/s^2] \tag{3.6}$$

La Figura 21 muestra los resultados del cálculo de las perdidas por la velocidad del fluido.

Figura 21: Cálculo pérdidas por velocidad.

Equipos	Diámetro succión (IN)	Área IN 2	Área m 2	Flujo promedio gpm	Flujo promedio m3/s	Velocidad V2 (m/s)	Velocidad (FT/s)	Hv m	Hv ft
SP4704A	12	113,0972	0,072966	3208,33	0,20241	2,7741	9,10137	0,3922	1,28786
SP4714A	3	7,068578	0,00456	184,013	0,01161	2,54571	8,352079	0,3303	1,08453
SP4701A	10	78,53975	0,050671	1656,67	0,10452	2,06272	6,767448	0,2169	0,71204
SP4751A	6	28,27431	0,018241	495,833	0,03128	1,7149	5,626301	0,1499	0,49215
SP4752A	4	12,56636	0,008107	443,333	0,02797	3,44997	11,31879	0,6066	1,99184
SP4753A	6	28,27431	0,018241	466,667	0,02944	1,61402	5,295343	0,1328	0,43596
SP4754A	2	3,14159	0,002027	55,0083	0,00347	1,71227	5,617697	0,1494	0,49065
SP4755A	2	3,14159	0,002027	81,6667	0,00515	2,54208	8,340164	0,3294	1,08144
SP4756A	10	78,53975	0,050671	1400	0,08833	1,74314	5,71897	0,1549	0,5085
SP4759A	4	12,56636	0,008107	245	0,01546	1,90656	6,255123	0,1853	0,60831
SP4651A	3	7,068578	0,00456	210	0,01325	2,90524	9,531617	0,4302	1,4125
SP4703A	3	7,068578	0,00456	147,292	0,00929	2,0377	6,68537	0,2116	0,69487
SP4705A	4	12,56636	0,008107	320,833	0,02024	2,49669	8,191233	0,3177	1,04316

Fuente: Autor.

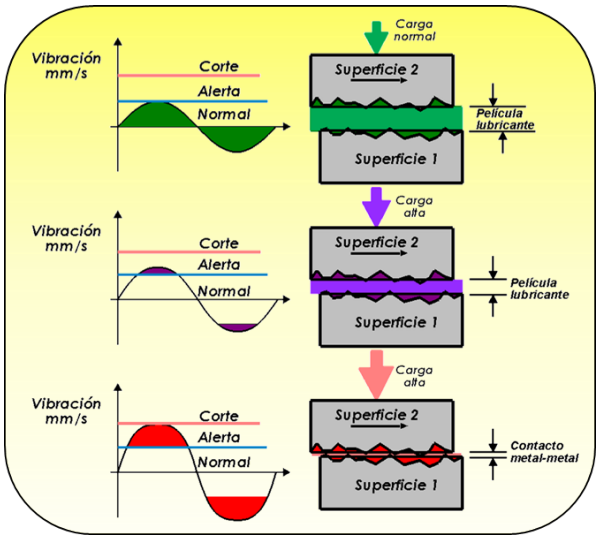
3.2. CONTAMINANTES EN LA LUBRICACIÓN

La lubricación se define como la interposición entre dos superficies que se encuentran en movimiento relativo la una con respecto a la otra de una sustancia cualquiera conocida con el nombre de lubricante. Un buen lubricante debe disminuir al máximo el desgaste de las superficies lubricadas, el calor generado por fricción, el consumo de energía, el ruido, y el impacto negativo sobre el ambiente cuando finalmente se deseche, como resultado de su proceso de oxidación normal.

3.2.1. Película lubricante

La película lubricante permite separar las rugosidades de dos superficies que se encuentran en movimiento relativo evitando que entren en contacto directo metal-metal. Por tanto hay que tener en cuenta que al aumentar la carga por encima del valor máximo permisible como se muestra en la Figura 22, el nivel de vibración se incrementa y puede llegar a romper la película lubricante. La estabilidad de la película lubricante que se adhiere a la superficie metálica

Figura 22: Película de lubricante.



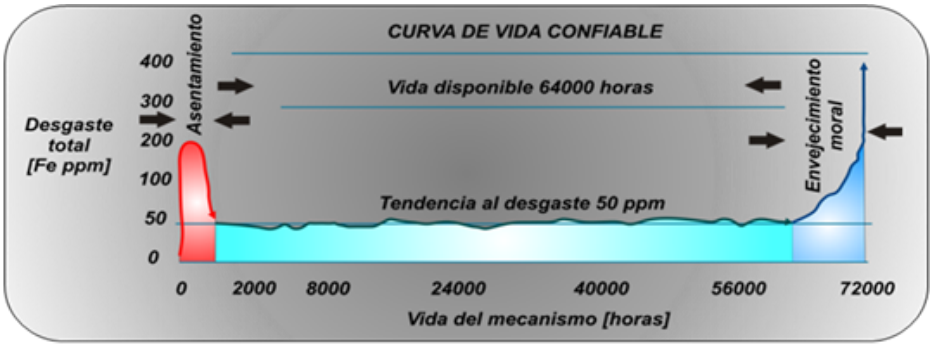
Fuente: conferencia control de desgaste por Pedro Albarracín Aguillón [4].

depende del índice de viscosidad del aceite, el cual si es alto reduce las probabilidades de que el tipo de flujo cambie de laminar a turbulento y que por lo tanto dicha película lubricante no se desprenda de la superficie metálica.

3.2.2. Control de desgaste en los mecanismos lubricados

La vida de las máquinas también conocida como vida a la fatiga, se define como el número de horas que podrán alcanzar los diferentes componentes mecánicos que las constituyen garantizando una producción continua, con bajos costos tanto por mantenimiento preventivo como por consumo de energía. La vida proyectada de las máquinas se basa en los parámetros que el fabricante tuvo en cuenta durante su diseño como cargas, velocidades, temperatura, medio ambiente y materiales utilizados. Las nuevas teorías de vida esperada de los componentes de las máquinas se basan, tanto en las condiciones operacionales bajo las cuales las someten los usuarios como en el Indicé de Viscosidad (IV) del lubricante utilizado, su aplicación y su nivel de limpieza de acuerdo con la Norma ISO 4406.

Figura 23: Curva de vida confiable.



Fuente: conferencia control de desgaste por Pedro Albarracín Aguillón [4].

La curva de vida confiable, Figura 23, define como el comportamiento al desgaste que debe tener cada mecanismo de una máquina a lo largo de su vida disponible. Los componentes de equipo rotativos tienen un desgaste normal de cada uno de ellos a través del tiempo; es característica para cada uno de los diferentes metales que constituyen la metalurgia de los mecanismos de la máquina. Su comportamiento es muy similar a la curva de la bañera tiene tres etapas fundamentales que son: improductiva o asentamiento del componente, productiva o vida a la fatiga y final o vida remanente (envejecimiento).

- Etapa improductiva o asentamiento del mecanismo.

  El asentamiento ó despegue de dos superficies que van a trabajar moviéndose la una con respecto a la otra en el mecanismo de un equipo, es la etapa más importante en la

vida del mecanismo y de ella dependerá que alcance su vida a la fatiga ó que ésta se vea reducida considerablemente (conocida como mortalidad infantil); se presenta en las primeras horas de operación del mecanismo y el tiempo de duración varía de acuerdo con el tipo de mecanismo, los materiales utilizados, la rugosidad de las superficies, la clase de lubricante utilizado y la operación del equipo.

Durante el proceso de mecanizado de las dos superficies del mecanismo nuevo es prácticamente imposible garantizar que las crestas que componen su rugosidad serán uniformes, por lo que habrá necesidad de eliminar intencionalmente las más sobresalientes cuando las rugosidades se muevan la una con respecto a la otra; en la curva tribológica aparecerá un elevado desgaste durante las primeras horas de operación de dicho mecanismo; está situación es normal y el desgaste irá disminuyendo en la medida que las crestas más sobresalientes se vayan puliendo. Las partículas metálicas que se desprenden se deben evacuar del mecanismo lubricado ya que de lo contrario darán lugar a que se presente el desgaste abrasivo el cual disminuirá considerablemente la vida de servicio del mecanismo.

- Etapa productiva o vida a la fatiga del mecanismo.

  Esta etapa es la más importante en la vida del mecanismo y tiene un rango de desgaste erosivo que permanece aproximadamente constante a lo largo de su período de explotación y que con los lubricantes que se conocen en la actualidad no puede llegar a ser cero; es característico para cada uno de los metales que constituyen el mecanismo y depende de sus condiciones de operación, del tipo de aceite utilizado, del índice de viscosidad (IV).

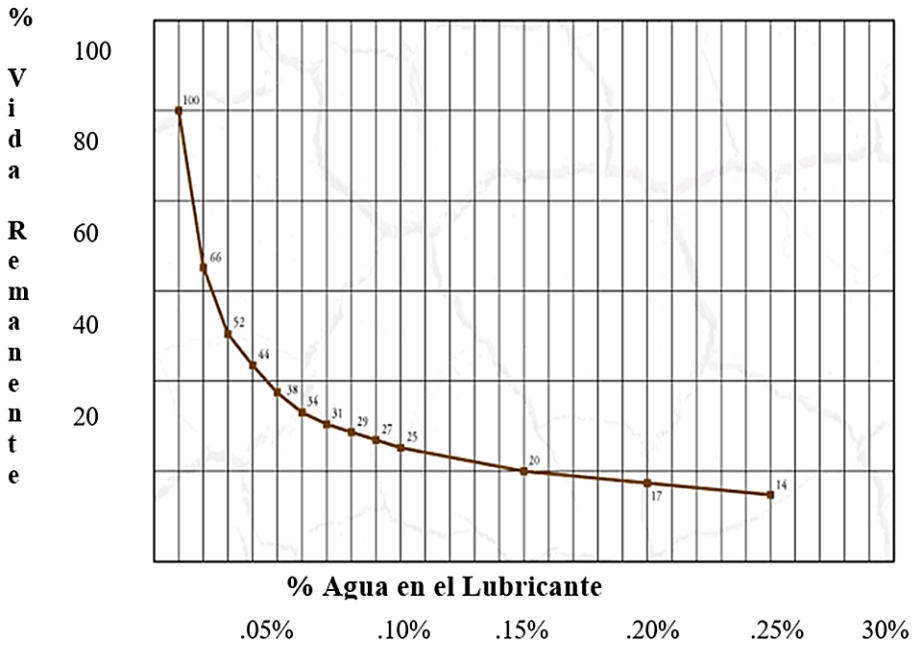
  La frecuencia de cambio del aceite la determina la tendencia al desgaste erosivo del mecanismo, es necesario determinarla mediante el análisis periódico del contenido de metales en ppm presentes en el aceite. Los factores que más inciden para que el mecanismo alcance su vida a la fatiga, para que sea mayor ó para que ésta se reduzca considerablemente son el índice de viscosidad. El contenido de metales en ppm presentes en el aceite se analiza por espectro fotometría de emisión atómica y se lleva a cabo cada vez que el aceite se cambie; la cantidad de partículas metálicas debe ser aproximadamente igual a la tendencia al desgaste del mecanismo, si es menor es un buen

síntoma de que el mecanismo está trabajando correctamente y si es mayor es porque algo anormal está sucediendo o podría presentarse contaminación del aceite por contenido de agua , polvo del medio ambiente lo cual se podría comprobar si el contenido de Silicio (Si) en ppm es alto.

Influencia del agua, humedad y calor en el lubricante.

La contaminación por agua y humedad ha sido identificada como la mayor causa de fallas prematuras en rodamientos, seguida por el calor originado por demasiada lubricación y las sobrecargas. Una cantidad tan poca de agua como 0.02 % en la grasa o aceite del rodamiento reducirá su vida en un 34 %. El agua entra por sellos con fugas, por el lavado de los equipos, por aspiración causada durante el enfriamiento cuando se apagan los equipos y por la humedad del aire que entra en la carcasa del rodamiento. Un 0.06 % de contenido de agua reducirá la vida hasta un 66 %. En la Figura 24 se muestra el efecto en la reducción de la vida de los rodamientos con relación a la cantidad de agua en el lubricante.

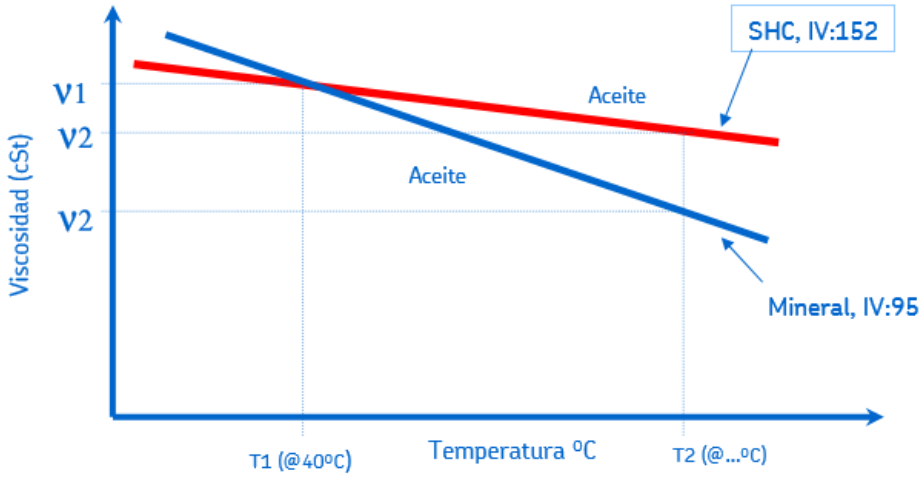
Figura 24: Afectación de la humedad en los rodamientos.



Fuente: http://machinerylubrication.com

Demasiado lubricante en los rodamientos hará que consuma energía adicional al obstruir su giro, ocasionando alta temperatura, deteriorando la viscosidad del lubricante mostrado en la Figura 25 y formando barnices. El problema de los aceites lubricantes es su bajo calor específico y su pobre conductividad, los cuales no contribuyen de una manera eficiente a la disipación del calor generado. De lo anterior se desprende la importancia de lubricar los rodamientos con la cantidad especificada y con la frecuencia requerida, aspecto importantísimo, sobre todo en los motores eléctricos.

Figura 25: Relación de la viscosidad con la temperatura.



Fuente: www.skf.com.co

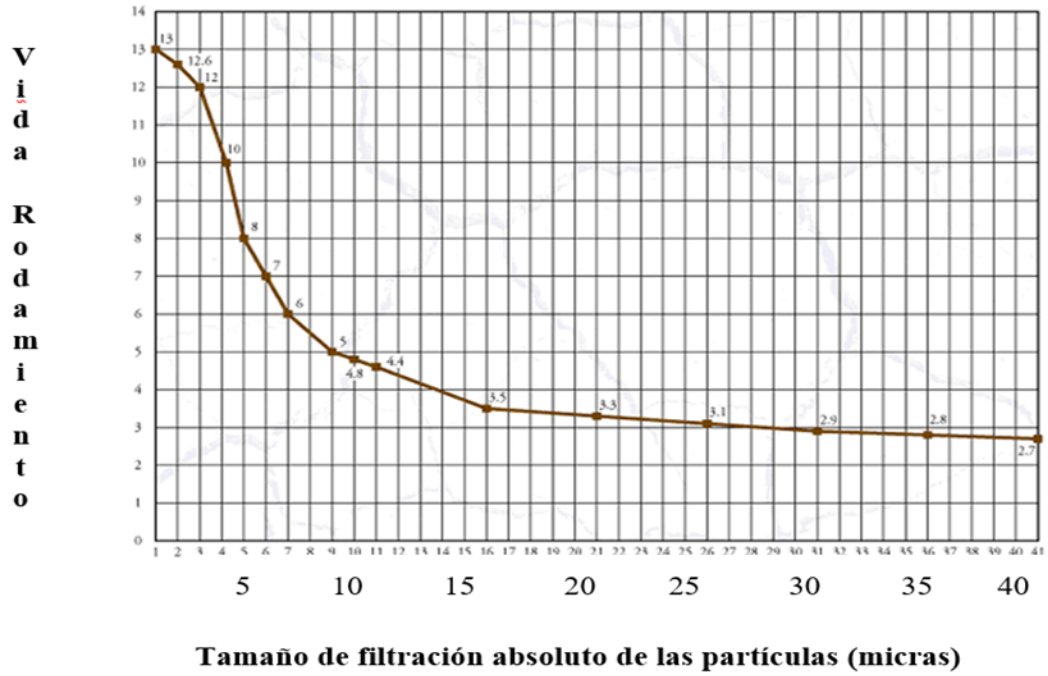
Influencia de partículas contaminantes.

Las partículas, principalmente las de tamaño entre 1 y 10 micras disminuyen seriamente la efectividad de la lubricación y reducen la vida de los rodamientos. En la Figura 26 se puede observar la relación entre la reducción de la vida de los rodamientos (millones de ciclos) y el tamaño de las partículas.

- Etapa final o remanente del mecanismo.

  Una vez que se ha alcanzado la vida a la fatiga del mecanismo, la curva de desgaste se vuelve ascendente y el análisis del contenido de metales en ppm entre cambios del aceite va mostrando una rata de crecimiento exponencial lo cual es un claro indicio de que la vida del mecanismo está llegando a su fin. En esta etapa es muy importante conocer con mucha aproximación cuando se debe parar la máquina para cambiarle

Figura 26: Influencia de las partículas en el lubricante.



Fuente: http://machinerylubrication.com

dicho mecanismo, ya que si se hace a des tiempo se desaprovecharía parte de su vida residual generando costos de mantenimiento y pérdidas de producción y por el contrario si se sobrepasa el tiempo máximo que puede trabajar el mecanismo con confiabilidad se produciría su falla catastrófica con graves consecuencias para la empresa.

Para determinar con mucha exactitud el momento en que se debe parar la máquina para intervenirla, es necesario utilizar técnicas de monitoreo como el chequeo de la temperatura de operación, análisis del espectro de las frecuencias de vibraciones, conteo de partículas según ISO 4406 y ferrografía. Esta última técnica es una de las más importantes ya que conociendo el tamaño de las partículas, su forma y el tipo de material es factible conocer la gravedad y el tipo de desgaste que se está presentando en el mecanismo.

Por lo anterior notamos que la lubricación es uno de los factores que influyen directamente en el desgaste de los mecanismos o tiempo de vida útil de las maquinas, por

tanto se elaboró la Tabla 5 determinando parámetros de control de los contaminantes en el aceite siendo más conservador con respecto a los recomendados de la norma ISO 4406 con esto buscamos llevar la operación de los equipos a la edad de envejecimiento su máxima vida útil. se establecieron unos valores que van desde 1,2 hasta 0,2 para

Tabla 5: Parámetros de control de los contaminantes en el lubricante de los mecanismos.

Factor	**Contaminantes en el lubricante de los mecanismos**
1.2	mantener el contenido de metales Pb, Cu,Fe,Cr,Al,Sn,Si $<$ 3 ppm, La viscosidad dentro del rango de operación según el grado ISO del aceite, pasar la prueba Demulsibilidad $<$ 10 min, TAN $<$ 0.6, % volumen de agua contenida en el aceite 0.0 %
1	mantener el contenido de metales Pb, Cu,Fe,Cr,Al,Sn,Si $<$ 5 ppm, La viscosidad dentro del rango de operación según el grado ISO del aceite, pasar la prueba Demulsibilidad $<$ 20 min, TAN $<$ 0.7, % volumen de agua contenida en el aceite $<$ 0.10 %
0,9	mantener el contenido de metales Pb, Cu,Fe,Cr,Al,Sn,Si $<$ 7 ppm, La viscosidad dentro del rango de operación según el grado ISO del aceite, pasar la prueba Demulsibilidad $<$ 25min, TAN $<$ 0.8, % volumen de agua contenida en el aceite $<$ 0.15 %
0,6	mantener el contenido de metales Pb, Cu,Fe,Cr,Al,Sn,Si $<$ 12 ppm, La viscosidad dentro del rango de operación según el grado ISO del aceite, pasar la prueba Demulsibilidad $<$ 30 min, TAN $<$ 0.9, % volumen de agua contenida en el aceite $<$ 0.17 %
0,4	mantener el contenido de metales Pb, Cu,Fe,Cr,Al,Sn,Si $<$ 15ppm, La viscosidad dentro del rango de operación según el grado ISO del aceite, no pasar la prueba Demulsibilidad, TAN $<$ 1, % volumen de agua contenida en el aceite mayor 0.2 %
0,2	mantener el contenido de metales Pb, Cu,Fe,Cr,Al,Sn,Si $<$ 30 ppm, La viscosidad dentro del rango de operación según el grado ISO del aceite, no pasar la prueba Demulsibilidad, TAN $<$ 1,2, % volumen de agua contenida en el aceite mayor 0.25 %

Fuente: Autor.

identificar que tan limpio es el aceite, la condición favorable ideal, el máximo valor es 1,2 factor donde opera el equipo sin tener ninguna afectación o desgaste acelerado que disminuye la vida útil debido a contexto operacional asociados a la lubricación. La

Figura 27 muestra un informe de Terpel, entidad encargada de realizar el análisis a las muestras de aceite de las cajas de rodamiento y chumaceras de los equipos.

Figura 27: Resultados de análisis de muestras de aceite de equipos rotativos.

Equipo	Equipo Funcional	Aceite	Fecha Toma	Código Terpel	Viscosidad 40 ºC	TAN	Agua	Al	Cr	Cu	Fe	Pb	Sn	Si	Demulsibilidad	Comentarios
SP 4751	RODAMIENTO BOMBA	TURBINA 46	26/2/13	2256	46,5	0,2	seco	0	0	1	3	3	0	2	20	La viscosidad y acidez está dentro del rango de operación para el Turbina ISO 46 relacionado (41,4 a 50,6 cSt a 40 ºC). La muestra no presenta aceite húmedo y el aceite pasa la característica demulsibilidad o separación del agua. Los metales por desgaste detectados están dentro de lo permitido.
MP 4701	LADO VENTILADOR	TURBINA 32	6/6/13	7350	33,91	0,2	Húmedo	0	0	4	0	1	0	1	Pasa 25 minut	operación para Turbina ISO 32 (28,8 a 35,2 cSt a 40 ºC). La muestra presenta aceite húmedo y el aceite pasa la característica demulsibilidad o habilidad de separación de agua. Los metales por desgaste detectados son permitidos. Se recomienda hacer cambio del aceite si no se ha realizado
MP 4701	LADO ACOPLE	TURBINA 32	6/6/13	7351	33,83	0,2	Seco	0	0	2	0	2	0	2	Pasa 25 minut	La viscosidad y la acidez está dentro del rango de operación para Turbina ISO 32 (28,8 a 35,2 cSt a 40 ºC). La muestra no presenta aceite húmedo y el aceite pasa la característica demulsibilidad o habilidad de separación de agua. Los metales por desgaste detectados están normales.
MP 4704	LADO VENTILADOR	TURBINA 32	6/6/13	7356	32,46	0,3	húmed	0	0	1	0	1	1	1	Pasa 20 minut	La viscosidad y la acidez está dentro del rango de operación para Turbina ISO 32 (28,8 a 35,2 cSt a 40 ºC). La muestra presenta aceite húmedo y el aceite pasa la característica demulsibilidad o habilidad de separación de agua. Los metales por desgaste detectados están normales. Se recomienda hacer cambio del aceite si no se ha realizado
MP 4704	LADO ACOPLE	TURBINA 32	6/6/13	7357	32,55	0,3	Seco	0	0	2	0	4	0	0	Pasa 20 minut	La viscosidad y la acidez está dentro del rango de operación para el Turbina ISO 32 (28,8 a 35,2 cSt a 40 ºC). La muestra no presenta aceite húmedo y el aceite pasa la característica demulsibilidad o habilidad de separación de agua. Los metales por desgaste detectados son permitidos. Sin embargo, se detectan partículas de plomo. Se recomienda hacer cambio del aceite si no se ha realizado

Fuente: Laboratorios de Terpel.

El contenido de contaminantes presente en el aceite lubricante de cada una de las cajas de rodamientos de las bombas estuvo en control según registro en la Figura 28 con valores promedio por año correspondiente al factor de grado de limpieza del aceite en algunos equipos reportaron valores 0,9 en control debido al desgaste de las partes. En los 13 equipos durante los 7 años el comportamiento fue muy estable muestra un desgaste controlado de las partes lubricadas producto de esto solo 1 equipo registro cambio de rodamiento por desgate la bomba SP4755 presento altos valores de vibración a alta frecuencias.

Figura 28: Registro de contaminantes en el aceite lubricante de las bombas de HDT.

variable de influencia contaminacion en el aceite (F7)								
Equipos	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Promedio
SP4704A	1,1	0,9	1,1	1	1	1,1	0,9	1,0
SP4714A	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1,2	1,2	1,2
SP4701A	1	0,9	0,9	1,1	1	1	1	1,0
SP4751A	1	0,9	1	1	1,1	1	1,1	1,0
SP4752A	1,1	1	1,2	1,2	1,2	1,2	1	1,1
SP4753A	1,1	1	0,9	1	1	1	1	1,0
SP4754A	1,2	1,1	1	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1
SP4755A	1,2	1,2	1	1,1	1	1,1	1	1,1
SP4756A	1	1,1	0,9	1	1,1	1	1	1,0
SP4759A	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1	1	1,1
SP4651A	1,2	1,2	1,2	1,1	1,2	1,2	1	1,2
SP4703A	1,2	1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
SP4705A	1,2	1,1	1,2	1,1	1	1,1	1	1,1

Fuente: Autor.

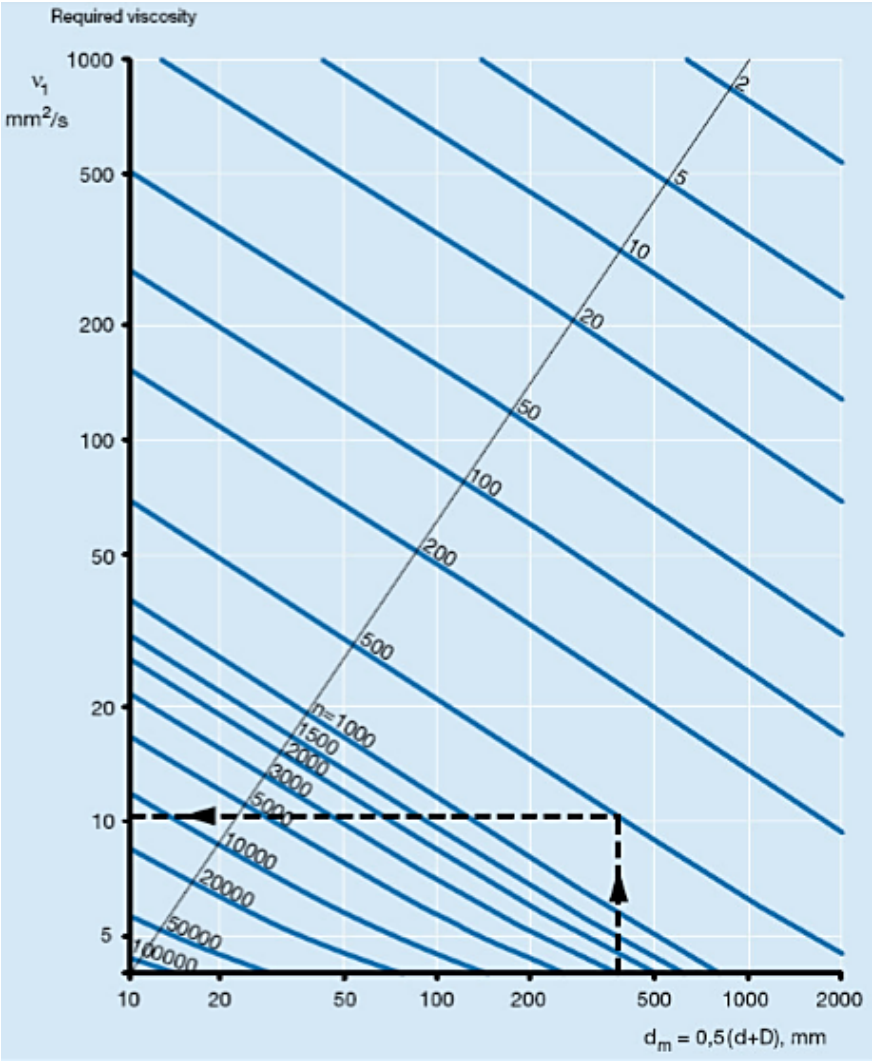
Además de los contaminantes en el aceite se debe tener presente el valor de Kappa que representa la relación entre la viscosidad requerida y la viscosidad proporcionada. Recomendación general: 1 < kappa < 2.5, kappa no debería ser mayor a 4. Donde Kappa (K) esta dada por la ecuación 3.7.

$$k = \frac{v_{proporcionada}}{v_{requerida}} \tag{3.7}$$

La viscosidad es función de la temperatura de operación, del tamaño del rodamiento y de la velocidad de giro. En la Figura 29 se muestra un ejemplo como se halla la viscosidad requerida con el diámetro medio del rodamiento, $d_medio = 0,5 * (d + D)$mm, y se cruza con la velocidad RPM, se traza una línea horizontal hacia la izquierda e identifica el valor de V1 para este caso seria 10 mm^2/s.

Con el valor de V1 y la temperatura de operación se ubica en eje horizontal de la Figura 30 cruce las líneas y el punto de intersección es el valor de la viscosidad mínima requerida para este ejercicio es 28 la cual podríamos utilizar un aceite ISO 32 cumpliría con los parámetros.

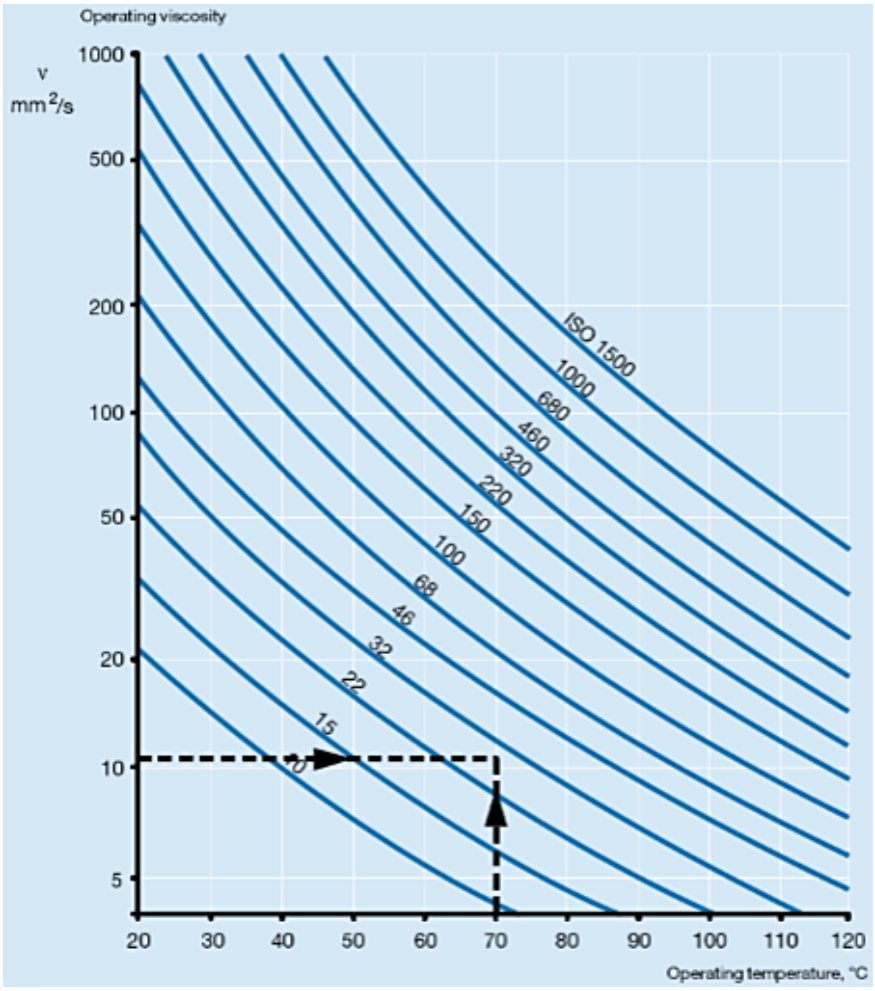
Figura 29: Viscosidad Requerida.



Fuente: www.skf.com.co.

Nuestro objetivo es tener para nuestros equipos una curva de vida positiva Figura 31 se presenta cuando la tendencia al desgaste es menor que la especificada por el fabricante de la máquina para los distintos componentes que la constituyen, por tanto, se debe asegurar que el aceite lubricante no tenga ningún contaminante que podría presentar una tendencia al desgaste superior a la normal con consecuencia a la reducción de la vida disponible mostrado en la Figura 32 una curva de vida negativa.

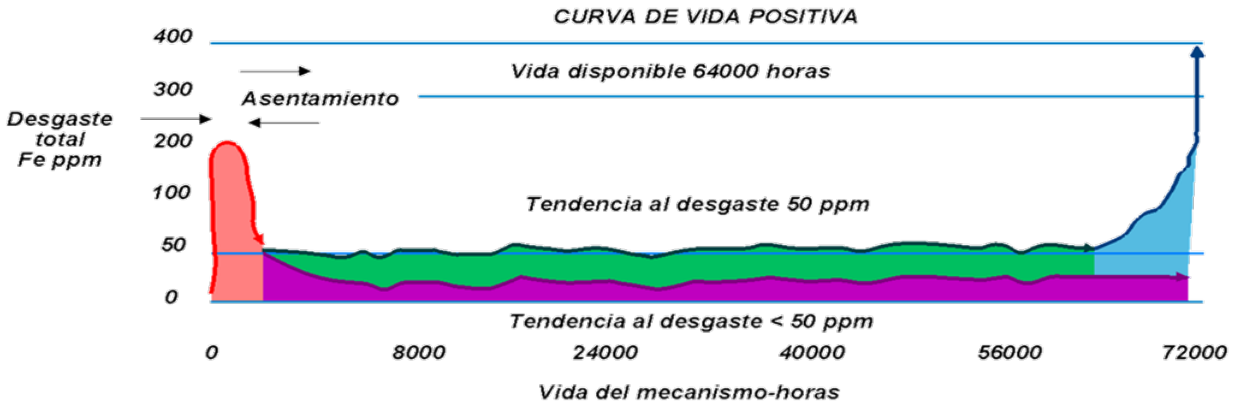
Figura 30: Viscosidad Operativa.



Fuente: www.skf.com.co.

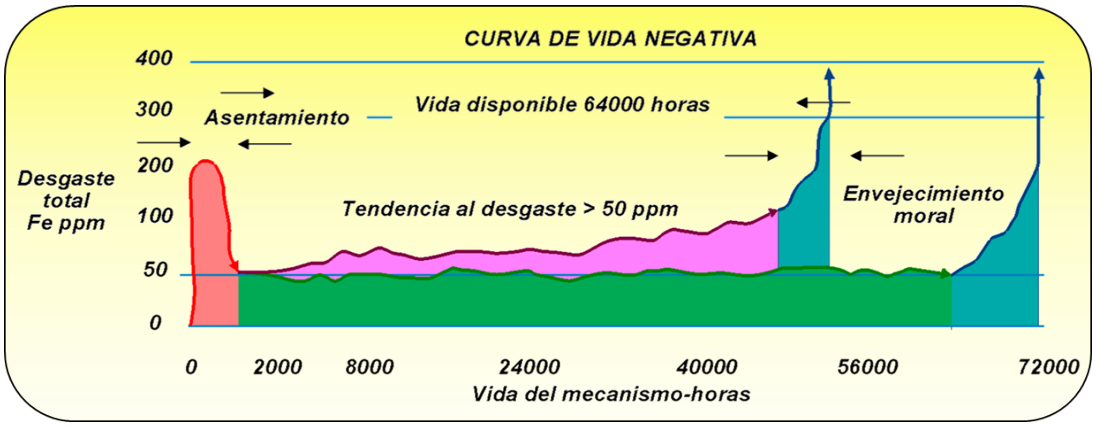
Nota: la frecuencia de cambio del aceite la determina la tendencia al desgaste erosivo del mecanismo, la cual la especifica el fabricante y en caso tal de que no se conozca es necesario determinarla mediante el análisis periódico del contenido de metales en ppm presentes en el aceite cada vez que éste se cambia. Los factores que más inciden para que el mecanismo alcance su vida a la fatiga, para que sea mayor ó para que ésta se reduzca considerablemente son la calidad del aceite.

Figura 31: Curva de vida positiva.



Fuente: Conferencia control de desgaste [4].

Figura 32: Curva de vida negativa.



Fuente: Conferencia control de desgaste [4].

3.3. CORROSIÓN EN BOMBAS

La corrosión en el seno de las bombas suele ser debido a la naturaleza del fluido a bombear, su temperatura, el nivel de oxígeno presente y del material, frecuentemente aceros inoxidables, del que esté fabricada la bomba. El resultado de la corrosión en las bombas es una pérdida de material que perjudica al circuito aguas arriba y reduce la cabeza. En una bomba pueden convivir distintos tipos de daños por corrosión que pueden combinarse de distintas maneras degradando en mayor o menor medida el equipo.

3.3.1. Corrosión con erosión

En los metales pertenecientes a la bomba es de esperar que se forme una capa de corrosión, especialmente en aquellas que sirven para impeler fluidos agresivos. Dicha capa suele ser friable y puede desprenderse fácilmente con la acción del fluido, su desaparición provoca turbulencias en el flujo que facilitan aún más el cizallamiento.

3.3.2. Corrosión localizada por picadura

Suele ser debido al pH de la solución a bombear, al material de la bomba y a la presencia de organismos. En aceros inoxidables es la capa de pasivación formada por el cromo la que puede desaparecer originando zonas de distintos potenciales y facilitando la corrosión por picadura. Cuando se produce la corrosión por picadura, la alteración del material se da de manera localizada en distintos puntos de la superficie. Éste es un tipo de corrosión, en algunos casos, difícil de detectar y de pronosticar su evolución. Si el punto de corrosión está en un lugar crítico puede inducir el fallo de una pieza o elemento de importancia para el sistema que ocupe. Las picaduras pueden conllevar fallos por fatiga y grietas en el material dado que induce efectos de concentración de tensiones en la superficie metálica. La durabilidad de la capa de pasivación dependerá de la cantidad de oxígeno presente en fluido, cuanto mayor sea el contenido en oxígeno mayor será la regeneración de la capa de pasivación, sin embargo, cuando la cantidad de oxigeno es pobre la corrosión se facilitará dependiendo del pH del fluido.

3.3.3. Corrosión localizada en rendijas

Por distintas causas pueden existir rendijas en las bombas que impidan el trasporte del oxígeno hasta las zonas donde se encuentra el acero inoxidable. Esto impide la regeneración de la capa de pasivación y facilita la aparición de corrosión, normalmente esto suele ocurrir en zonas en que se encuentran juntas, cierres mecánicos, etc. En este caso es también el pH del fluido el responsable principal de la corrosión.

3.3.4. Corrosión con agrietamiento

La formación de gritas debido a la corrosión en bombas es muy peligrosa debido a que el fallo se produce de forma inminente y sin aviso aparente. Para producirse requiere cuatro

condiciones básicas: medio corrosivo, material susceptible, temperatura suficiente y tensiones residuales. Por ejemplo, un acero de inoxidable puede encontrar su umbral de temperatura crítica entre los 60 y 70 °C en un entorno con Cloro.

3.3.5. Corrosión con cavitación

Las implosiones del vapor formado cerca de las superficies metálicas de la bomba arrancan la capa de pasivación del material y en función de las condiciones que se den en el seno de la bomba ésta tardará más o menos tiempo en regenerase.

Para definir los parametros de control de la velocidad de corrosion por el fluido a bombear de cada una de las bombas centrifugas se tomo como referencia las norma API 581 de S-RBI Degradation Librtary agosto 2004, y ademas las ventanas operativas definidas por la autoridad tecnica de refineria de barrancabermeja, mostrada en la Tabla 6.

Tabla 6: Guias y ventanas para control de corrosion.

Velocidad de Corrosión:	**mpy**
Ventana Operativa Estándar	5
Ventana Operativa Crítica	10
Guía de control	4

Fuente: Autor.

Se revisaron las ventanas de operación de los diferentes fluidos que generan corrosión, a alta temperatura por ácido sulfhídrico y naftenico, amina, oxidación de alta temperatura, erosión, acido hidroclórico, acido sulfúrico utilizando libro de Shell que contiene API 581 de S-RBI.

Para acero carbono 3mm para desgaste por año de 0,125 in, en promedio 4 mpy para una vida útil de 32 años. En acero inoxidable 3,9 mpy, un desgaste de 0,03 mm cada año.

Se definió valores muy conservadores mostrados en la Tabla 7 correspondientes al factor de corrosión referente al fluido a bombear. Para medir la velocidad de corrosión generada por el fluido a bombear se tiene instalados 7 cupones en el circuito de la planta, se lleva un

Tabla 7: Factor de velocidad de corrosión.

Factor F6	Velocidad de corrosión mpy
1.2	1 - 1.5
1.1	1.5 - 2
1	2 - 2.5
0.8	2.5 - 3
0.6	3.5 - 4
0.2	4.5 - 5

Fuente: Autor.

registro mensual de la velocidad de corrosión en todos los cupones instalados. En la Figura 33 se tiene el consolidado promedio Durante el periodo del año 2011 al 2016.

El comportamiento fue muy estable con valores ideales de 1,2 durante los 6 años con referente a la velocidad de corrosión generada por el fluido a bombear, ninguno de los 13 equipos tiene problemas por corrosión, ni hubo fallas por esta variable durante los 6 años de operación de la planta, sin embargo es una variable crítica.

3.4. TEMPERATURA CAJA DE RODAMIENTOS Y CHUMACERAS

La temperatura de la caja de rodamiento y chumacera es calor generado durante la operación de la parte rotativa y la estacionaria y está relacionada principalmente que tan eficiente es la lubricación de las partes. Cuando el lubricante está contaminado con partículas sólidas produce un aumento de temperatura y la vida del rodamiento puede ser más corta.

Un resumen de la Norma ISO 281 de los diferentes factores de influencia para generar mayor calor en el rodamiento o cojinete son.

- Operar sobre el límite de carga de fatiga.
- Un ajuste de anillo interior da lugar a tensiones fricción en el aro.
- Al aumentar la temperatura reduce el límite de esfuerzo de fatiga del material, es decir su resistencia.

Figura 33: Valores promedio anual de velocidad de corrosión en mpy.

PLANTA	TAG RIS	TECNICA	METALURGIA	TIPO DE VARIAB	MONITOREO A CARGO DE	PROMEDIO 2011	Promedio 2012	Promedio 2013	Proemdio 2014	promedio 2015	Promedio 2016
U-4700: HIDROTRATAMIENTO DE DIESEL	E-4704A DIESEL	CUPÓN	ACERO AL CARBONO	INTEGRIDAD	NALCO	1,7745	1,864167	1,7433	1,46	1,25	1,292
U-4700: HIDROTRATAMIENTO DE DIESEL	E-4704B DIESEL	PROBETA	ACERO AL CARBONO	INTEGRIDAD	NALCO	1,7018	1,000143	0,6892	0,9	1,19	1,444
U-4700: HIDROTRATAMIENTO DE DIESEL	E-4704C DIESEL	CUPÓN	ACERO AL CARBONO	INTEGRIDAD	NALCO	1,77	1,825	1,4483	1,21833	1,35	1,454
U-4700: HIDROTRATAMIENTO DE DIESEL	E-4704D DIESEL	CUPÓN	ACERO AL CARBONO	INTEGRIDAD	NALCO	1,8136	1,874167	1,4108	1,16417	1,23	1,34
U-4700: HIDROTRATAMIENTO DE DIESEL	E-4705 DIESEL	CUPÓN	ACERO AL CARBONO	INTEGRIDAD	NALCO	1,8064	1,7925	1,3633	1,115	1,23	1,346
Equipos del circuito de diesel SP4704,SP4705,SP4703,SP4714,SP4701,SP4759					PROMEDIO	1,7733	1,671195	1,331	1,1715	1,25	1,3752
U-4750: HIDROTRATAMIENTO DE GASOLINA	E-4761 GASOLINA	CUPÓN	ACERO AL CARBONO	INTEGRIDAD	NALCO	1,7291	1,85	1,7158	1,14833	1,31	1,29
U-4750: HIDROTRATAMIENTO DE GASOLINA	E-4762 GASOLINA	CUPÓN	ACERO AL CARBONO	INTEGRIDAD	NALCO	1,7391	1,9	1,4092	1,14083	1,23	1,338
Equipos del circuito de Gasolina SP4751-SP4752-SP4753-SP4754-SP4755-SP4756					PROMEDIO	1,7341	1,875	1,5625	1,14458	1,27	1,314

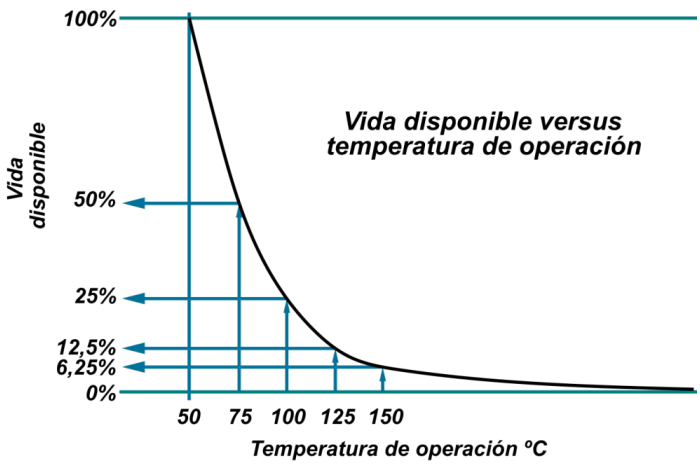
Fuente: Autor.

- Una fina película de aceite aumenta las tenciones en la región de contacto entre la pista de rodadura y el elemento rodante.

- Demasiado lubricante en los rodamientos haría que consuma anergia adicional al obstruir su giro.

El aumento de temperatura nos indica que hay una variación de la operación además que la viscosidad del aceite se ve afectada directamente. Esta variable es un factor de entrada de la red neuronal una variación me indica que algo está fallando. En la Figura 34 indica que un aumento de 25 °C reduciría 50 % la vida disponible en el rodamiento.

Figura 34: Vida disponible en un rodamiento Vs temperatura operación.



Fuente: [4].

Los fabricantes de rodamiento manifiestan que el aceite no contaminado tiene una vida útil de 30 años a 30°C, por cada 10°C en aumento de temperatura la vida del lubricante se reduce a la mitad, eso significa que a 100 °C el lubricante tendrá una vida de 90 días.

La Norma AGMA (asociación americana de fabricantes de engranajes) especifica como valor ideal no debe ser mayor a 50°C la temperatura de operación real de trabajo, pero puede ser ligeramente mayor de acuerdo con los estándares especificados por los fabricantes para un determinado mecanismo en particular.

Además de la norma, se tomó como referencia la temperatura de operación real de los equipos que llevan más de 5 años sin fallar ningún componente, para determinar los valores del factor 4 mostrado en la Figura 35, además de la experiencia de los ingenieros de equipo rotativo de la refinería de Barrancabermeja.

Con base en la Figura 35 de estandarización de F4, se realizó la base de datos de temperatura de la caja de rodamientos para las 13 bombas. En general, el comportamiento de la temperatura de operación de las cajas de rodamiento de las 13 bombas es muy estable y el incremento por el desgaste natural de las partes fue muy leve, la bomba SP4704A opero con alta temperatura por la radiación del producto que maneja a 620°F manteniendo en promedio el mismo valor de operación, pero es una condición que disminuye la vida útil de las partes teniendo fallas en tiempos menores a 2 años en este caso.

Figura 35: Estandarización factor temperatura caja de rodamiento y chumacera.

Factor F4	Temperatura caja de rodamiento y chumacera °F (aceite mineral)	Temperatura caja de rodamiento y chumacera °F (aceite sintético)
1,2	90 - 110	90 - 130
1,1	110 - 130	130 - 140
1	130 - 140	140 - 160
0,9	140 - 150	160 - 170
0,8	150 - 160	170 - 180
0,7	160 - 165	180 - 190
0,6	165 - 170	190 - 200
0,5	170- 175	200 - 210
0,4	175 - 180	210 - 220
0,2	180 - 200	220 - 240

Fuente: Autor.

3.5. DESVIACIÓN DEL FLUJO

Da una medida de que tan fluctuante es el caudal que entrega la bomba, e indica si este trabajo por mayor o menor tiempo en estados de flujo mínimo o flujo máximo. Esta variable nos indica que tan constante es el flujo de la bomba el cual influye directamente en los otros factores que afectan la vida útil del equipo. Para determinar los parámetros de la Tabla 8 se tomó como referencia el comportamiento real del flujo de los equipos que llevan más de 5 años operando sin presentar fallas en ningún componente.

3.6. PUNTO DE MEJOR EFICIENCIA (BEP)

Idealmente, una bomba centrífuga debe ser operada en o cerca de su mejor punto de eficiencia (BEP) de flujo con el fin de disminuir las cargas radiales (ver Figura 36) por consiguiente las vibraciones Y temperatura, aumentando la vida útil de los componentes de la bomba.

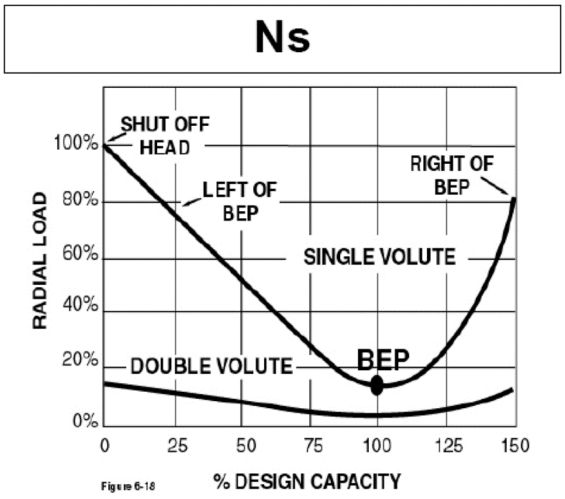
Todas las bombas centrífugas tienen puntos dulces más allá del BEP que darán una eficiencia y fiabilidad aceptables. Existen limitaciones, sin embargo, en los caudales mínimo y máximo, más allá del cual las bombas no deben ser operadas continuamente (o durante un periodo de tiempo prolongado), para evitar fallos prematuros.

Tabla 8: Parámetros de desviación de flujo.

Factor (F2)	**Desviación flujo (%)**
1,2	1 % - 2 %
1,1	2 % - 3 %
1	3 % - 4 %
0,9	4 % - 6 %
0,8	6 % - 10 %
0,7	10 % - 13 %
0,6	13 % - 17 %
0,5	17 % - 20 %
0,4	25 % - 30 %
0,3	30 % - 40 %
0,2	40 % - 50 %
0,1	50 % - 60 %

Fuente: Autor.

Figura 36: Relación entre cargas radiales y flujo.



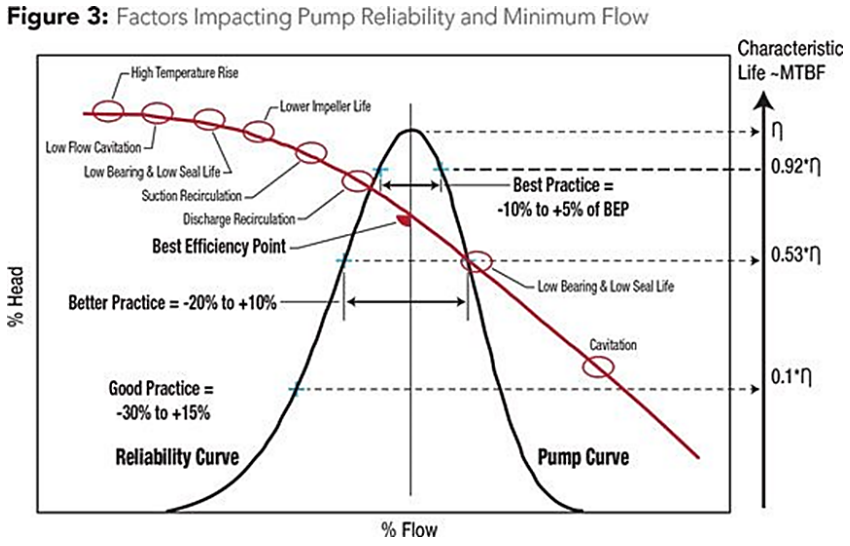
Fuente: Seminario Larry bachus.

Se debe identificar la región de funcionamiento preferida (POR) y de la zona de funcionamiento permisible (AOR) es la gama de caudales en los que la vida útil de una bomba no se ve gravemente comprometida y es típicamente especificada por el fabricante de la bomba. Una vez conocidas estas regiones de flujo y las verdaderas condiciones del sistema, se pueden tomar medidas para maximizar el funcionamiento de la bomba en el POR y evitar o mini-

mizar la operación fuera del AOR, optimizando así los costos del ciclo de vida de la bomba.

El flujo de la bomba permanece bien controlado dentro de un rango de caudales alrededor del BEP, designado como POR. Dentro de esta región, la vida útil no será afectada significativamente por las cargas hidráulicas, vibración o separación de flujo. El POR para la mayoría de las bombas centrífugas está entre el 70 y el 120 por ciento de BEP, excepto para bombas de alta velocidad de succión que pueden tener regiones de flujo preferidas aún más pequeñas alrededor del BEP. La fiabilidad de la bomba alcanza un máximo del 90 por ciento del caudal de eficacia óptima y cae muy rápidamente de este caudal, especialmente a caudales más elevados ver Figura 37.

Figura 37: Factores impactan la confiabilidad de la bomba.



Fuente: Avoiding cavitation [12].

El AOR es la gama de caudales en los que la vida útil de una bomba no se ve gravemente comprometida y es típicamente especificada por el fabricante de la bomba. La vida útil dentro del AOR será menor que dentro del POR. El nivel de energía de la bomba (energía de succión y energía de descarga), margen NPSH, velocidad específica de la bomba, velocidad específica de succión y tipo de bomba influyen todos los factores específicos que establecen el AOR.

La recomendación de la norma API 610, como concepto, es válida para todas las bombas

centrífugas, sin embargo, el rango definido por esta (70 % - 120 %) a pesar de ser un criterio conservador, si la bomba no es API, no aplica siempre, debido a que la relación de vibración y flujo de la máquina depende de cada diseño (Fabricante) e industria de aplicación, pero, si es una guía que puede ayudar a definir la ventana óptima de operación en un rango más amplio o más cerrado.

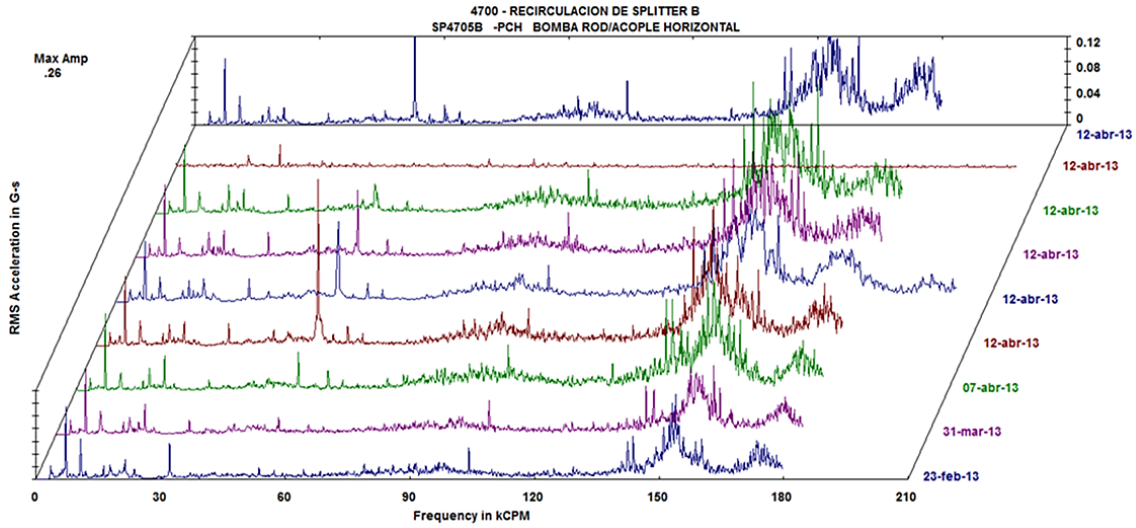
Para corroborar lo anterior se realizó prueba con la bomba SP4705B variando el flujo y monitoreando las vibraciones para identificar el punto de mejor BEP , los resultados se muestran en la Figura 38 y Figura 39 espectro del punto PCH operando al flujo del 122 % de su BEP, según curva el BEP es 375 gpm.

Figura 38: Prueba de variación de flujo bomba SP4705B.

Condiciones operacionales de la Corrida SP4705B								Flujo correspondiente por curva	
FIC028 [BPD]	% Apertura	% Apertura FIC029	T [°F]	Ps [psig]	Pd [psig]	ΔP [psig]	Cabeza [Ft]	gpm	BPD
12051	49,70%	4%	160	11	210	199	610,00	436	14951,3
14024	54,88%	5%	139	11	205	194	595,00	445	15259,9
14500	56,80%	5%	144	10,5	200	189,5	581,00	442	15157,0
15025	58,90%	4,50%	155	10,5	195	184,5	566,00	456	15637,1

Fuente: Autor.

Figura 39: Espectro punto PCH de la SP4705.



Fuente: Autor.

Los resultados de la prueba indican al operar en el punto 122 % está en la región preferida

registrando valores mínimos de vibración.

Para determinar los parámetros de la Tabla 9 se tiene como referencia además de la prueba y las normas API 610 el punto de operación del flujo de los equipos que llevan más de 5 años operando sin presentar fallas en ningún componente. Con base en la Tabla 9 se

Tabla 9: Rangos de Punto de mejor eficiencia (BEP).

Factor (F1)	**Punto de mejor eficiencia (BEP)**
0,2	125 % - 130 %
0,4	120 % - 125 %
0,8	115 % - 120 %
1	110 % - 115 %
1,1	105 % - 110 %
1,2	100 % - 105 %
1,1	100 % - 90 %
1	90 % - 80 %
0,9	80 % - 70 %
0,8	70 % - 60 %
0,6	60 % - 50 %
0,4	50 % - 40 %
0,2	40 % - 20 %

Fuente: Autor.

calculó los valores promedio trimestrales de flujo según BEP de las 13 bombas.

3.7. PARÁMETROS DE VIBRACIÓN

La vibración es un movimiento oscilatorio de pequeña amplitud. Todos los cuerpos presentan una señal de vibración en la cual plasman cada una de sus características. De acuerdo a esto, las máquinas presentan su propia señal de vibración y en ella se encuentra la información de cada uno de sus componentes. Por tanto, una señal de vibración capturada de una máquina significa la suma vectorial de la vibración de cada uno de sus componentes.

3.7.1. Monitoreo de vibraciones y señales de muy alta frecuencia

El control y análisis de vibraciones espectral es la herramienta principal del Mantenimiento Predictivo, se basa en que las máquinas tienen un nivel normal de vibración, como

resultado de estar dentro de las tolerancias de las especificaciones de fabricación, montaje y operación. Sí hay algún parámetro fuera de especificación entonces es una falla que causará el incremento del nivel de vibración, esta falla puede ser identificada por su comportamiento dinámico (amplitud, frecuencia y ángulo de fase).

La medición a muy alta frecuencia es utilizada para detectar defectos incipientes en: rodamientos, engranajes, ejes y cojinetes por rozamiento al fallar la lubricación, cavitación, solturas, etc. El mantenimiento de una máquina depende de los niveles máximos tolerables de vibración espectral o de señales de muy alta frecuencia, establecidos sobre la base de estándares internacionales de máquinas similares o que son calculados en forma estadística en base a los valores históricos tomados en dicha planta.

3.7.2. Predicción de fallas

El objetivo de cualquier programa de monitoreo de vibración es seleccionar las mediciones que proporcionen la mayor sensibilidad a cualquier cambio en la condición de la máquina. El análisis racional de los datos nos permitirá detectar las fallas aun cuando son incipientes.

Las fallas tienen comportamientos espectrales característicos que puede presentar una máquina tales son.

Desbalanceo: El espectro presenta vibración dominante con una frecuencia igual a 1 X RPS del rotor.

Desalineación: Ocurre cuando el eje del motor y el eje conducido unidos en el acople, no son paralelos. Caracterizado por altas vibraciones axiales. 1X RPS y 2X RPS son las más comunes, con desfase de 180 grados a través del acople. También se presenta 3X RPS. Estos síntomas también indican problemas en el acople.

Holgura mecánica eje-agujero: Aflojamiento de manguitos, tolerancias de manufactura inadecuadas (con juego), y holgura entre el impulsor y su eje en bombas. Causa un truncamiento en la forma de onda en el dominio del tiempo. La falla genera múltiples armónicos y subarmónicos de 1X RPS, destacándose los armónicos fraccionarios 1/2 X, 1/3 X, 1.5 X, 2.5 X, ... Frecuentemente la fase es inestable y el nivel máximo tiende a una dirección notable realizando lecturas radiales espaciadas 30 grados entre si.

Soltura estructural: Ablandamiento o desplazamiento del pie de la máquina, por holgura en los pernos de la base o por deterioro de los componentes de la sujeción. El espectro presenta vibración a 1X RPS en la base de la máquina con desfase a 180 grados entre los elementos sujetados en el anclaje. Altamente direccional en la dirección de la sujeción.

Excentricidad: Fácilmente confundible con desbalanceo. Ocurre cuando el centro de rotación no coincide con el centro geométrico en una polea o engranaje. La mayor vibración ocurre a 1 X RPS del elemento con excentricidad, en dirección de la línea que cruza por los centros de los dos rotores.

Rotor o eje pandeado: Más común en ejes largos. Se produce por esfuerzos excesivos en el eje. Genera Vibración AXIAL alta con diferencia de fase de 180 grados medida en los dos soportes del rotor. La vibración dominante es de 1X RPS si el pandeo está cercano al centro del eje, y es de 2X RPS si el pandeo está cerca del rodamiento.

Resonancia: Ocurre cuando la velocidad de una fuerza conducida iguala la frecuencia natural de una estructura o una parte de ella. Puede causar dramáticas amplificaciones de la amplitud lo que puede terminar en fallas prematuras y posiblemente catastróficas.

Falla engranaje: El espectro mostrará armónicos 1 X y 2 X RPS del piñón conductor y de la rueda conducida. Adicionalmente, mostrará bandas laterales alrededor de la Frecuencia de Engrane GMF (Gear Mesh Frecuency).

Bandas: Ocurre por sobrepaso de la vida útil de la banda, o por desgaste excesivo de la misma. Las frecuencias de bandas siempre están por debajo de la frecuencia del motor o máquina conducida. Normalmente se encuentran cuatro picos y generalmente predomina el de 2x frecuencia de banda. Tienen amplitudes inestables.

Desalineación en poleas: Puede ocurrir porque los ejes de las poleas no están alineados o porque las poleas no están paralelas. También pueden ocurrir ambos casos simultáneamente. Produce alta vibración axial a 1x RPS de la conductora o la conducida, generalmente la conducida.

Falla pista interna: Agrietamiento del material en la pista interna, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente. Se produce una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X RPS la frecuencia de falla de la pista interna, en dirección radial. Además, el contacto metal - metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1-10 KHz.

Falla pista externa: Agrietamiento del material en la pista externa, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente. Se produce una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X RPS la frecuencia de falla de la pista externa, en dirección radial. Además, el contacto metal - metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1-10 KHz.

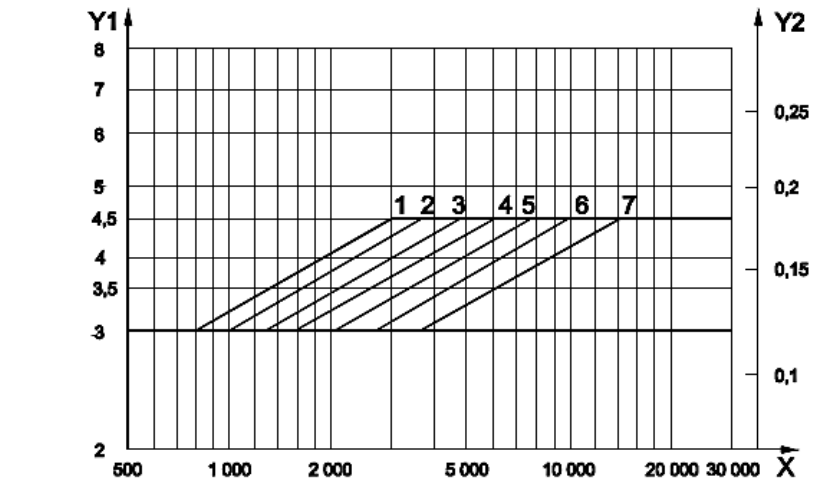
Falla en elementos rodantes: Agrietamiento del material en los elementos rodantes, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente. Se produce una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X RPS la frecuencia de falla de los elementos rodantes, en dirección radial. Además, el contacto metal - metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1-10 KHz.

Los parámetros de severidad de la vibración asociada a un rango de clasificación en particular, depende del tamaño y masa del cuerpo vibrante según la norma API 610 ver Figura 40.

La Figura 41 podremos tener otra referencia dada por la norma API 610 para determinar la severidad en las bombas centrifugas.

Además de las normas API 610 se monitoreo los equipos SP4703 Y SP4759 operando en su BEP registrando valores de 0,03 in/sec. Por lo anterior se definieron parámetros de control de vibración en la Tabla 10, los cuales se emplearon para calcular la base de datos de factor de vibración para las 13 bombas.

Figura 40: Parámetros de severidad de vibración norma API 610.



Key

X rotational speed, expressed in revolutions per minute

Y1 vibrational velocity, expressed in millimetres per second, RMS

Y2 vibrational velocity, expressed in inches per second, RMS

1 $P \geq 3\,000$ kW/stage

2 $P = 2\,000$ kW/stage

3 $P = 1\,500$ kW/stage

4 $P = 1\,000$ kW/stage

5 $P = 700$ kW/stage

6 $P = 500$ kW/stage

7 $P \leq 300$ kW/stage

Fuente: Norma API 610 septiembre 2010.

Tabla 10: Estándares de vibración.

Factor (F5)	**OVERALL VALUE IN/SEC**
1.2	$\leq$ 0,04
1.1	0,04 - 0,06
1	0,07 - 0,10
0,9	0,11 - 0,12
0,8	0,13 - 0,15
0.6	0,16 - 0,19
0,4	0,20 - 0,30

Fuente: Autor.

Figura 41: Rangos de severidad para bombas centrifugas.

Criteria	Location of vibration measurement	
	Bearing housing (see Figures 31 and 33)	Pump shaft (adjacent to bearing)
	Pump bearing type	
	All	Hydrodynamic journal bearings
	Vibration at any flowrate within the pump's preferred operating region	
Overall	For pumps running at up to 3 600 r/min and absorbing up to 300 kW (400 hp) per stage: $v_u \leq 3{,}0$ mm/s RMS (0,12 in/s RMS) For pumps running above 3 600 r/min or absorbing more than 300 kW (400 hp) per stage: see Figure 34	$A_u \leq (5{,}2 \times 10^6/n)^{0{,}5}$ µm peak-to-peak [(8 000/n)$^{0{,}5}$ mils peak-to-peak] Not to exceed: $A_u \leq 50$ µm peak-to-peak (2,0 mils peak-to-peak)
Discrete frequencies	$v_f \leq 2{,}0$ mm/s RMS (0,08 in/s RMS)	for $f < n$: $A_f \leq 0{,}33 A_u$
Allowable increase in vibration at flows outside the preferred operating region but within the allowable operating region	30 %	30 %

Power calculated for BEP of rated impeller with liquid relative density (specific gravity) equal to 1,0.

Vibration velocity and amplitude values calculated from the basic limits shall be rounded off to two significant figures

where

- v_u is the measured overall velocity;
- v_f is the discrete frequency velocity, measured with a FFT spectrum using a Hanning window and a minimum frequency resolution of 400 lines;
- A_u is the amplitude of measured overall displacement;
- A_f is the amplitude of displacement at discrete frequencies, measured with a FFT spectrum using a Hanning window and a minimum frequency resolution of 400 lines;
- f is the frequency;
- n is the rotational speed, expressed in revolutions per minute.

Fuente: Norma API 610 septiembre 2010.

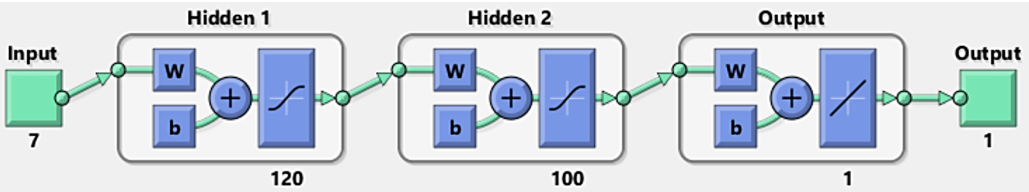
4. DESARROLLO DEL MODELO EN MATLAB

En el programa Matlab se implementaron 4 modelos de red neuronal artificial para la predicción o estimación del tiempo de vida remanente para bombas centrífugas, utilizando 4 arquitecturas de red neuronal diferebtes: Red neuronal Feedforward, Red Narx, Red Recurrente (Layer-recurrent) y Red basada en retardos de tiempo (Focused Time Delay Network).

4.1. RED NEURONAL FEED-FORWARD

La red neuronal Feedforward utilizada para la predicción del tiempo de vida remanete es una red con cuatro capas: una capa de entrada de 7 neuronas, dos capas ocultas que emplean una función de activación tipo tan-sigmoid, la primera capa oculta con 120 neuronas y la segunda con 100, y finalmente una capa de salida de una sola neurona con función de activación purelin, como muestra la Figura 42.

Figura 42: Arquintetura de la red neuronal Feed-Forward.



Fuente: Autor.

4.1.1. Descripción código de Matlab - Feedforward

El programa de Matlab desarrollado con base en la documentación de feedforwardnet [27], sigue la siguiente secuencia:

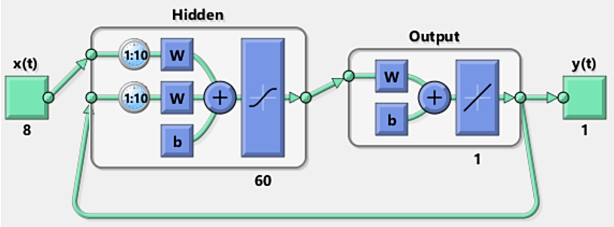
1. Se cargan los datos de entrenamiento de la red neuronal del archivo de Excel DATOS_FF.xlsx.
2. Se dividen los datos cargados en una matriz de patrones de entrenamiento y otra de targets.
3. Se crea la red neuronal de tipo Feedforward mediante el comando feedforwardnet([120,100]), con dos capas ocultas, la primera de 120 neuronas y la segunda de 100 neuronas.
4. Se entrena la red neuronal creada con los patrones y los targets.
5. Se evalúan las respuestas de salida de la red neuronal, calculando el error de cada patrón y graficándolo, ver Figura 47.
6. Se realiza la gráfica de salidas de la red neuronal (predicción), junto con los targets, ver Figura 46.
7. Se cargan los datos de validación y prueba de la red Feedforward del archivo de Excel BOMBA_FF.xlsx, cada patrón de prueba con los 7 factores promediados trimestralmente formando una columna.
8. Se calcula la predicción de vida útil remanente de la bomba de prueba en años, con base en las salidas de la red neuronal Feedforward para cada patrón de entrada de 7 factores.
9. Se realiza la gráfica de predicción para la bomba, ver Figura 53, que muestra el comportamiento de la predicción, según los patrones de entrada para la bomba de prueba.
10. Finalmente, se toma el valor final de la predicción como la salida de vida útil restante para la bomba, la cual se convierte a formato de años y días para ser mostrada en pantalla del Command Window, ver Figura 54.

4.2. RED NEURONAL NARX

La red neuronal Narx utilizada para la predicción del tiempo de vida remanete en bombas centrífugas es una red con tres capas: una capa de entrada de 8 neuronas, una capa oculta de 60 neuronas que recibe alimentación de la capa de entrada con 10 retardos y de la capa de salida que también tiene 10 retardos de recurrencia, en ciclo cerrado; la capa oculta trabaja

con una función de activación tipo tan-sigmoid, y finalmente, una capa de salida con una sola neurona con función de activación purelin, como muestra la Figura 43.

Figura 43: Arquintetura de la red neuronal Narx.



Fuente: Autor.

4.2.1. Descripción código de Matlab - red Narx

El programa de Matlab desarrollado con base en la documentación de narxnet [29], sigue la siguiente secuencia:

1. Se cargan los datos de entrenamiento de la red neuronal del archivo de Excel DATOS_RED.xlsx

2. Se dividen los datos cargados en una matriz de patrones de entrenamiento y otra de targets, los cuales se convierten a una secuencia de vectores para el entrenamiento.

3. Se crea la red neuronal de tipo Narx mediante el comando narxnet([1:10],[1:10],60), con 10 retardos de entradas, 10 retardos de recurrencia y 60 neuronas.

4. Se preparan los datos de entrenamiento y se entrena la red neuronal creada.

5. Se evalúan las respuestas de salida de la red neuronal, calculando el error de cada patrón y se grafica como error de entrenamiento, ver Figura 51.

6. Se realiza la gráfica de salidas de la red neuronal (predicción), junto con los targets, ver Figura 50.

7. Se cargan los datos de validación y prueba de la red neuronal Narx del archivo de Excel BOMBA.xlsx, cada patrón de prueba con los 7 factores promediados trimestralmente formando una columna y estos datos se convierten a secuencia de vectores.

8. Se calcula la predicción de vida útil remanente de la bomba de prueba en años, con base en la secuencia de patrones de prueba.

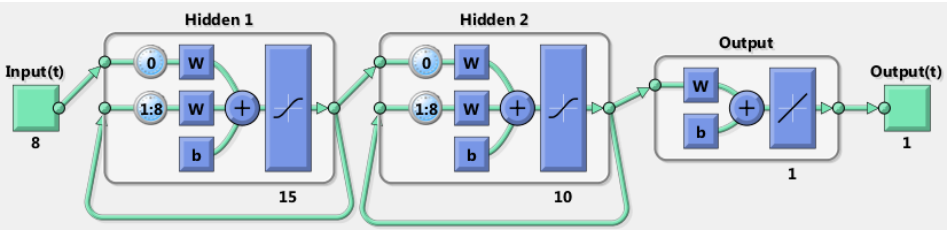
9. Se realiza la gráfica de predicción para la bomba, ver Figura 55, que muestra el comportamiento de la predicción.

10. Finalmente, se toma el valor final de la predicción como la salida de vida útil restante para la bomba, la cual se convierte a formato de años y días para ser mostrada en pantalla del Command Window, ver Figura 56.

4.3. RED NEURONAL RECURRENTE (LAYER RECURRENT NETWORK)

La red neuronal recurrente que se implementó con base en la documentación de Matlab sobre layrecnet [28], para la predicción del tiempo de vida remanente en bombas centrífugas es una red con 4 capas: una capa de entrada de 8 neuronas, dos capas ocultas, la primera de 15 neuronas y la segunda de 10 neuronas; cada capa oculta con 8 retardos de recurrencia de la misma capa y función de activación tipo tan-sigmoid, y finalmente, una capa de salida con una sola neurona con función de activación purelin, como muestra la Figura 44.

Figura 44: Arquintetura de la red neuronal recurrente.



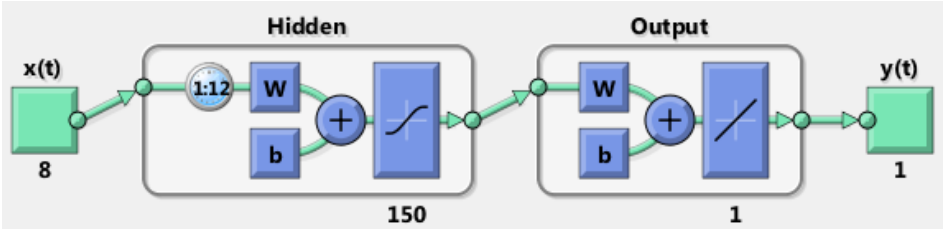
Fuente: Autor.

4.4. RED NEURONAL BASADA EN RETARDOS DE TIEMPO

La red neuronal basa en retardos de tiempo que se implementó con base en la documentación de Matlab sobre timedelaynet [30], para la predicción del tiempo de vida remanente

en bombas centrífugas es una red con 3 capas: una capa de entrada de 8 neuronas, una capa oculta de 150 neuronas, con 12 retardos de la capa de entrada y función de activación tipo tan-sigmoid, y finalmente, una capa de salida con una sola neurona con función de activación purelin, como muestra la Figura 45.

Figura 45: Arquintetura de la red neuronal basada en retardos de tiempo.



Fuente: Autor.

4.5. ENTRENAMIENTO DE LAS REDES NEURONALES

Para entrenar los modelos de predicción de vida útil remanente basados en red neuronal artificial, se crearon dos bases de datos en Excel, DATOS_FF y DATOS_RED, la primera fue empleada para alimentar la red neuronal Feedforward y la segunda para alimentar los modelos basados en red neuronal dinámica: la red neuronal recurrente, la basada en retardos de tiempo y la red neuronal Narx. Proporcionando un total de 325 patrones de entrenamiento, con sus correspondientes targets u objetivos, los cuales corresponden a la información recopilada durante 6 años y tres meses de cada una de las 13 bombas que cumplieron con las especificaciones del modelo para entrenar la red, las fallas serian asociadas al desgaaste norman de la operación, y no a errores de diseño o humanos. Cada patrón de entrenamiento con sus 7 datos de los factores operacionales y su correspondiente target o salida. Estos patrones automáticamente son divididos en unos patrones de entrenamiento y unos de prueba para validar el entrenamiento de la red neuronal.

Normalización de los datos

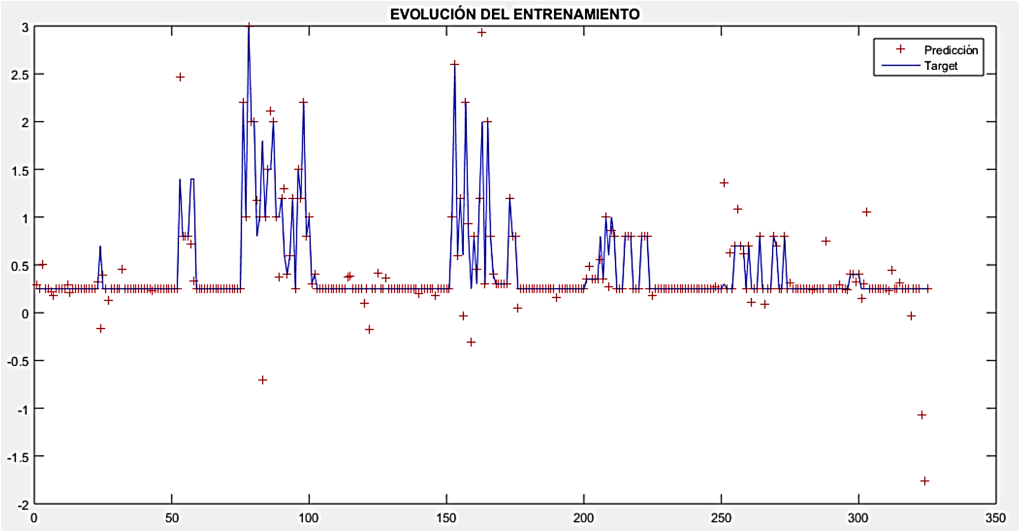
Los datos de entrenamiento fueron normalizados en un rango entre 0 y 1 para cada uno de los 7 factores de la base de datos de las 13 bombas, para garantizar un mejor entrenamiento

de la red neuronal y prevenir que un factor de operación tengan más peso que otro al generar la salida de la red.

4.5.1. Entrenamiento red neuronal Feedforward

La Figura 46 muestra los targets con los cuales fue entrenada la red neuronal Feedforward (linea continua) y las salidas de la red neuronal después del entrenamiento (++), para los 325 patrones de entrenamiento. Como se puede observar, las respuestas de esta red neuronal son muy similares a los targets de entrenamiento, sólo hay unos pocos que no coinciden. Para mayor claridad, se calculó el error en la salida de la red para cada patrón con respecto a su target correspondiente, el cual es mostrado en la Figura 47.

Figura 46: Evolucion del entrenamiento red Feed-Forward.



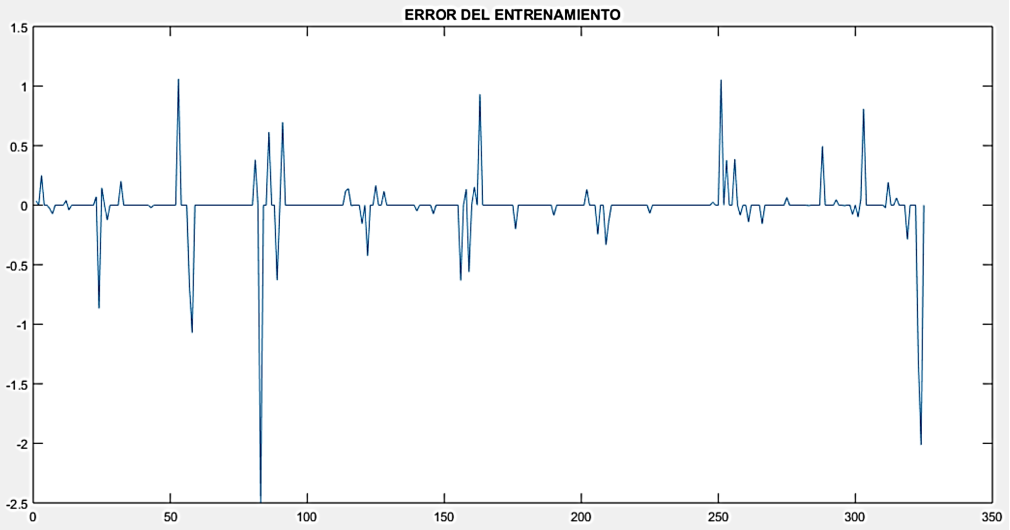
Fuente: Autor.

Las Figuras 48 y 49 muestran algunos parámetros del entrenamiento de la red neural Feedforward como la evolución del error cuadrático, Figura 48, que termina con un valor del orden de 10^{-25} y el gradiente de $1{,}6 * 10^{-13}$, también muy cercano a cero, Figura 49.

4.5.2. Entrenamiento red neuronal Narx

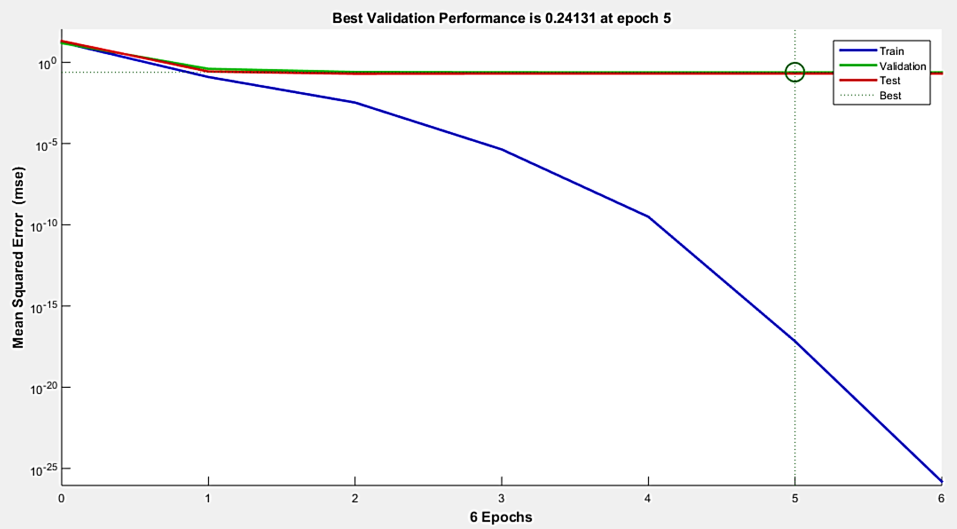
La Figura 50 muestra los targets con los cuales fue entrenada la red neuronal Narx (linea continua) y las salidas de la red neuronal después del entrenamiento (++), para los 325 patrones de entrenamiento. Como se puede observar, las respuestas de la red Narx son casi

Figura 47: Error de entrenamiento de la red neuronal Feed-Forward.



Fuente: Autor.

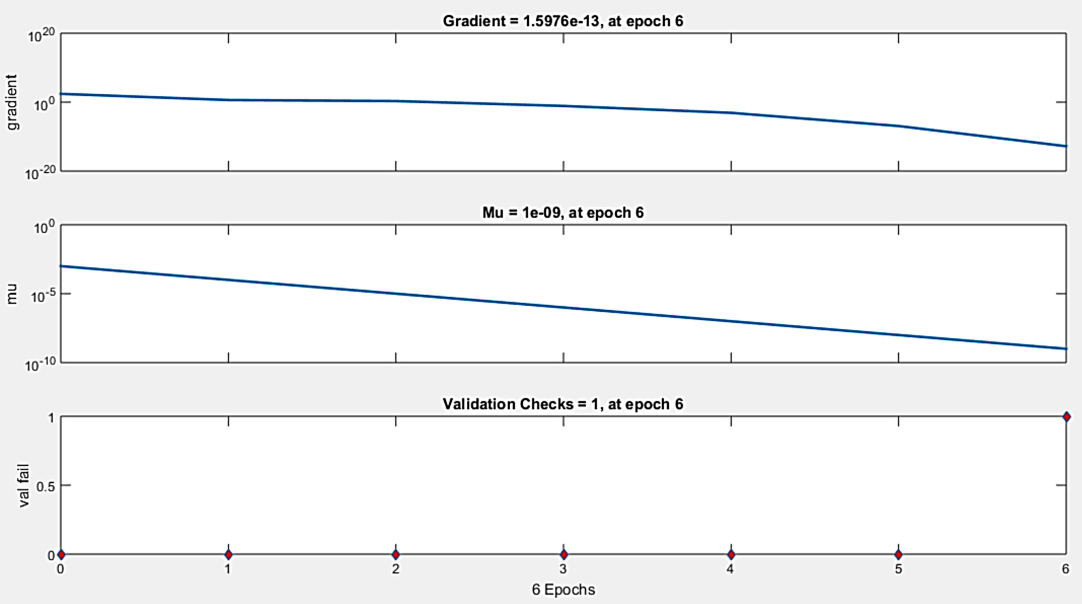
Figura 48: Evolución del error cuadrático durante entrenamiento red Feed-Forward.



Fuente: Autor.

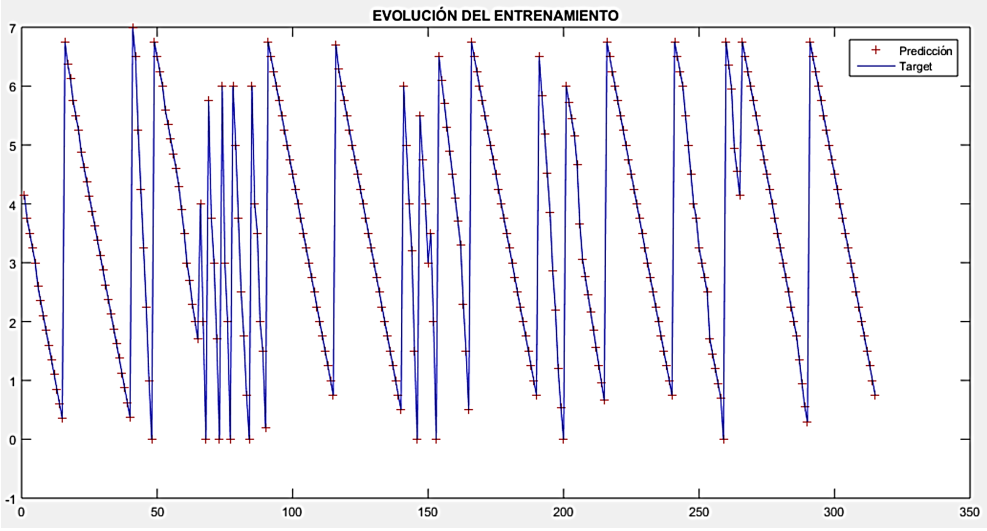
perfectas. Además, se calculó el error en la salida de la red para cada patrón con respecto a su target correspondiente, el cual es mostrado en la Figura 51. El error es del orden de 10^{-14}, prácticamente cero. La Figura 52 muestra el valor del gradiente durante el entrenamiento, el cual termina con un valor de $3{,}81 * 10^{-14}$.

Figura 49: Gradiente y validación red Feed-Forward.



Fuente: Autor.

Figura 50: Evolucion del entrenamiento red neuronal Narx.

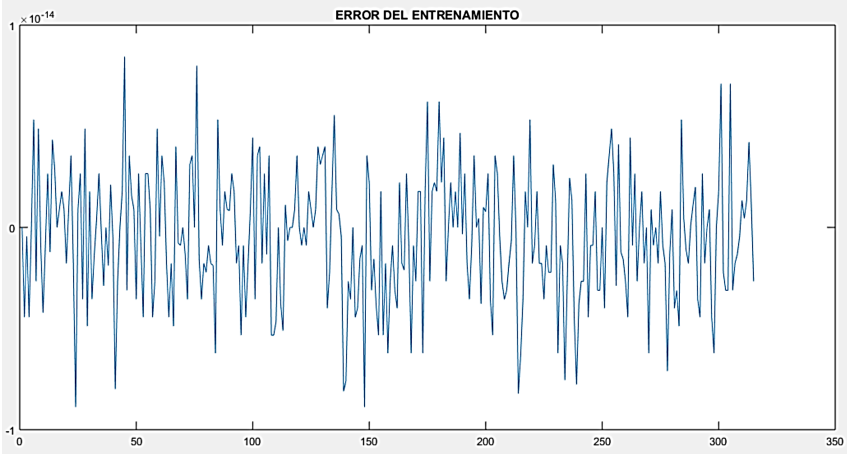


Fuente: Autor.

4.6. VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS MODELOS

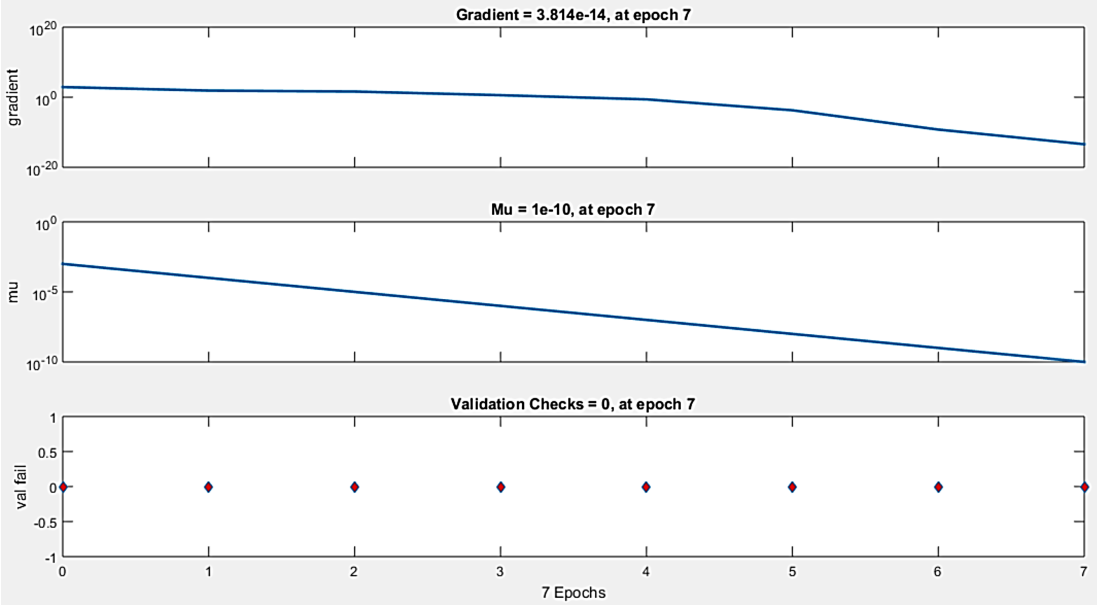
Para realizar las pruebas de validación de los diferentes modelos desarrollados, basados en red neuronal artificial, se tiene una hoja en Excel llamada BOMBA.xlsx para incluir los datos

Figura 51: Error de entrenamiento de la red neuronal Narx.



Fuente: Autor.

Figura 52: Gradiente y validación red Narx.



Fuente: Autor.

de prueba. Estos datos deben estar normalizados de 0 a 1 para los 7 factores de entradas.

4.6.1. Validación red neuronal Feedforward

Esta red requiere como mínimo 3 meses promediados de los factores de operación de la bomba centrífuga. La prueba de la red Feedforward se realizó con los datos de la Tabla 11, correspondientes a una bomba que presenta cavitación y que lleva 1 año en operación continua.

Tabla 11: Base de datos de prueba Feedforward.

FACTOR	**1er Trim**	**2do Trim**	**3er Trim**	**4to Trim**
Flujo según BEP	0,9	1	0,9	0,8
Desviación flujo	0,5	0,6	0,6	0,7
NPSHD	0	1	0	0,2
Temperatura	0,8	0,8	0,8	0,9
Vibración	0,9	0,9	0,9	0,8
Corrosión	1	1	1	1
Contaminantes aceite	1	0,9	0,7	1

Fuente: Autor.

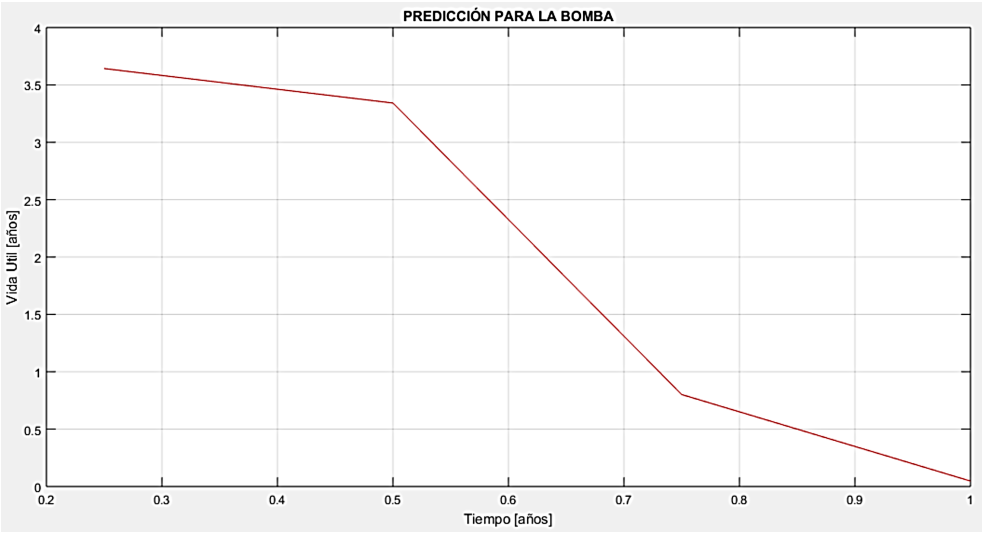
En la Figura 53 muestra la gráfica de vida útil remanente de la bomba de prueba Vs el tiempo de operación en años, con datos de la Tabla 11 cada trimestre. En esta se puede observar que después de trabajar el primer trimestre en estado de cavitación, el tiempo estimado de vida para la bomba es de 3.7 años, y gradualmente va disminuyendo hasta una vida remanente de 0,047 años después de un año de operación, es decir que según la predicción del modelo basado en red neuronal Feedforward la bomba estaría a punto de fallar y se requeriría mantenimiento. La Figura 54 muestra el resultado generado en el Command Window de Matlab el cual muestra este mismo resultado en días de vida remanente con respuesta de 17 días restantes.

Análisis de resultados: los resultados de la red feed-forward son confiables para calcular la vida remanente de las 13 bombas y elaborar el plan de mantenimiento.

4.6.2. Validación red neuronal Narx

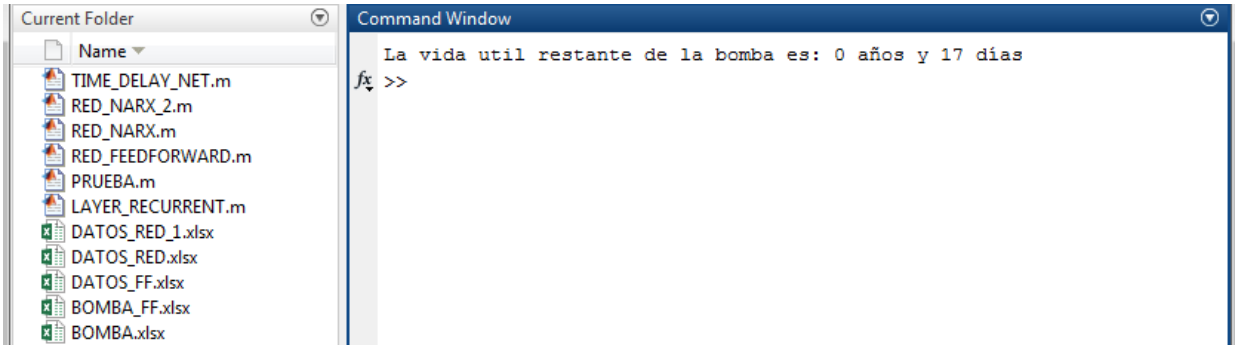
Esta red requiere como mínimo de 2,5 años de operación en la base de datos BOMBA.xlsx, debido a que trabaja con 10 retardos, por lo tanto, para la prueba se tomaron 2,5 años de los

Figura 53: Comportamiento de vida útil remanente para bomba de prueba - Feedforward.



Fuente: Autor.

Figura 54: Respuesta Command Window para bomba de prueba.



Fuente: Autor.

factores de una bomba real que no presenta fallas y se agregó 1 año de operación en estado de cavitación, con los mismos datos con los que se probó la red neuronal Feedforward, la Tabla 12 muestra los datos con los que se realizó la prueba de la red neuronal Narx.

En la Figura 55 muestra la gráfica de vida útil remanente de la bomba de prueba Vs el tiempo de operación en años, con datos de la Tabla 12 cada trimestre. En esta se puede observar un comportamiento poco razonable ya que a pesar de la bomba estar trabajando en estado de cavitación todo el tiempo, la tendencia sube, baja y luego vuelve a subir, mostrando una respuesta final de la predicción de alrededor de 5,1 años. Resultado poco razonable, contrario

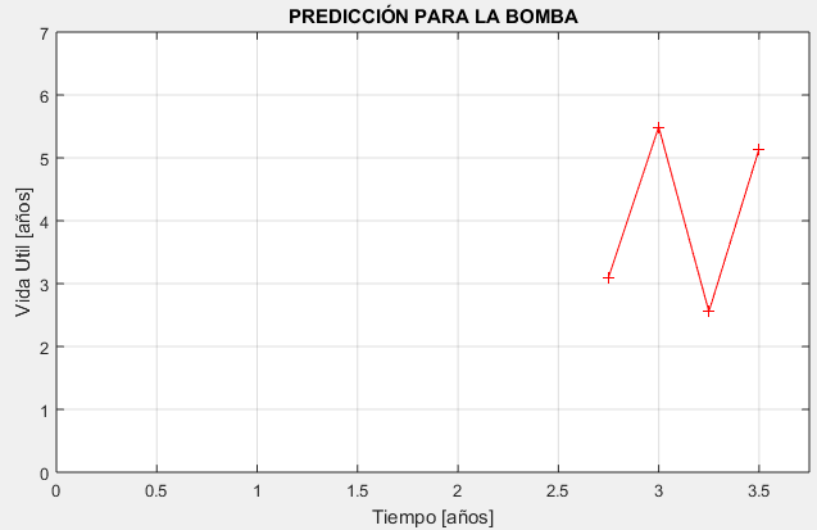
Tabla 12: Base de datos de prueba para Narx.

F1	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,7	0,8	0,9	0,8	0,9	1	0,9	0,8
F2	0,7	0,9	1	1	0,9	0,4	1	0,9	0,9	0,6	0,5	0,6	0,6	0,7
F3	0,8	0,8	0,7	0,6	0,8	0,7	0,8	0,8	0,9	0,8	0	1	0	0,2
F4	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,9
F5	1	1	1	1	1	0,9	1	0,9	1	1	0,9	0,9	0,9	0,8
F6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,9	0,7	1

Fuente: Autor.

a la predicción de la red neuronal Feedforward que dio 0,047 años. La Figura 56 muestra el resultado generado en el Command Window de Matlab el cual muestra este mismo resultado en días de vida remanente con respuesta de 5 años y 51 días restantes, totalmente ilógico.

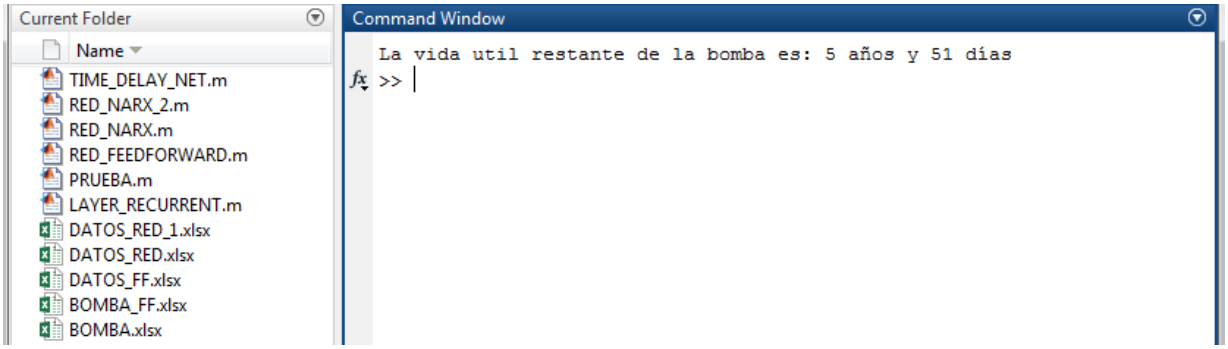
Figura 55: Comportamiento de vida útil remanente para red Narx.



Fuente: Autor.

Análisis de resultados: los resultados de la red neuronal Narx son bastante ilógicos y poco confiables para calcular la vida remanente de los equipos.

Figura 56: Respuesta Command Window para red Narx.



Fuente: Autor.

4.6.3. Validación de las otras redes neuronales

También se realizó el entrenamiento de la red neuronal basada en retardos de tiempo y la red recurrente dando resultados aún menos confiable que la red Narx, por tanto se utilizó sólo la red neuronal FeedForward como herramienta para elaborar el plan de mantenimiento para las bombas de HDT.

5. PLAN DE MANTENIMIENTO

El plan de mantenimiento [2], [19], [16], [1] y [31], se realizó con base en los resultados de estimación de vida útil remanente generados por el modelo desarrollado basado en red neuronal Feed-Forward, debido a que fue el único que mostró ser confiable. Para cada bomba de HDT se sacó una base de datos con los 7 factores de condición operativa promediados trimestralmente, desde el instante que se le realizó el último mantenimiento a la bomba hasta el presente. Esto debido a que cuando se le realiza mantenimiento a la bomba, se realiza un mantenimiento general, cambio de sellos, cambio de rodamientos, y demás partes afectadas por desgaste, por lo que se considera la bomba como estado nuevo.

Las Figuras 57 al 69 muestran los resultados obtenidos mediante el modelo:

1. La Figura 57 muestra que La bomba SP4759A nunca ha fallado y el modelo predice un tiempo de vida restante de 280 días.

2. La Figura 58 muestra que La bomba SP4714A nunca ha fallado y el modelo predice un tiempo de vida restante de 253 días.

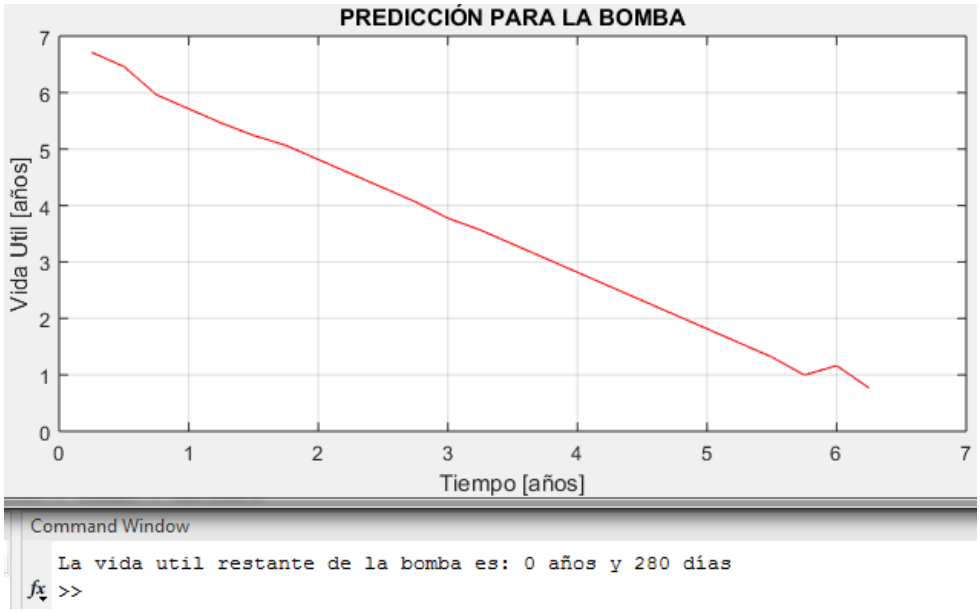
3. La Figura 59 muestra que La bomba SP4701A lleva 4 años y 3 meses sin fallar, y el modelo predice un tiempo de vida restante de 2 años y 273 días.

4. La Figura 60 muestra que La bomba SP4704A lleva un año y medio trabajando, y según sus condiciones de operación el modelo predice un tiempo de vida restante de 18 días, lo cual me dice que requere próximamente de mantenimiento.

5. La Figura 61 muestra que La bomba SP4705A nunca ha fallado y el modelo predice un tiempo de vida restante de 182 días.

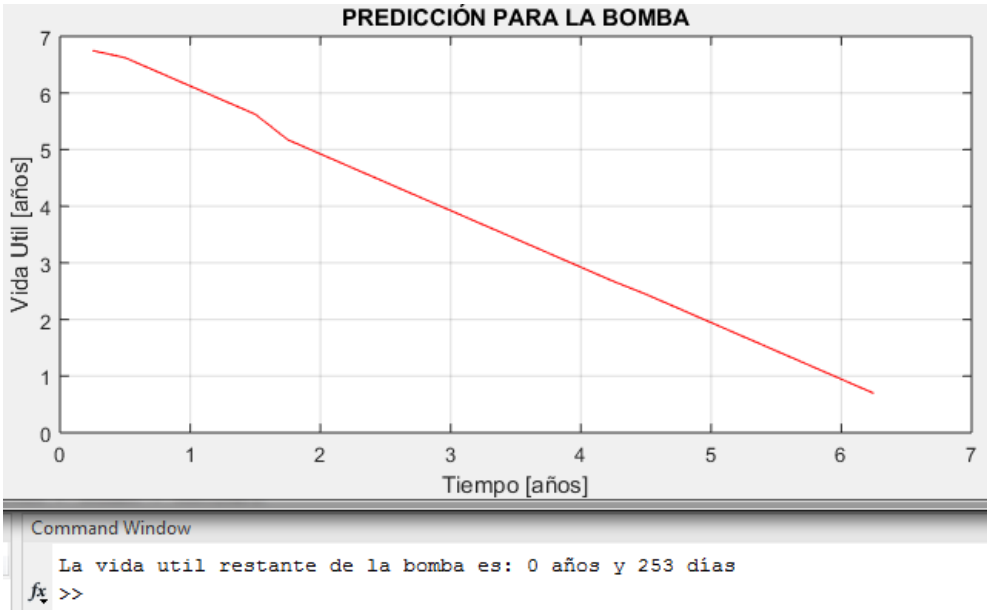
6. La Figura 62 muestra que La bomba SP4703A nunca ha fallado, lleva los 6 años y tres meses trabajando, y el modelo predice un tiempo de vida restante de 275 días.

Figura 57: Vida restante bomba SP4759A.



Fuente: Autor.

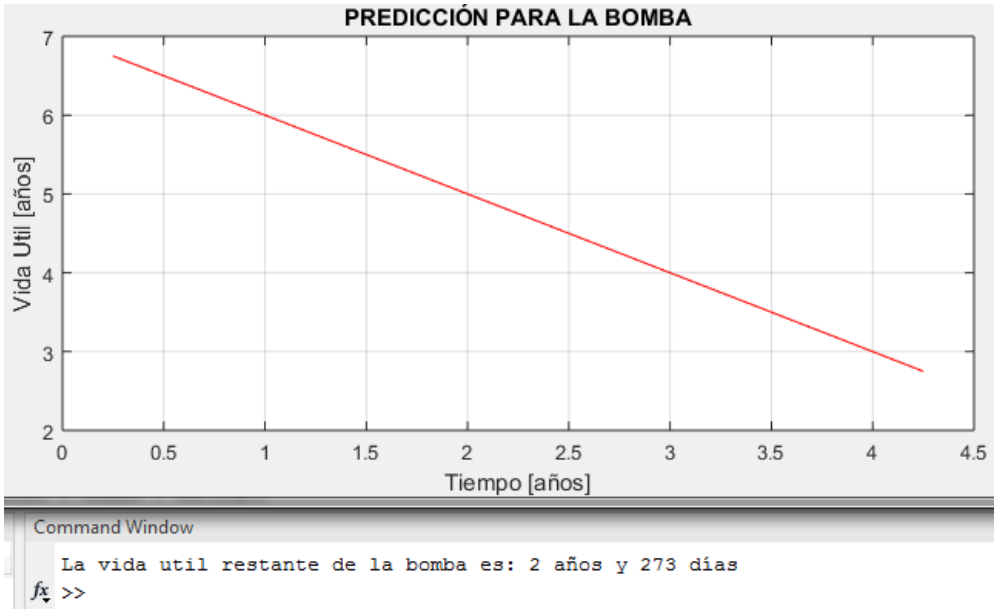
Figura 58: Vida restante bomba SP4714A.



Fuente: Autor.

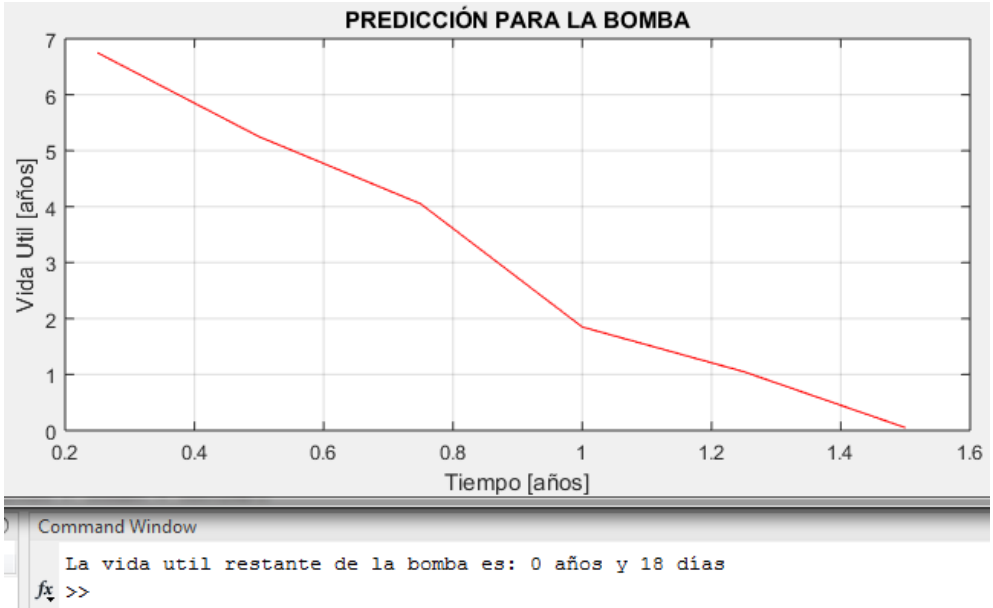
7. La Figura 63 muestra que La bomba SP4756A ha fallado anteriormente, lleva 3 años trabajando desde el último mantenimiento, y el modelo predice un tiempo de vida restante

Figura 59: Vida restante bomba SP4701A.



Fuente: Autor.

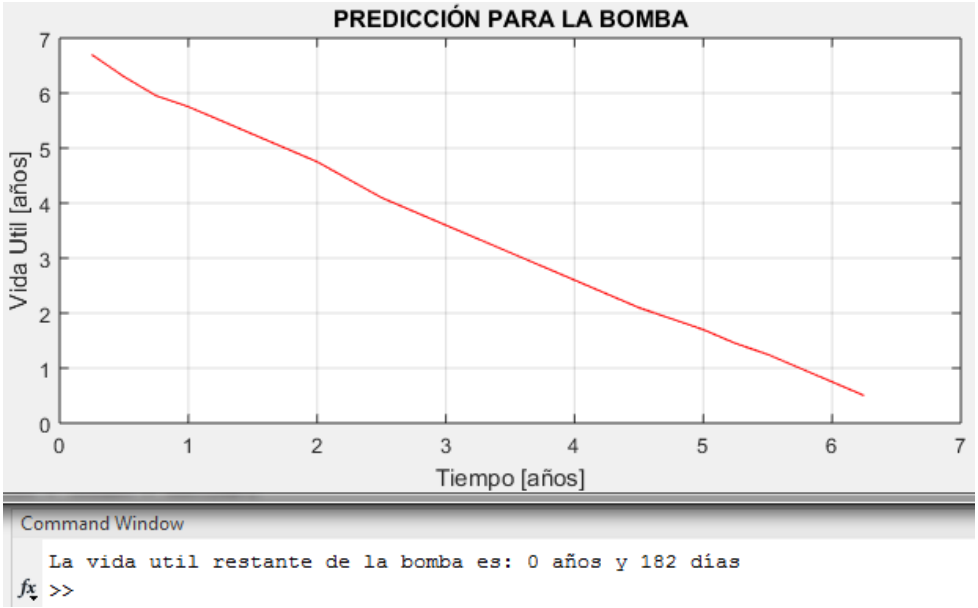
Figura 60: Vida restante bomba SP4704A.



Fuente: Autor.

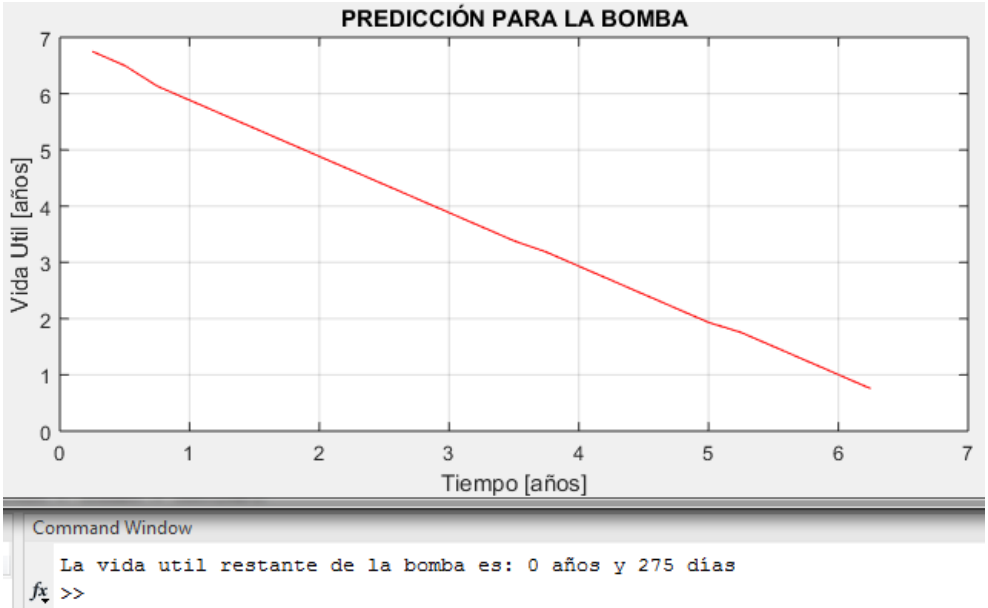
negativo de -291 días. Lo cual me indica que esta bomba requiere de mantenimiento urgente y en cualquier momento puede fallar.

Figura 61: Vida restante bomba SP4705A.



Fuente: Autor.

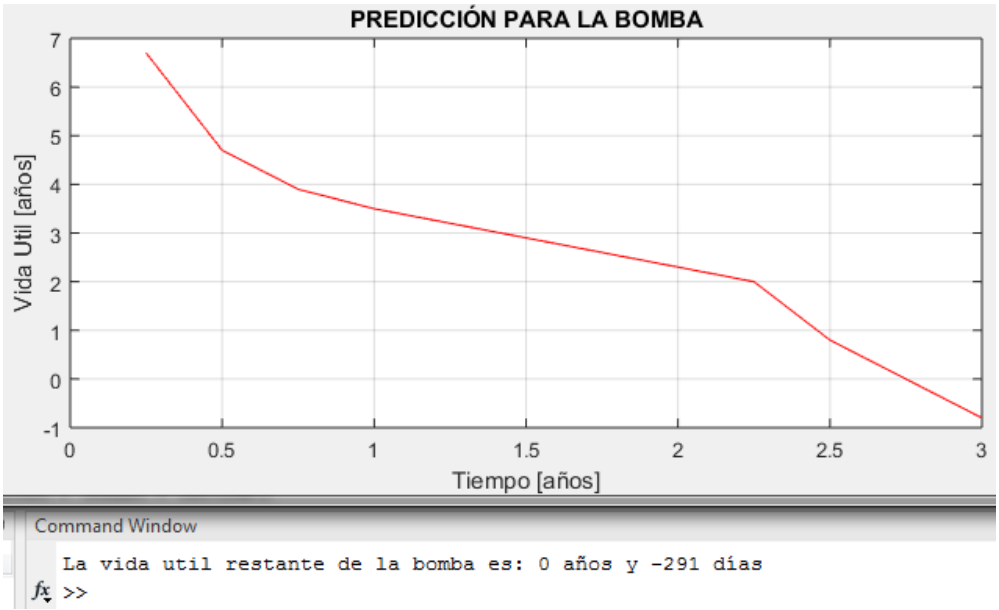
Figura 62: Vida restante bomba SP4703A.



Fuente: Autor.

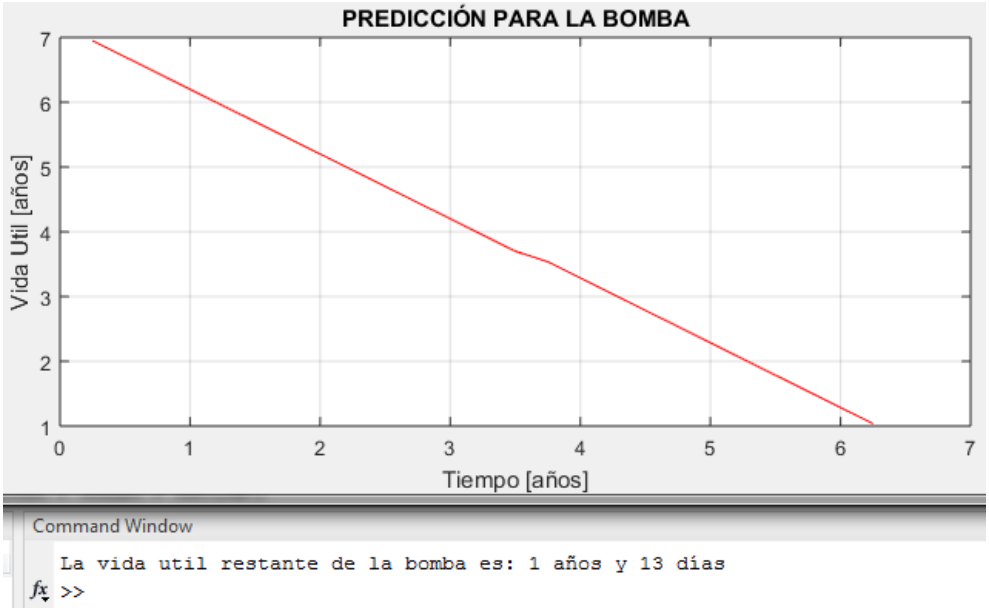
8. La Figura 64 muestra que La bomba SP4754A nunca ha fallado y el modelo predice un tiempo de vida restante de 1 año y 13 días.

Figura 63: Vida restante bomba SP4756A.



Fuente: Autor.

Figura 64: Vida restante bomba SP4754A.

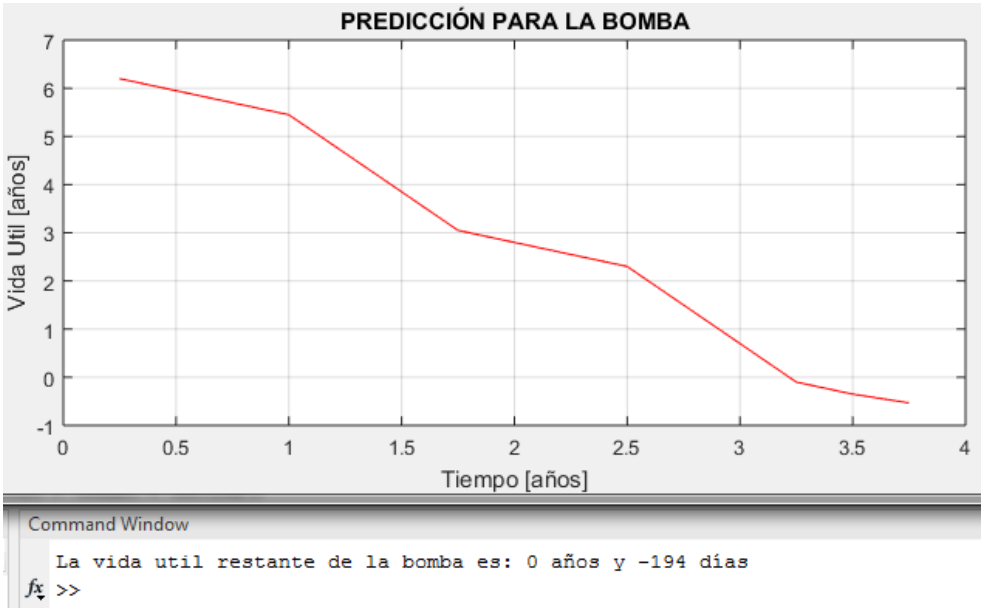


Fuente: Autor.

9. La Figura 65 muestra que La bomba SP4753A ha fallado anteriormente, lleva 3 años y 9 meses trabajando desde el último mantenimiento, y el modelo predice un tiempo

de vida restante negativo de -194 días. Lo cual me indica que esta bomba requiere de mantenimiento urgente y en cualquier momento puede fallar.

Figura 65: Vida restante bomba SP4753A.



Fuente: Autor.

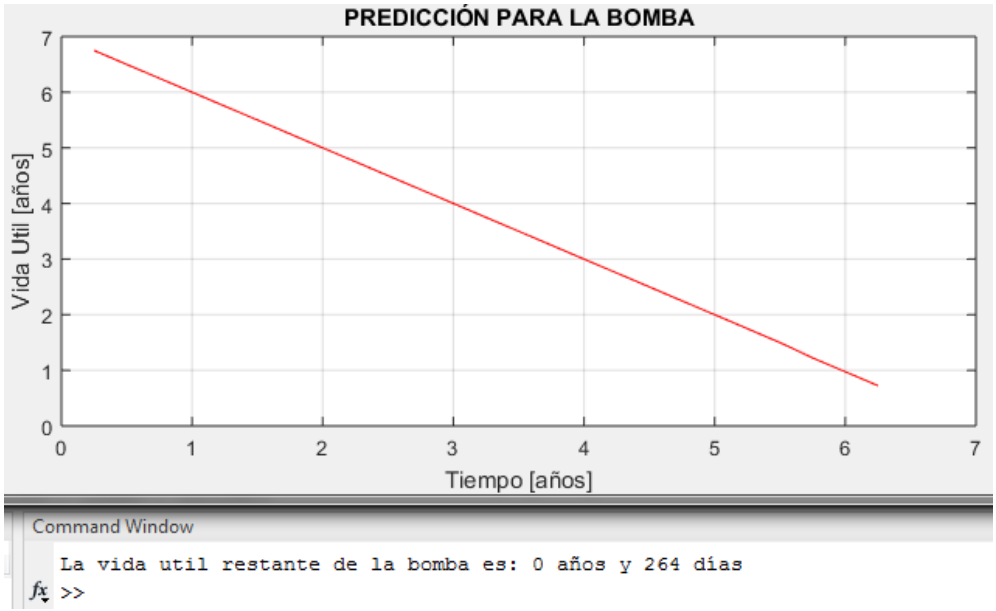
10. La Figura 66 muestra que La bomba SP4752A nunca ha fallado y el modelo predice un tiempo de vida restante de 264 días.

11. La Figura 67 muestra que La bomba SP4755A fue reparada hace poco, lleva un año y medio trabajando desde el último mantenimiento, y el modelo predice un tiempo de vida restante de 4 años y 158 días.

12. La Figura 68 muestra que La bomba SP4651A nunca ha fallado, y el modelo predice un tiempo de vida restante negativo de -110 días. Lo cual me indica que esta bomba requiere de mantenimiento urgente y en cualquier momento puede fallar.

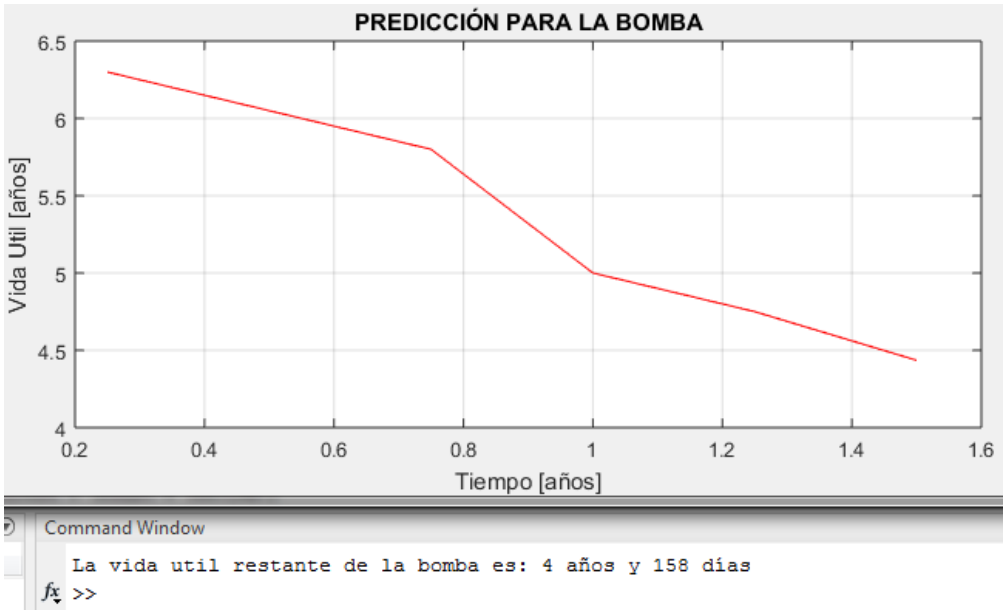
13. La Figura 69 muestra que La bomba SP4751A nunca ha fallado y el modelo predice un tiempo de vida restante de 261 días.

Figura 66: Vida restante bomba SP4752A.



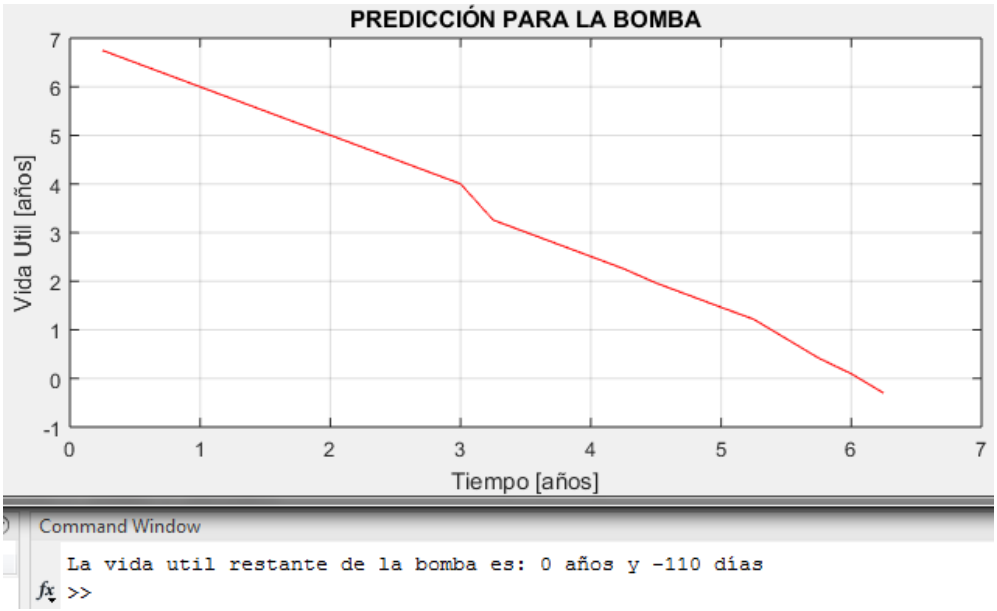
Fuente: Autor.

Figura 67: Vida restante bomba SP4755A.



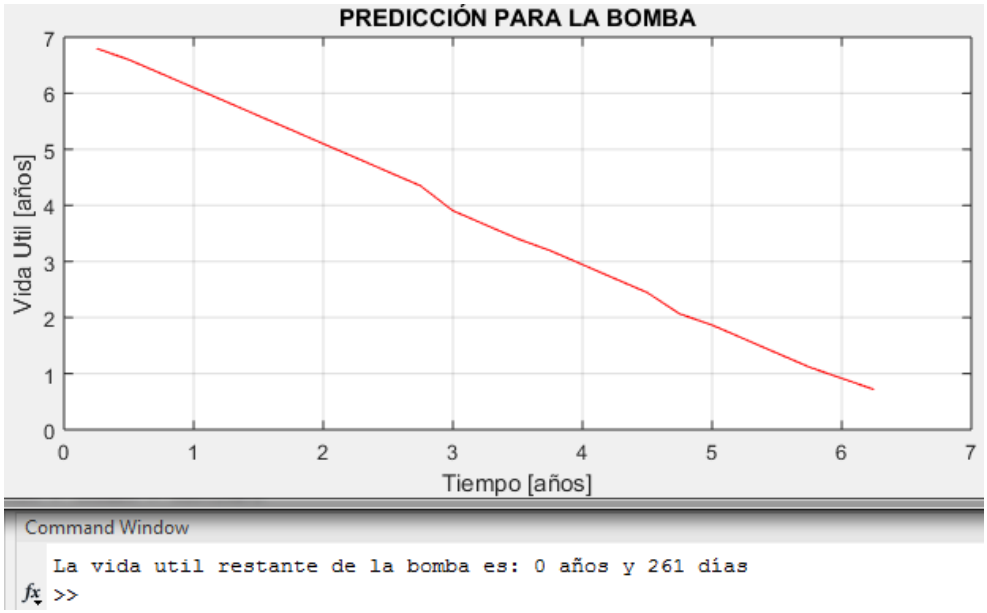
Fuente: Autor.

Figura 68: Vida restante bomba SP4651A.



Fuente: Autor.

Figura 69: Vida restante bomba SP4751A.



Fuente: Autor.

6. CONCLUSIONES

- Controlando los factores (fatiga, oxidación, corrosión y cavitación) asociados al desgaste directo por estar en contacto con el producto, se garantiza una vida de 6 años y se predice a 7 años según el modelo de redes neuronales Feed-forward.
- Las bombas que operan con sistema de supervisión automático y control de la condición operativa, son confiables con una vida útil mayor a 6 años en cada uno de los componentes del equipo.
- Las condiciones operacionales de todas las bombas están dentro de los rangos de Diseño de los equipos, lo cual garantiza que los componente de la bomba tiene una vida útil mínimo de 3 años según Norma API 610 si operan dentro de las ventanas operativas.
- Las ventanas operativas del equipo SP4704A están mal definidas con referencia a la presión de succión afectando considerablemente la vida útil del equipo al operar un punto muy cercano a presión de vapor, los demás equipos tiene sus ventanas bien definidas.
- La temperatura de operación de las cajas de rodamientos y chumaceras de las bombas registran valores en control permitidos con un factor entre 0.9 y 1,2 únicamente la SP4704A registra valores promedio 200°F debido a la radiación por la temperatura del producto 610°F afectando la vida útil del equipo.
- Los componentes de las bombas no presentaron afectación por factores asociados a la corrosión, BEP, vibración, y Desviación del flujo; mientras que los factores más peligrosos que afectan los equipos y reducen dásticamente su vida útil son la cavitación (NPSD) y contaminantes del aceite lubricante.
- La red neuronal con resultados más confiables es la red Feed-forward, con el requerimiento de una base de datos de cada uno de los factores, de al menos 3 meses de

operación continua, promediados cada tres meses.

- Las redes neuronales con arquitecturas NARX, Recurrente y Focused Time-Delay, no son confiables para predecir el tiempo de vida útil remanente en bombas centrífugas. Estas arquitecturas son muy buenas para simular series temporales no lineales, sin embargo, son muy exigentes para generar buenos resultados en la predicción. requieren que se den exactamente la misma secuencia de valores de los patrones de entrenamiento, y en el mismo orden, algo que para la aplicación de predicción de vida remanente de bombas centrífugas nunca se va a dar, ya que todas las bombas trabajan en diferentes condiciones operacionales y estas pueden variar en cualquier momento rapidamente, sin tener en cuenta la secuencia.

- La red neuronal Feedforward generó excelentes resultados prediciendo la vida útil remanente de bombas centrífugas y permitió crear un buen plan de mantenimiento predictivo, basado en el histórico de las condiciones operacionales del equipo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Definición de las frecuencias para un plan de mantenimiento. *Publicado en: http://www.confiabilidad.net/articulos/definicion-de-las-frecuencias-para-un-plan-de-mantenimiento/*, 2017.

[2] Esteban Adrogue. Determinación de la frecuencia Óptima de mantenimiento preventivo. (Buenos aires Argentina), Febrero, 2013.

[3] Pedro Albarracín. Tribología y lubricación. *Editorial Omega,Tomo 1, 5 Ed.*, 2015.

[4] Pedro Albarracín Aguillón. Conferencia control de desgaste. 2016.

[5] E Roland Andersson. Design and testing of a vibration attenuating handle. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 6(2):119–125, 1990.

[6] Guía ARPEL. Eficiencia energética para bombas, compresores, ventiladores, sopladores y turbinas. *Tylers, Brian. Franklin, Neil*, 2002.

[7] Ali Azadeh, Morteza Saberi, Ahmad Kazem, Vahid Ebrahimipour, A Nourmohammadzadeh, y Zahra Saberi. A flexible algorithm for fault diagnosis in a centrifugal pump with corrupted data and noise based on ann and support vector machine with hyper-parameters optimization. *Applied Soft Computing*, 13(3):1478–1485, 2013.

[8] Carlos Borrás. *Técnicas Moderna de Mantenimiento*. UIS, 2016.

[9] Carlos Borrás P y Harold L Stalford. Pattern recognition in hydraulic backlash using neural network. En *Proceedings of the 2002 American Control Conference (IEEE Cat. No. CH37301)*, tomo 1, págs. 400–405. IEEE, 2002.

[10] Carlos Borrás Pinilla. Pattern recognition in hydraulic backlash using neural network. 2001. Thesis (Master of Science) – University of Oklahoma. School of Aerospace and Mechanical Engineering. Norman, Oklahoma, USA.

[11] Allen R Budris y Phillip A Mayleben. Effects of entrained air, npsh margin, and suction piping on cavitation in centrifugal pumps. En *PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL PUMP USERS SYMPOSIUM*, págs. 99–108. TEXAS A&M UNIVERSITY SYSTEM, 1998.

[12] Allen R Budris y WaterWorld. Avoiding cavitation damage extends pump life. *[en línea] Disponible en: http://www.waterworld.com/articles/print/volume-23/issue-10/departments/avoiding-cavitation-damage-extends-pump-life.html*, 2017.

[13] M Chudina. Noise as an indicator of cavitation in a centrifugal pump. *Acoustical Physics*, 49(4):463–474, 2003.

[14] Crane. *Flujo de fluidos: en válvulas, accesorios y tuberías*. McGraw-Hill Interamericana, 2011.

[15] Saeid Farokhzad, Hojjat Ahmadi, Ali Jaefari, MR Asadi Asad Abad, y M Ranjbar Kohan. Artificial neural network based classification of faults in centrifugal water pump. *Vibroengineering*, 14(4):1734–1744, 2012.

[16] Alejandro Favieres Cuevas. *Herramienta de cálculo de mantenimiento cíclico basado en la fiablilidad*. Proyecto Fin de Carrera, 2011.

[17] Pedro FERNÁNDEZ. Bombas centrífugas y volumétricas. *UNIVERSIDAD DE CANTABRIA, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética*, 2005.

[18] Paresh Girdhar y Octo Moniz. *Practical centrifugal pumps*. Elsevier, 2011.

[19] Anibal Gomez Marquez. Optimización de frecuencias de mantenimiento de plantas y equipos a partir del análisis de distribuciones estadísticas de confiabilidad. Septiembre, 2009.

[20] José Francisco Castillo González. Cálculo para evitar la cavitación en un sistema de bombeo mediante el uso de npsha y npshr. 2013.

[21] Martin T Hagan, Howard B Demuth, Mark H Beale, y Orlando De Jesús. *Neural network design*, tomo 20. PWS publishing company Boston, 1996.

[22] American Petroleum Institute. Api rp 580, api recommended practice 580, risk-based inspection. *Primer Edition*, 2002.

[23] Wilo Pumpen Intelligenz. Principios fundamentales de la tecnología de las bombas centrífugas. *[en línea] Disponible en: https://goo.gl/vk9JLZ*, 2017.

[24] J Kenneth et al. Bombas, selección, uso y mantenimiento. *Editorial McGraw Hill*, 1998.

[25] Ricardo Lázaro. Análisis de vibración. *Cero grado Celsius*, Enero, 2003.

[26] Viejo Zubicaray Manuel. Bombas, teoría diseño y aplicaciones. *Limusa, México*, 2003.

[27] MathWorks y Documentation Matlab. feedforwardnet. *[en línea] Disponible en: https://www.mathworks.com/help/nnet/ref/feedforwardnet.html*, 2017.

[28] MathWorks y Documentation Matlab. layrecnet. *[en línea] Disponible en: https://www.mathworks.com/help/nnet/ref/layrecnet.html*, 2017.

[29] MathWorks y Documentation Matlab. narxnet. *[en línea] Disponible en: https://www.mathworks.com/help/nnet/ref/narxnet.html*, 2017.

[30] MathWorks y Documentation Matlab. timedelaynet. *[en línea] Disponible en: https://www.mathworks.com/help/nnet/ref/timedelaynet.html*, 2017.

[31] John Moubray. Rcm ii. *Reliability-centered Maintenance*, 2, 1997.

[32] Carlos Nieto y Rafael López. Mantenimiento de bombas centrífugas. *[en línea] Disponible en: https://goo.gl/WlOMbm*, 2017.

[33] Sulzer Pumps. *Sulzer centrifugal pump handbook*. Elsevier, 2013.

[34] S Rajakarunakaran, D Devaraj, y K Suryaprakasa Rao. Fault detection in centrifugal pumping systems using neural networks. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 3(2):131–139, 2008.

[35] S Rajakarunakaran, P Venkumar, D Devaraj, y K Surya Prakasa Rao. Artificial neural network approach for fault detection in rotary system. *Applied Soft Computing*, 8(1):740–748, 2008.

[36] Carlos Julio Rincón. Módulo bombas. *[en línea] Disponible en: https://goo.gl/9Tf1Pi*, 2017.

[37] Raphael Suarez. Cálculo de la frecuencia de inspección de mantenimiento predictivo. *Publicado en: www. mantenimientomundial. com/sites/mmnew/bib/notas/Frec_pred. pdf*, 2007.

[38] Lei Tan, BaoShan Zhu, ShuLiang Cao, y YuMing Wang. Cavitation flow simulation for a centrifugal pump at a low flow rate. *Chinese Science Bulletin*, 58(8):949–952, 2013.

[39] Pedro Vargas. Operaciones unitarias 1. bombas centrífugas. *Disponible en: www.operaciones1.wordpress.com*, 2017.

[40] Víctor Gabriel Vilchez. Estimación y clasificación de daños en materiales utilizando modelos ar y redes neuronales para la evaluación no destructiva con ultrasonidos. 2010. Tesis de maestría. Universidad de Granada.

[41] HQ Wang y P Chen. Fault diagnosis of centrifugal pump using symptom parameters in frequency domain. 2007.

[42] Huaqing Wang y Peng Chen. Sequential condition diagnosis for centrifugal pump system using fuzzy neural network. *Neural Information Processing-Letters and Reviews*, 11(3):41–50, 2007.

[43] Rafik Zouari, Sophie Sieg-Zieba, y Menad Sidahmed. Fault detection system for centrifugal pumps using neural networks and neuro-fuzzy techniques. *Surveillance*, 5:11–13, 2004.