

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



**Monitoreo de válvulas en compresores recíprocos de ENAP refinería
BÍO BÍO, mediante análisis de vibraciones en alta frecuencia.**

Informe de habilitación profesional

Presentado en conformidad a los requisitos

Para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:

Sr. Fabián Pierart Vásquez.

Ingeniero supervisor:

Sr. Tomas Stüven Piedra

Abraham Jesús Díaz Henríquez

Julio de 2017

SUMARIO.

La división de ingeniería en mantención (DIM) perteneciente a ENAP refinerías Bío Bío implementa la estrategia de mantención predictiva, basada en la condición mecánica de los equipos. Esta se basa en el monitoreo periódico que abarcan a la totalidad de los equipos, estos procedimientos se denominan rutas de inspección de vibraciones.

La DIM está dividida en dos grupos, una abraza todos los equipos estáticos y la otra los equipos rotatorios, dentro de esta última encontramos el mantenimiento de los compresores recíprocos.

El objetivo central de esta memoria es estudiar y monitorear las válvulas de succión y descarga de los compresores recíprocos mediante análisis de vibraciones en alta frecuencia, con el fin analizar el estado de salud de las válvulas y reconocer las formas de fallas que tienen las válvulas de succión y descarga de los compresores, además es importante destacar que estas válvulas son elementos mecánicos de gran importancia en el funcionamiento de los compresores recíprocos. Estadísticamente está comprobado que la principal causa de una parada de equipo no programada, está ligada al mal funcionamiento de las válvulas de succión y descarga.

La metodología empleada para el estudio y monitoreo de las válvulas de succión y descarga está basada básicamente en el reconocimiento de todos los equipos de la refinería Bío Bío, con el fin de seleccionar de acuerdo al montaje de cada válvula el punto de medición más adecuado para detectar las vibraciones en alta frecuencia que nos proporciona el fluido turbulento que pasa por las válvulas. Se debe tener claro que mediante el comportamiento del fluido se podrá determinar el estado de salud de las válvulas, y así con el tiempo lograr reconocer patrones de fallas presentes en estos elementos mecánicos.

A partir de este estudio se crearon graficas de tendencia en el tiempo de cada válvula para observar la presencia de cambios en su comportamiento, además se analiza la forma de onda circular de cada válvula para ver el comportamiento de estas.

La técnica a utilizar en este análisis es denominada Peak VUE, este método ya es utilizado en el campo de análisis de fallas de rodamientos y engranes, pero es nueva en el análisis de las válvulas de succión y descarga de los compresores alternativos.

Los datos de la técnica Peak VUE son un buen indicador de ocurrencias en alta frecuencia tales como, turbulencia de flujo y fricción. En este estudio se mostrara la turbulencia del flujo que se produce cuando cada válvula se abre y se cierra.

Como principal conclusión se puede asegurar que el método de análisis de vibraciones en alta frecuencia con la técnica del Peak VUE resulto exitoso, ya que se logró llegar al objetivo de esta memoria, por lo que se consiguió observar comportamientos anómalos en las válvulas de succión y descarga de los compresores recíprocos de la refinería Bío Bío, logrando detectar algunas fallas de manera insipiente que se presentan en las válvulas, permitiendo mejoras en el funcionamiento de los equipos, cabe destacar que se debe controlar continuamente la vibración y las temperaturas en las válvulas para monitorear el estado de salud de estas.

ÍNDICE DE CONTENIDO.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	2
1.3 OBJETIVOS.....	3
CAPÍTULO 2: EMPRESA NACIONAL DEL PETRÓLEO.	4
2.1 HISTORIA.....	4
2.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA EMPRESA.....	5
2.2.1 Misión.....	5
2.2.2 Visión.	6
2.3 PRINCIPALES SOCIOS.....	6
2.3.1 Principales Socios en E&P.....	6
2.3.2 Principales Socios en R&C.	7
2.4 ENAP REFINERÍA BÍO BÍO (ERBB).	8
2.4.1 División Ingeniería de Mantenimiento (DIM).....	9
2.4.2 Área Equipos Rotatorios.	9
2.5 PROCESO DE REFINACIÓN DEL PETRÓLEO.	10
2.5.1 Separación de productos primarios derivados del crudo (Topping y Vacío).....	10
2.5.2 Síntesis de hidrocarburos nobles y depuración de los productos.	12
2.6 PRODUCTOS QUE COMERCIALIZA ENAP.....	14
CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO.	15
3.1 COMPRESORES.....	15
3.1.1 Compresores recíprocos.	16
3.1.1.1 Tipos de compresores reciprocantes	17
3.1.1.2 Funcionamiento de los compresores reciprocantes.	22
3.1.1.3 Factores que afectan la confiabilidad de un compresor recíprocante.....	24
3.2 VÁLVULAS.	25
3.2.1 Funcionamiento.....	25
3.2.2 Tipos de válvulas Utilizadas en ENAP refinerías Bío Bío.....	27
3.2.3 Montaje de las válvulas.....	28

3.2.4 Modos de falla.....	31
3.2.5 Recomendaciones generales.....	33
3.3 ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO.....	34
3.4 VIBRACIÓN MECÁNICA.....	38
3.4.1 Clasificación de las vibraciones mecánicas.....	38
3.4.2 Parámetros de la vibración.....	39
3.4.3 Diferencia de fase.....	41
3.4.4 Medición de la vibración.....	42
3.4.5 Tipos de sensores.....	43
3.4.6 Rango de Frecuencia típico de un acelerómetro.....	45
3.4.7 Formas de montar un acelerómetro.....	46
3.4.8 Vibraciones en alta frecuencia.....	47
3.5 PEAK VUE.....	50
3.5.1 Ondas de esfuerzo.....	50
3.5.2 Técnica Peak VUE.....	51
3.5.3 Factores a considerar en el análisis con Peak VUE.....	52
3.5.4 Definición de filtros de frecuencia.....	55
3.6 TERMOGRAFÍA.....	56
 CAPÍTULO 4: ADQUISICIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS.....	 57
4.1 ADQUISICIÓN DE DATOS.....	57
4.1.1 Monitoreo de válvulas mediante vibraciones en alta frecuencia.....	57
4.1.1.1 Identificación de los equipos de la refinería.....	57
4.1.2.2 Reconocimiento de los planos de los compresores recíprocos y las posiciones de las válvulas de succión y descarga.....	58
4.1.2.3 Determinar el punto de medición de cada válvula de succión y descarga de los compresores recíprocos.....	62
4.1.2.4 Toma de datos de vibraciones en alta frecuencia en las válvulas de succión y descarga.....	63
4.1.2 La termografía en compresores recíprocantes.....	68
4.2 ANÁLISIS DE DATOS.....	70
4.2.1 Mediciones de datos.....	72

4.2.1.1 Análisis vibratorio mediante Peak VUE en las válvulas.....	72
4.2.1.2 Análisis de termografía en las válvulas.....	77
4.3 RESULTADOS.....	78
4.3.1 Registro fotográfico en taller.....	80
4.3.2 Solución.....	82
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....	83
5.1 COHERENCIA ENTRE OBJETIVOS Y RESULTADOS.....	83
5.2 LIMITACIONES DEL ESTUDIO.....	83
5.3 DIFICULTADES DEL ESTUDIO.....	83
5.4 APORTE DEL ESTUDIO.....	84
5.5 CONCLUSIONES.....	84
BIBLIOGRAFÍA.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS.

FIGURA 2-1 FOTOGRAFÍA SATELITAL DE ENAP REFINERÍAS BÍO BÍO (FUENTE: GOOGLE MAPS).	8
FIGURA 2-2. . REFINACIÓN DEL PETRÓLEO. (FUENTE: WWW.ENAP.CL)	10
FIGURA 2-3. UNIDADES DE FRACCIONAMIENTO. A) TOPPING, B) VACÍO. (FUENTE: WWW.ENAP.CL). 11	
FIGURA 2-4. UNIDADES DE TRANSFORMACIÓN. A) REF. CATALÍTICA, B) VISBREAKER, C) HIDROCRACKING, D) COQUIZACIÓN RETARDADA, E) CRACKING CATALÍTICO. (FUENTE: WWW.ENAP.CL)	13
FIGURA 2-5. PRODUCTOS QUE COMERCIALIZA ENAP. (FUENTE: WWW.ENAP.CL)	14
FIGURA 3-1. COMPRESOR RECÍPROCO J-1202A, ENAP REFINERÍA BÍO BÍO. (FUENTE: ENAP).....	17
FIGURA 3-2. SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE UN COMPRESOR RECÍPROCO. (FUENTE: HOERBIGER, 2009).....	20
FIGURA 3-3. COMPONENTES INTERNAS DEL SISTEMA DE COMPRESIÓN DE UN COMPRESOR RECÍPROCO. (FUENTE: HOERBIGER, 2009).	20
FIGURA 3-4.VISTA CORTE VERTICAL DE UN COMPRESOR RECÍPROCANTE (FUENTE: DRESSER-RAND.)	21
FIGURA 3-5.CICLO IDEAL DE UN COMPRESOR RECÍPROCO P/V. (FUENTE: COMPRESORES RECÍPROCANTE, PEDRO GÓMEZ R.)	22
FIGURA 3-6. CICLO REAL DE UN COMPRESOR RECÍPROCO P v/s V. (FUENTE: COMPRESORES RECÍPROCANTE, PEDRO GÓMEZ R.)	23
FIGURA 3-7.MOVIMIENTO DEL PISTÓN DENTRO DEL CILINDRO. (FUENTE: COMPRESORES RECÍPROCANTE, PEDRO GÓMEZ R.)	24
FIGURA 3-8.CAUSAS DE PARADAS NO PROGRAMADAS EN COMPRESORES RECÍPROCOS. (FUENTE: WOOLLATT, 2001).	25
FIGURA 3-9.RELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS VÁLVULAS DE SUCCIÓN Y DESCARGA CON LA VELOCIDAD DEL PISTÓN. (FUENTE: MANUAL DE COMPRESOR DRESSER-RAND).	26
FIGURA 3-10.ENSAMBLE VÁLVULA DE POPPET. (FUENTE: DRESSER-RAND).	27
FIGURA 3-11.VÁLVULA DE PLATO. (FUENTE: DRESSER-RAND).....	27
FIGURA 3-12.MONTAJE VÁLVULA DE PLATO DE SUCCIÓN.....	28
FIGURA 3-13.MONTAJE VÁLVULA DE PLATO DE DESCARGA.	28
FIGURA 3-14.MONTAJE VÁLVULA DE POPPET CON ACTUADOR.	29
FIGURA 3-15 MONTAJE VÁLVULA DE POPPET CON TORNILLO DE FIJACIÓN CENTRAL.....	29

FIGURA 3-16.MONTAJE VÁLVULA DE POPPET DE SUCCIÓN CON SOMBRERO.....	30
FIGURA 3-17.MONTAJE VÁLVULA DE POPPET DE DESCARGA CON SOMBRERO.	30
FIGURA 3-18.REPRESENTACIÓN DE UNA VIBRACIÓN MECÁNICA VERTICAL. (FUENTE: INTRODUCCIÓN A ANÁLISIS DE VIBRACIONES “AZIMA DLI”).....	38
FIGURA 3-19.DESPLAZAMIENTO, VELOCIDAD Y ACELERACIÓN DE UNA VIBRACIÓN ARMÓNICA SIMPLE. (FUENTE: CURSO ANÁLISIS DE VIBRACIONES CATEGORÍA I).	41
FIGURA 3-20.TRANSFORMACIÓN DE LA ACELERACIÓN MEDIDA A UNA SEÑAL ELÉCTRICA A LA SALIDA DEL ACELERÓMETRO. (FUENTE: CURSO ANÁLISIS DE VIBRACIONES CATEGORÍA I).....	42
FIGURA 3-21.ACELERÓMETRO PIEZOELÉCTRICO CON PREAMPLIFICADOR ICP INCORPORADO. (FUENTE: CURSO ANÁLISIS DE VIBRACIONES CATEGORÍA I).	45
FIGURA 3-22. DIFERENTES FORMAS DE MONTAJE DE UN ACELERÓMETRO. (FUENTE: CURSO ANÁLISIS DE VIBRACIONES CATEGORÍA I).	47
FIGURA 3-23.COMPARACIÓN DE ONDAS A BAJA Y ALTA FRECUENCIA. (FUENTE: INTRODUCCIÓN A ANÁLISIS DE VIBRACIONES “AZIMA DLI”).....	48
FIGURA 3-24.DETENCIÓN DE LOS VALORES PEAK PARA CADA INTERVALO DE MUESTREO. (FUENTE: CURSO ANÁLISIS DE VIBRACIONES, CATEGORÍA III).....	51
FIGURA 3-25.ACELERÓMETRO DE ALTA FRECUENCIA 10 mV/G, MODELO AC131-1A, MARCA CTC. (FUENTE: WWW.CTCONLINE.CL).....	52
FIGURA 3-26.SENSIBILIDAD RELATIVA DE LOS DIFERENTES ACELERÓMETROS. (FUENTE: CURSO ANÁLISIS DE VIBRACIONES CATEGORÍA I).	53
FIGURA 3-27. CARACTERÍSTICAS DE FILTRO PASAS BAJO, PASA ALTO Y PASA BANDA IDEALES. (FUENTE: CURSO ANÁLISIS DE VIBRACIONES CATEGORÍA III).	56
FIGURA 4-1.ESQUEMA COMPRESOR RECÍPROCO J-651A, PLANTA CCR (FUENTE: ENAP).....	60
FIGURA 4-2.PLANO DEL CONJUNTO DE LA VÁLVULA DE SUCCIÓN DEL COMPRESOR RECIPROCO J-651 A. (FUENTE: ENAP REFINERÍAS BÍO BÍO.)	62
FIGURA 4-3.PLANO DEL CONJUNTO DE VÁLVULA DE DESCARGA DEL COMPRESOR J-651 A. (FUENTE: ENAP REFINERÍAS BÍO BÍO.)	63
FIGURA 4-4.AMS 2140 MACHINERY HEALTH ANALYZER. (FUENTE: EMERSON).....	64
FIGURA 4-5.DATOS CONFIGURADOS EN AMS. (FUENTE: ENAP REFINERÍAS BÍO BÍO).....	65
FIGURA 4-6.CONFIGURACIÓN DE PUNTOS DE MEDICIÓN. (FUENTE: ENAP REFINERÍAS BÍO BÍO).	66
FIGURA 4-7.GRAFICA DE COMPORTAMIENTO HISTÓRICO Y ESPECTRO DE LA MEDICIÓN.....	67
FIGURA 4-8.GRAFICA DE FORMA DE ONDA LINEAL DE LA VÁLVULA. (FUENTE: ENAP REFINERÍAS). 67	

FIGURA 4-9.GRAFICA DE FORMA DE ONDA CIRCULAR DE LA VÁLVULA (FUENTE: ENAP REFINERÍAS).	68
.....	
FIGURA 4-10.ANÁLISIS DE TERMOGRAFÍA DE UNA VÁLVULA DE DESCARGA DE UN COMPRESOR RECIPROCANTE. (FUENTE: ENAP REFINERÍAS BÍO BÍO).	69
FIGURA 4-11.MATRIZ DE CRITICIDAD DE TOPPING II. (FUENTE: ENAP REFINERIAS BÍO BÍO).	70
FIGURA 4-12.FOTOGRAFÍA COMPRESOR RECIPROCO J-401. (FUENTE: ENAP REFINERIAS BÍO BÍO).	71
FIGURA 4-13.ESQUEMA DE MEDICIÓN COMPRESOR J-401. (FUENTE: ENAP REFINERÍAS BÍO BÍO).	71
FIGURA 4-14. COMPORTAMIENTO VÁLVULAS DE SUCCIÓN COMPRESOR J-401. (FUENTE: ENAP REFINERÍAS BÍO BÍO).	72
.....	
FIGURA 4-15.COMPORTAMIENTO VÁLVULAS DE DESCARGA COMPRESOR J-401. (FUENTE: ENAP REFINERÍAS BÍO BÍO).	73
.....	
FIGURA 4-16 COMPORTAMIENTO VÁLVULAS COMPRESOR J-401. (FUENTE: ENAP REFINERÍAS BÍO BÍO).	74
.....	
FIGURA 4-17.TENDENCIA PK-PK VÁLVULAS DE SUCCIÓN (FILTRO 10 KHZ). (FUENTE: ENAP REFINERÍAS BÍO BÍO).	75
.....	
FIGURA 4-18.TENDENCIA PK-PK VÁLVULAS DE DESCARGA (FILTRO 20 KHZ). (FUENTE: ENAP REFINERÍAS BÍO BÍO).	75
.....	
FIGURA 4-19. TENDENCIA PK-PK VÁLVULAS DE SUCCIÓN (FILTRO 10 KHZ). (FUENTE: ENAP REFINERÍAS BÍO BÍO).	76
.....	
FIGURA 4-20. TENDENCIA PK-PK VÁLVULAS DE DESCARGA (FILTRO 20 KHZ). (FUENTE: ENAP REFINERÍAS BÍO BÍO).	76
.....	
FIGURA 4-21. ANÁLISIS DE TERMOGRAFÍA, COMPRESOR J-401. (FUENTE: ENAP REFINERÍAS BÍO BÍO).	77
.....	
FIGURA 4-22.FOTOGRAFÍA VÁLVULAS DE SUCCIÓN. (FUENTE: ENAP REFINERÍAS BÍO BÍO).	80
FIGURA 4-23.FOTOGRAFÍA VÁLVULAS DE DESCARGA. (FUENTE: ENAP REFINERÍAS BÍO BÍO).	81
FIGURA 4-24.FOTOGRAFÍA CÁMARA DE SUCCIÓN. (FUENTE: ENAP REFINERÍAS BÍO BÍO).	81
FIGURA 4-25.FOTOGRAFÍA CÁMARA DE DESCARGA. (FUENTE: ENAP REFINERÍAS BÍO BÍO).	81
FIGURA 4-26.VÁLVULAS DE SUCCIÓN Y DESCARGA LIMPIAS. (FUENTE: ENAP REFINERÍAS BÍO BÍO).	82
.....	

ÍNDICE DE TABLAS.

TABLA 1. PRINCIPALES SOCIOS E&P DE LA EMPRESA ENAP.	6
TABLA 2. PRINCIPALES SOCIOS EN R&C DE LA EMPRESA ENAP.....	7
TABLA 3. RANGOS DE FRECUENCIA PARA DISTINTOS ACELERÓMETROS.	46
TABLA 4. LISTADO DE EQUIPOS A EVALUAR, DIFERENCIADO DE SUS DIFERENTES PLANTAS DE TRABAJO.	58
TABLA 5. POSICIÓN DE LOS COMPONENTES DEL COMPRESOR RECIPROCO J-561A DE LA PLANTA CCR.	61
TABLA 6. TEMPERATURAS VÁLVULAS DE SUCCIÓN Y DESCARGA COMPRESOR J-401	77

CAPÍTULO 1: Introducción.

1.1 Introducción.

La división de ingeniería en mantención tiene la función de maximizar la disponibilidad y seguridad de las plantas e instalaciones de ERBB, para asegurar el cumplimiento del programa de producción, utilizando de forma eficiente los recursos, cuidando la protección de las personas y el medio ambiente, Por lo que es muy importante realizar inspecciones en todos los equipos de la refinería.

Los compresores recíprocos cumplen una función importante dentro de todas las plantas de la empresa ya que alimentan las líneas de producción, por lo que es necesario mantenerlos en funcionamiento continuo evitando la detección de equipos no programada.

Hoy en día uno de los mayores problemas es la detección de equipos no programadas es por las fallas de las válvulas de succión y descarga de los compresores recíprocos, esto deriva a que hay que tener bastante cuidado en estos equipos, realizando monitoreo cada cierto tiempo. En la actualidad existen métodos de medición de las válvulas; un método es el análisis de termografía, el cual consiste en estudiar el comportamiento de temperaturas que presentan las válvulas. Este método no es totalmente eficiente, porque detecta la falla cuando ya está avanza en la válvula.

Hoy en día existe un método nuevo llamado análisis de vibraciones en alta frecuencia mediante la técnica del Peak VUE, esta técnica es bastante útil ya que puede detectar fallas incipientes en las válvulas de succión y descarga, lo que genera una ventaja al momento de programar una detención del equipo. Cabe destacar que la técnica del Peak VUE es exagerada, ya que puede detectar anomalías en las válvulas de succión y descarga antes de que estas generen un daño o una baja de eficiencia en los compresores.

Es beneficioso combinar estas dos técnicas de monitoreo en las válvulas, ya que mediante un análisis de vibraciones y tomografías se puede llevar un registro histórico del comportamiento de estos componentes. Logrando detectar patrones de fallas en las válvulas y así idealmente reducir los tiempos de paro de equipos no programados.

1.2 Planteamiento del Problema.

Actualmente en ENAP refinería Bío Bío se utiliza la técnica de termografía para evaluar el estado de salud de las válvulas de succión y descarga de los compresores recíprocos, realizando inspecciones cada 30 días, este análisis solo permite evaluar si la válvula presenta recirculaciones, siendo poco concluyente en algunos casos, o simplemente no acusando falla.

El análisis de termografía consiste en un análisis de temperatura instantáneo del equipo, este tipo de análisis se debe realizar cuando el equipo está trabajando en sus condiciones normales. Hay que tener en cuenta que las imágenes térmicas muestran las condiciones de funcionamiento a través de la temperatura superficial, que nos dará una estimación aproximada de la temperatura interna.

En cuando al procedimiento, hay que tener en consideración que los problemas mecánicos se suelen encontrar comparando las temperaturas de superficie de elementos similares que funcionen en circunstancias parecidas. Lo más aconsejable es crear una rutina de inspección, para disponer de imágenes de referencia para comparar en posteriores inspecciones.

En consecuencia de lo anterior, surge la necesidad de realizar un análisis más detallado que nos permita analizar la falla y establecer una frecuencia de falla para cada válvula de succión y descarga, por lo que es necesario realizar un análisis de vibraciones en alta frecuencia para analizar de manera incipiente el equipo, y así obtener resultados tempranamente.

El análisis de vibración en alta frecuencia es muy útil ya que aplicando la técnica de Peak VUE se podrán evaluar las válvulas de succión y descarga de cada compresor recíproco de la refinería, logrando detectar fallas incipientes en estas, y así lograr un seguimiento en el tiempo de cada válvula.

Mediante el análisis de vibraciones en alta frecuencia, con la técnica del Peak VUE podremos ver y evaluar el comportamiento del fluido cuando pasa por las válvulas de succión y descarga para luego poder realizar un seguimiento en el tiempo de cada válvula para la detección de fallas insipientes en estas.

1.3 Objetivos.

Objetivos generales.

Estudiar la factibilidad de la técnica del Peak VUE para la detección de fallas incipientes en el monitoreo de las válvulas de succión y descarga de los compresores recíprocos de ENAP refinерías Bío Bío, mediante análisis de vibraciones en alta frecuencia.

Objetivos Específicos.

- Conocer el funcionamiento de compresores recíprocos.
- Identificar los compresores recíprocos de ENAP refinерías Bío Bío, junto a sus componentes.
- Monitorear las válvulas de succión y descarga de los compresores.
- Analizar las válvulas de compresores recíprocos en alta frecuencia, con la técnica del Peak VUE para detectar sus posibles fallas.
- Analizar con termografías las válvulas de succión y descarga de los compresores recíprocos de ENAP refinерías Bío Bío.
- Estudiar el comportamiento de la forma de onda de las válvulas de succión y descarga entregadas por el Peak VUE para el reconocimiento de patrones de fallas para la determinación de la salud en las válvulas.

CAPÍTULO 2: Empresa Nacional del Petróleo.

Este capítulo presenta una descripción general de la Empresa Nacional del Petróleo focalizando la información en una descripción general, principales socios, historia y división en la que se desarrolla esta memoria. De esta forma se establecen los antecedentes generales de la empresa, de la División de Ingeniería en Mantenimiento (DIM) en el área de equipos rotatorios. Además, se explica el proceso productivo general para la refinación del petróleo mencionando los productos comercializados derivados de él.

2.1 Historia.

Luego del descubrimiento del primer pozo de petróleo del país, en el sector de Springhill, en Magallanes, el 29 de diciembre de 1945, el Estado de Chile se propuso crear la Empresa Nacional del Petróleo, cuya fundación ocurrió oficialmente el 19 de junio de 1950, con la publicación de la Ley N° 9.618. El hallazgo de petróleo en Springhill fue realizado por el equipo de exploradores encabezado por el ingeniero Eduardo Simian Gallet, y dio paso a nuevas perforaciones de pozos que resultaron productores. De esta forma, el equipo encabezado por Simian recomendó a la Corporación de Fomento de la Producción (Corfo) la creación de ENAP, para explotar comercialmente los yacimientos descubiertos en Magallanes.

Una de las primeras metas que se propuso la naciente empresa fue levantar una refinería de petróleo en el país, tarea que culminó en 1954, con la puesta en marcha de la Refinería de Petróleo de Concón (hoy Refinería Aconcagua). Luego, en 1959, se construyeron las primeras instalaciones logísticas para el almacenamiento y distribución de combustibles refinados en Maipú y, al año siguiente, la terminal marítima de Gregorio, en Magallanes.

En 1962 entró en operación la Planta de Gasolina de Cullen (Magallanes), para continuar en 1966 con la inauguración de la segunda refinería del país, ubicada en la Octava Región (hoy Refinería Bio Bío) y la construcción del poliducto desde esta Refinería hasta San Fernando, en la Sexta Región. Desde esta ciudad, este ducto conecta con otro que administra la empresa Sonacol, que transporta combustibles a la Planta de Almacenamiento ubicada en Maipú, en la Región Metropolitana.

En 1981 ENAP integró el negocio logístico, con plantas de almacenamiento de combustibles líquidos y gaseosos en Maipú, San Fernando y Linares. Actualmente, esta actividad se realiza a

través del Departamento de Almacenamiento y Oleoductos, que pertenece a la filial Enap Refinerías S.A.

El 1 de enero de 2004 se fusionaron las refinerías en una sola empresa: Enap Refinerías S.A.

En 1990 ENAP fundó la Sociedad Internacional Petrolera S.A., para explorar y explotar yacimientos de hidrocarburos en el extranjero. A partir de 2005 esta filial pasó a llamarse Enap Sipetrol S.A.

En el área de Magallanes, ENAP explota yacimientos con valor comercial de hidrocarburos y proporciona servicios logísticos petroleros y portuarios a importantes clientes que operan en el rubro energético. Además, en los últimos años ha emprendido una fuerte campaña exploratoria de nuevas reservas de gas en Magallanes, a la vez que ha constituido nuevas alianzas con otras empresas para diversificar las fuentes de energía en el país.

2.2 Descripción General de la Empresa.

La Empresa Nacional del Petróleo es una empresa pública de propiedad del Estado de Chile cuyo giro principal es la exploración, producción, refinación y comercialización de hidrocarburos y sus derivados. ENAP Refinerías S.A. es una de las filiales que pertenece a la línea de negocios Refinación y Comercialización, fundada en el año 2004 a partir de la fusión de las refinerías Concón y Petrox, ubicadas en las regiones de Valparaíso y Bío Bío respectivamente. La filial tiene una capacidad de destilación de 220.000 [barriles/día] y puede abastecer a más del 80% de los requerimientos de combustibles en Chile.

2.2.1 Misión.

Empresa de energía, 100% del Estado de Chile, líder en hidrocarburos, integrada, que provee productos y servicios que satisfacen las necesidades de sus clientes y contribuye al desarrollo sustentable de los países y de las comunidades en que se inserta, operando en forma competitiva y rentable.

2.2.2 Visión.

Asegurar un abastecimiento de energía competitivo tanto en precio como en calidad, lograr la preferencia de nuestros clientes, siendo líderes como operador comercial y logístico, trabajando con los mejores niveles de eficiencia y confiabilidad y con los más altos estándares de seguridad y prevención de accidentes e incidentes. Ello, con un equipo competente, colaborativo y comprometido, siendo reconocidos como empresa líder en desarrollo sustentable que respeta las comunidades donde se inserta y valorada por su preocupación por el medio ambiente.

2.3 Principales Socios.

Desde la década de 1990 en adelante, ENAP y filiales han emprendido una vigorosa expansión productiva, con recursos propios y en asociación con otras compañías, nacionales e internacionales. Esto último ha ocurrido en las dos líneas de negocios de la Empresa, Exploración y Producción (E&P) y Refinación y Comercialización (R&C).

2.3.1 Principales Socios en E&P.

Tabla 1. Principales socios E&P de la empresa ENAP.

YPF	Argentina
Petro Ecuador	Ecuador
Kuwait Energy Company	Kuwait
Petroshad	Egipto
Geopark	Estados Unidos
REPSOL	España
Wintershall	Alemania
PAE	Argentina
OMV	Australia
ENEL	Italia
Methanex	Canadá

2.3.2 Principales Socios en R&C.

Tabla 2. Principales socios en R&C de la empresa ENAP.

Foster Wheeler	Estados Unidos
Ferrostaal	Alemania
Técnicas Reunidas	España
BG	Reino Unido
Endesa	España
Metrogas	Chile
Grupo Romero	Perú y Ecuador
AGA Chile	Chile
Gasco	Chile
Sigdo Koppers	Chile
Naviera Untragas Ltda.	Chile
Copec	Chile
Enex	Chile
Petrobras Chile Distribuidora Ltda.	Chile
Abastible	Chile
Lipigas SA.	Chile
Colbún	Chile

2.4 ENAP Refinería Bío Bío (ERBB).

Denominada Petrox antes del 2004, la Refinería Bío Bío está ubicada en la comuna de Hualpén y se encuentra en operaciones desde 1966, en la Figura 2-1 se muestra una fotografía satelital en donde se pueden apreciar las instalaciones de ERBB.



FIGURA 2-1 Fotografía satelital de ENAP refinerías Bío Bío (Fuente: Google Maps).

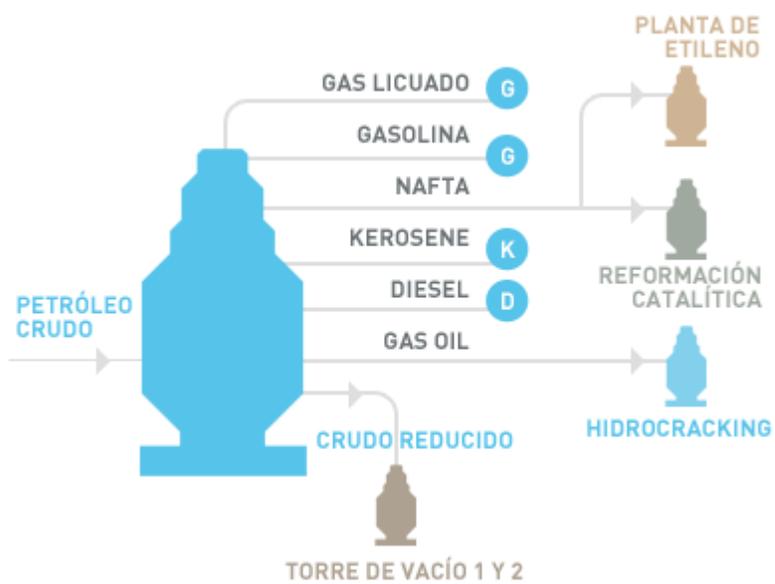
Esta refinería tiene una capacidad de destilación de 116.000 [barriles/día] produciendo principalmente: Etileno, propileno, propano butano, gasolinas, keroseno de aviación, petróleos diesel, petróleos combustibles, pitch asfáltico, Coke, Sulfhidrato de Sodio y Azufre. La infraestructura de esta refinería está compuesta por plantas destinadas a la refinación del crudo y el procesamiento de cargas complementarias, plantas de tratamiento, almacenamiento y oleoductos, además, de instalaciones de seguridad y de control de calidad.

2.4.1 División Ingeniería de Mantenimiento (DIM).

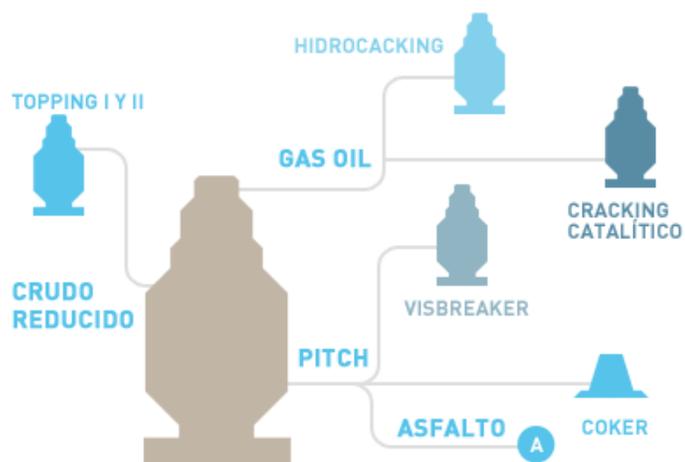
La misión de esta división es: “Maximizar la disponibilidad y seguridad de las plantas e instalaciones de ERBB, para asegurar el cumplimiento del programa de producción, utilizando de forma eficiente los recursos, cuidando la protección de las personas y el medio ambiente” (p.3), según lo indica (División Ingeniería de Mantenimiento, 2017). En específico, la tarea que cumple esta división es entregar el soporte técnico y teórico para ejecutar los servicios de mantenimiento que involucran trabajos de inspección y predicción de fallas en base al monitoreo de equipos estáticos, piping y equipos rotatorios, empleando técnicas y tecnologías de ingeniería de confiabilidad y proporcionando los debidos análisis de fallas.

2.4.2 Área Equipos Rotatorios.

Es el sector de la DIM encargado del monitoreo y diagnóstico de los equipos rotatorios de la refinería aplicando técnicas predictivas de mantenimiento. Entre ellas se encuentran el análisis de vibraciones, termografías, evaluación de variables de operación e inspecciones visuales. Dentro de los objetivos definidos por (División Ingeniería de Mantenimiento, 2017) para el Área Equipos Rotatorios en el año 2017 se encuentran: “Análisis de vibraciones en alta frecuencia para definir el estado de salud de las válvulas succión y descarga en los compresores recíprocos”.



a)

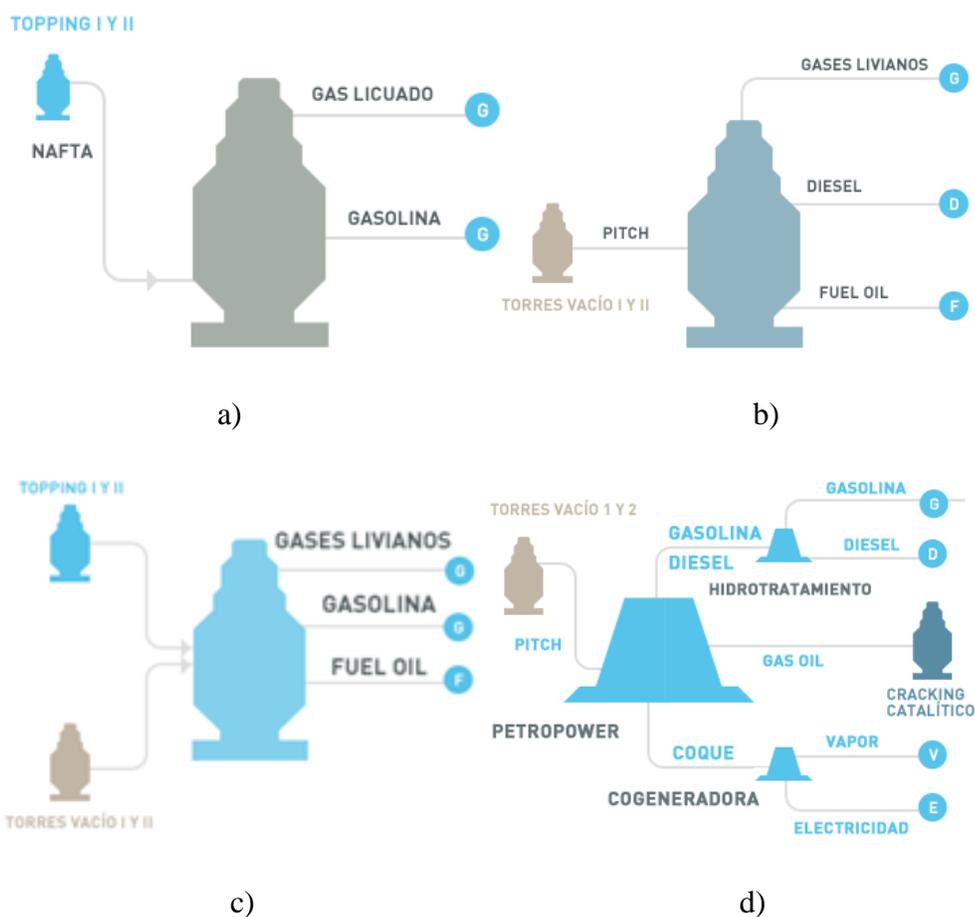


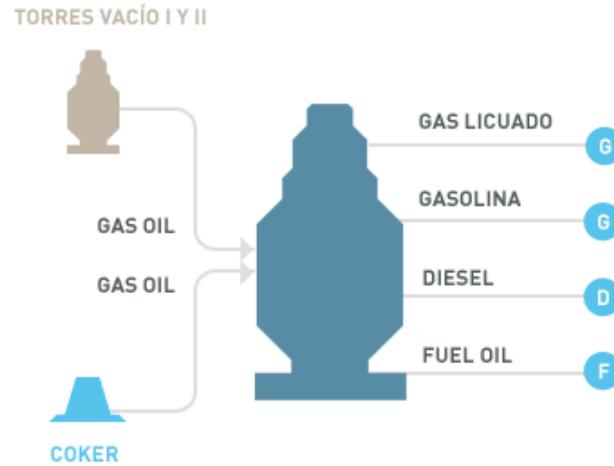
b)

FIGURA 2-3. Unidades de fraccionamiento. a) Topping, b) Vacío. (Fuente: www.enap.cl)

2.5.2 Síntesis de hidrocarburos nobles y depuración de los productos.

Estos procesos se emplean para generar productos de mejor calidad y reducir la presencia de compuestos contaminantes en los productos derivados del petróleo crudo. Consisten en nuevas combinaciones de átomos de carbono y de hidrógeno, deshidrogenación, isomerización y reformación debido a la acción de diferentes estados de temperatura, presión y catalizadores. Las plantas que cumplen estas tareas son: Reformación Catalítica, Visbreaker, Hidrocracking, Coquización Retardada y Cracking Catalítico. En la Figura 2-4 se muestran los esquemas asociados a dichas plantas.





e)

FIGURA 2-4. Unidades de transformación. A) Ref. Catalítica, b) Visbreaker, c) Hidrocracking, d) Coquización Retardada, e) Cracking Catalítico. (Fuente: www.enap.cl)

Además de estas dos grandes operaciones existen procesos secundarios que garantizan el funcionamiento de la refinería, como lo son las plantas de suministros (electricidad, gas, vapor y agua), los equipos que conforman la red de seguridad contra incendio, las plantas de movimiento de producto y los laboratorios de control de calidad.

2.6 Productos que comercializa ENAP.

Luego de rigurosos controles de calidad los resultados de la refinación están preparados para comercializarse. Los productos que entrega ENAP a su diversidad de clientes son combustibles, productos petroquímicos y productos especiales, el detalle de estos se muestran en la Figura 2-5.

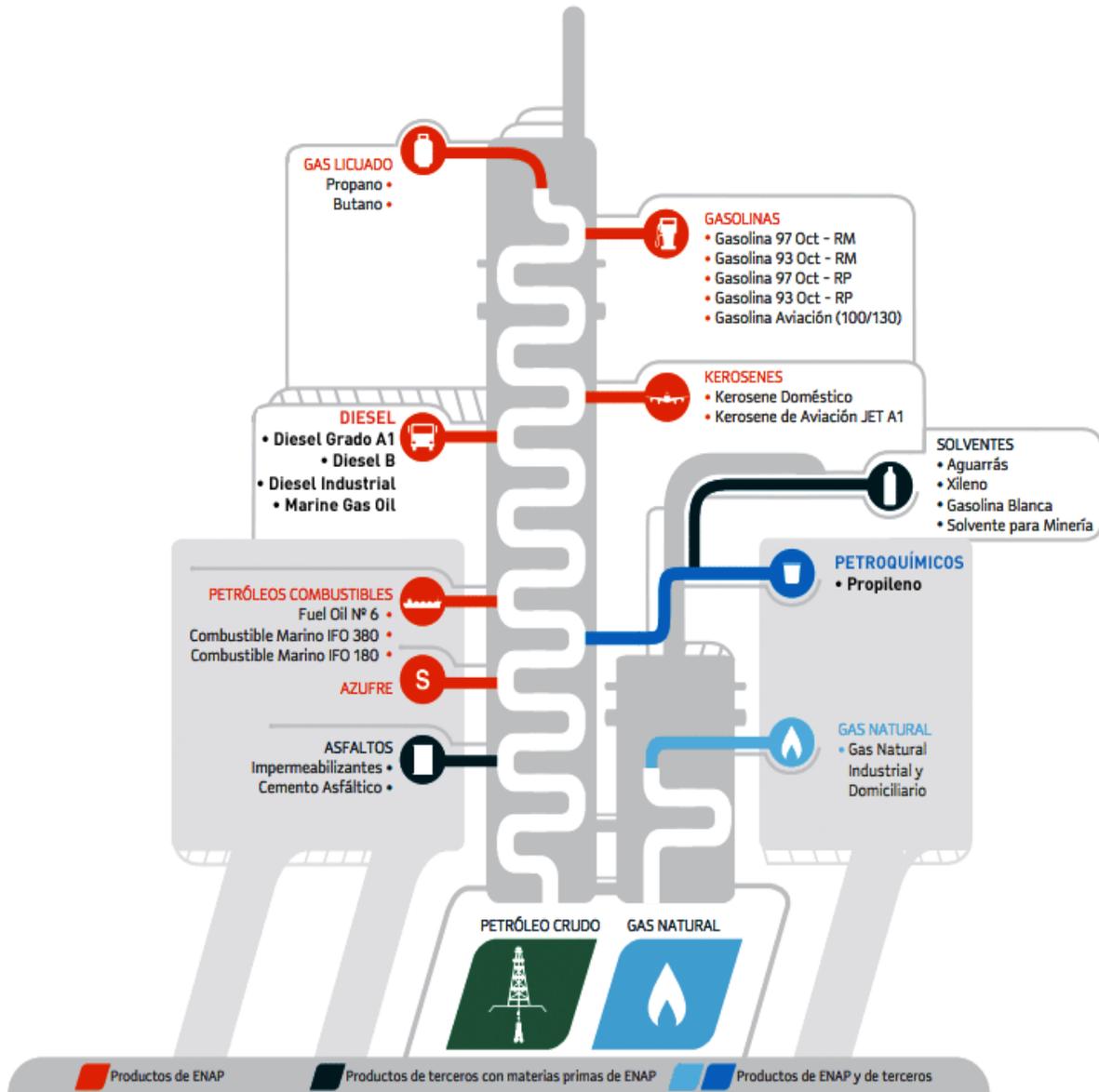


FIGURA 2-5. Productos que comercializa ENAP. (Fuente: www.enap.cl)

CAPÍTULO 3: Marco Teórico.

En el siguiente capítulo se presenta todo lo que tiene relación con los compresores recíprocos. Aquí se identificarán los tipos de compresores recíprocos que existen, el funcionamiento que estos tienen y lo más importante, la identificación de los factores que afectan la confiabilidad de los compresores.

De la mano con lo anterior se presentarán las válvulas de succión y descarga que se encuentran instaladas en los compresores recíprocos de ENAP refinerías Bío Bío, identificando su montaje, modos de fallas y algunas recomendaciones generales para una mayor esperanza de vida de estos elementos mecánicos.

Se da a conocer las estrategias de mantenimiento, las vibraciones mecánicas, los tipos de vibraciones que existen y sus parámetros de medición. Por último se estudia la técnica de análisis de vibraciones en alta frecuencia Peak VUE, junto con el análisis de termografía con el que se le hace seguimiento a las válvulas de succión y descarga de los compresores.

3.1 Compresores.

Un compresor es una máquina de fluido que tiene por finalidad aumentar la presión y desplazar ciertos tipos de fluidos denominados compresibles, tales como gases y vapores. Esto se realiza a través de un intercambio de energía entre la máquina y el fluido, en el cual el trabajo ejercido por el compresor es transferido a la sustancia que pasa por él convirtiéndose en energía de fluido.

Los compresores son máquinas térmicas, ya que, su fluido es compresible, sufre un cambio apreciable de densidad y temperatura.

Hoy en día, en la industria existen diferentes tipos de modelos de compresores, alguno de estos son:

- Compresores alternativos o recíprocos.
- Compresor de desplazamiento positivo.
- Compresor de embolo.
- Compresor rotativo de paletas.

3.1.1 Compresores recíprocos.

Un compresor recíproco es una máquina de desplazamiento positivo que utiliza un pistón para comprimir un gas y entregarlo a alta presión. Son uno de los equipos más críticos en una planta de producción, y merecen una atención especial. Gasoductos de transmisión, plantas petroquímicas, refinerías y muchas otras industrias todos dependen de este tipo de equipos.

El funcionamiento mecánico del compresor recíprocos consiste básicamente en el desplazamiento lineal de un pistón secuencialmente de atrás hacia delante dentro de un cilindro, logrando reducir el volumen de la cámara donde se deposita el gas, este efecto origina el incremento de presión del gas, hasta alcanzar la presión de descarga, desplazando el fluido a través de las válvulas de descarga del cilindro.

El cilindro está equipado con válvulas de operación automática las que funcionan por diferencia de presión. La válvula de succión, abre cuando el movimiento del pistón ha reducido la presión por debajo de la presión de entrada en la línea. La válvula de descarga, se cierra cuando la presión en el cilindro no excede la presión de la línea de descarga, previniendo de esta manera el flujo inverso.

Varios compresores se encuentran en casi todas las instalaciones industriales. Algunos tipos de gases comprimidos son:

1. De aire para sistemas de aire comprimido de herramientas e instrumentos.
2. Hidrógeno, oxígeno, etc. para procesos químicos.
3. fracciones de hidrocarburos ligeros en la refinación.
4. Varios gases para almacenamiento o transmisión.

Posteriormente, se puede apreciar un compresor recíproco de ENAP refinería BIO BÍO de la planta MHC (Media Hidrocracking), el cual está equipado con 4 cámaras de compresión.



FIGURA 3-1. Compresor recíproco J-1202A, ENAP refinería BÍO BÍO. (Fuente: ENAP)

3.1.1.1 Tipos de compresores recíprocos

A continuación, se da una descripción general de los tipos de compresores más importantes en la industria, el tipo de compresor a ocupar va a depender netamente de los requerimientos que tenga el usuario.

➤ Simple etapa.

Son compresores de una sola relación de compresión, en otras palabras quiere decir que incrementa la presión solo una vez, estos compresores están compuestos principalmente por un cilindro y un enfriador inter-etapa (equipos que conforman una etapa de compresión).

➤ Compresor de múltiples etapas.

Tal como su nombre lo indica, son compresores que poseen varias etapas de compresión, en los que cada etapa incrementa progresivamente la presión hasta lograr alcanzar el nivel requerido. El número máximo de etapas que puede tener un compresor de estas características son 6 y depende del número de cilindros; el número de cilindros no es igual al número de etapas.

➤ Compresores integrales

Estos compresores utilizan motores de combustión interna para transmitirle la potencia al compresor; los cilindros del motor están montados en una sola estructura y acoplados al mismo cigüeñal. Estos compresores pueden ser de simple o múltiples etapas; generalmente son de baja velocidad de rotación 400 -900 RPM, además tienen un bajo consumo de combustible; sin embargo

son más costosos y más difícil de transportar a comparación de los compresores separables. Tienen un rango de potencia de hasta 5000 HP. Algunas ventajas que cabe señalar son, su alta eficiencia, larga vida de operación y bajo costo de operación y mantenimiento comparado con los compresores separables de alta velocidad.

➤ **Compresores separables.**

En este tipo de equipos, el compresor y el motor poseen cigüeñales y monturas diferentes acoplados directamente, pueden ser de simple o múltiples etapas. Este tipo de equipos por lo general son unidades de alta velocidad las cuales pueden variar de 900 a 1800 RPM los que pueden ser accionados por motores eléctricos, motores de combustión interna o turbinas, manejan flujos menores de gas que los integrales y pueden tener una potencia de hasta 5000 HP. Entre sus ventajas encontramos la fácil instalación y transporte, además de una amplia flexibilidad operacional.

Componentes de un compresor recíproco:

A pesar de la gran variedad de equipos existentes en el mercado, se pueden distinguir componentes esenciales que son comunes en todos los compresores recíprocos de pistón, tales como:

Cilindro: Es la cama de compresión por donde se desplaza el pistón. La parte inferior de los cilindros están equipados con camisas de sacrificio reemplazables, las que se desgastan con el roce generado por el desplazamiento relativo del pistón, la camisa protege la pared del cilindro. Fabricados comúnmente de hierro fundido, fundición nodular y acero fundido.

Pistón: Esta encargado de trasladar la energía mecánica desde el cigüeñal hasta el gas que se encuentra almacenado en el cilindro. Generalmente se fabrican de hierro fundido, tratados superficialmente con bronce o metal Babbitt para reducir los efectos de la fricción.

Anillos del pistón: Proveen un sello los que minimizan la fuga de fluido entre el pistón y la camisa y aportan a reducir el calor del pistón. Se fabrican de materiales que se desgastan antes que la camisa, como por ejemplo teflón, baquelita, termoplásticos.

Vástago: Barra que une el pistón con la cruceta. Generalmente son fabricados de una aleación de acero de alta calidad, con un tratamiento térmico que le permita tener dureza superficial y ductilidad en el núcleo (temple por inducción).

Sellos del vástago: Conjunto de aros, ubicados en el lado del cigüeñal, que previenen la pérdida de fluido alrededor del vástago y el ingreso de aire. Fabricados comúnmente de plásticos, bronce, babbitt, teflón.

Cruceta: Embolo rígido que transmite el empuje desde la biela al vástago. Fabricados de acero con un recubrimiento de un material no ferroso.

Biela: Barra que une la cruceta con el cigüeñal, experimenta un movimiento combinado de rotación y traslación, generalmente fabricados de acero forjado.

Cigüeñal: Árbol que transmite la energía de rotación, proveniente del motor a la biela. Fabricados generalmente de aleaciones de acero y provistas de un contrapeso apernado o integrado, el cual disminuye los desbalances al rotar.

Cojinetes: La mayoría de los compresores utilizan cojinetes hidrodinámicos, el aceite entra al cojinete a través de los agujeros de suministro, que van perforados estratégicamente a lo largo de la circunferencia del cojinete que suministran y distribuyen formando una película de aceite en el contacto entre las partes móviles y estacionarias.

Válvulas: Es un elemento de gran importancia dentro del compresor ya que permite la entrada y salida del gas al cilindro; en caso de cilindros de doble acción existen válvulas de succión a ambos lados del cilindro, mientras que en cilindros de simple acción solo se encuentran a un solo lado. Las válvulas pueden ser válvulas de poppet o válvulas de plato.

En las siguientes figuras se pueden apreciar las componentes de un compresor reciprocante. En la Figura 3-2 se puede observar los componentes que integran el sistema de transformación y transmisión del movimiento. En la Figura 3-3 se aprecian las componentes que forman parte del sistema de compresión de un compresor de doble efecto.

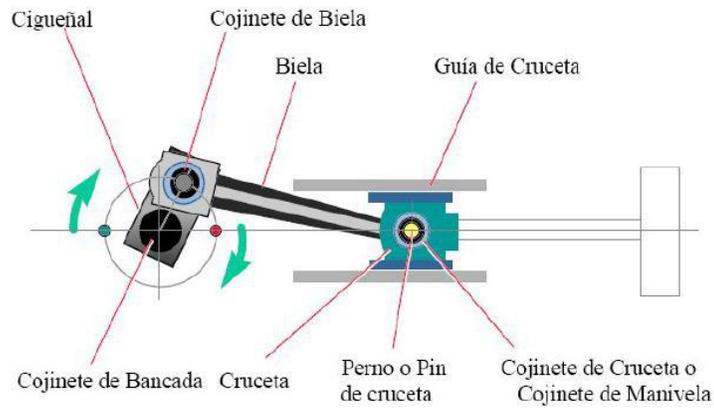


FIGURA 3-2. Sistema de transmisión de un compresor recíproco. (Fuente: Hoerbiger, 2009).

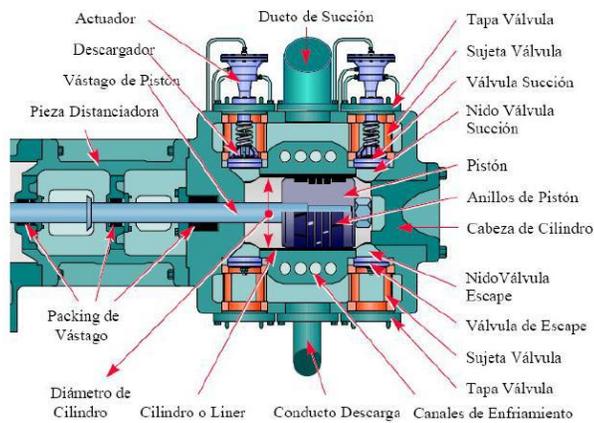


FIGURA 3-3. Componentes internos del sistema de compresión de un compresor recíproco. (Fuente: Hoerbiger, 2009).

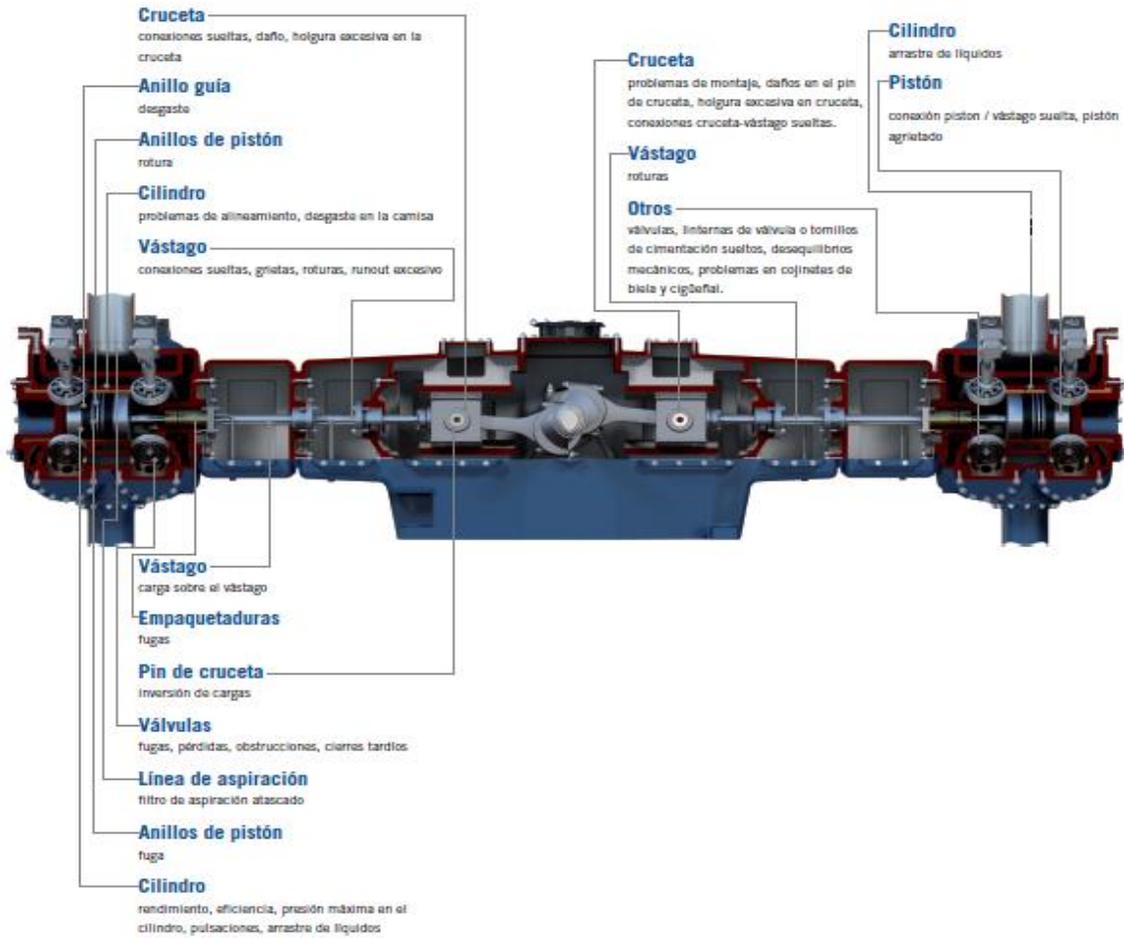


FIGURA 3-4. Vista corte vertical de un compresor recíprocente (Fuente: Dresser-Rand.)

3.1.1.2 Funcionamiento de los compresores recíprocos.

La función principal del compresor recíproco es el comprimir un gas mediante el desplazamiento de un pistón dentro de un cilindro.

A continuación, se describe el ciclo ideal y real de un compresor recíprocos.

Ciclo Ideal.

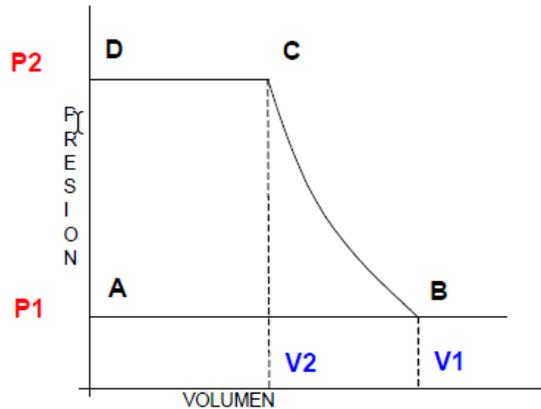


FIGURA 3-5. Ciclo ideal de un compresor recíproco P/V. (Fuente: Compresores recíprocos, Pedro Gómez R.).

En el ciclo ideal la descarga real del gas es 100%. El vector A-B representa el movimiento del stroke o carrera de succión, en el cual, el gas empieza a ingresar al cilindro a través de la válvula de succión hasta llegar a V_1 , durante este movimiento la P_1 permanece constante y es igual a la presión de succión.

En el punto B la fuerza desarrollada por el motor actúa positivamente y comprime el gas hasta llegar al punto C, en el cual se alcanza la presión deseada de descarga P_2 y es ese momento la válvula de descarga se habrá permitido la salida del gas hasta el punto D. El punto D corresponde a un volumen de cero cuando se cierran las válvulas de descarga. Aquí empieza el retroceso del pistón, pasando del punto D al punto A y de la presión P_2 a P_1 idealmente.

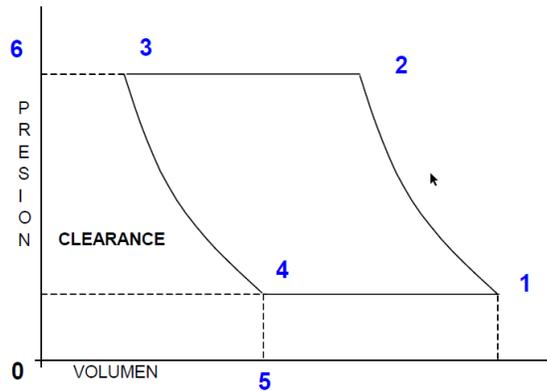
Ciclo real.

FIGURA 3-6. Ciclo real de un compresor recíproco P v/s V. (Fuente: Compresores recíprocos, Pedro Gómez R.).

En la posición 1, aquí es el inicio del stroke o carrera de compresión. El cilindro está lleno de gas a la presión de succión, el pistón empieza a desplazarse hasta llegar a la posición 2. En la posición 2 la presión del cilindro supera a la presión existente en la tubería de descarga originando la apertura de la válvula de descarga, iniciándose así la descarga del cilindro hasta la posición 3. En la posición 3 se completó toda la descarga, en este momento termina la carrera del stroke, el compresor no puede lograr un acoplamiento perfecto de la superficie circular del pistón y el extremo del cilindro, este es el origen del volumen muerto del gas.

Al empezar el retorno del pistón, la presión dentro del cilindro será mayor que la presión de succión, porque el volumen muerto está a la presión de descarga y se ira expandiendo con la consecuente disminución de presión a lo largo de la curva 3-4, hasta llega a la presión de succión en el punto 4. En la posición 4 se produce la apertura de la válvula de succión permitiendo el ingreso del gas al cilindro, esta acción está representada por el tramo 4-1.

A continuación, en la Figura 3-7 se representa esquemáticamente el movimiento que tiene el pistón dentro del cilindro, al momento de comprimir.

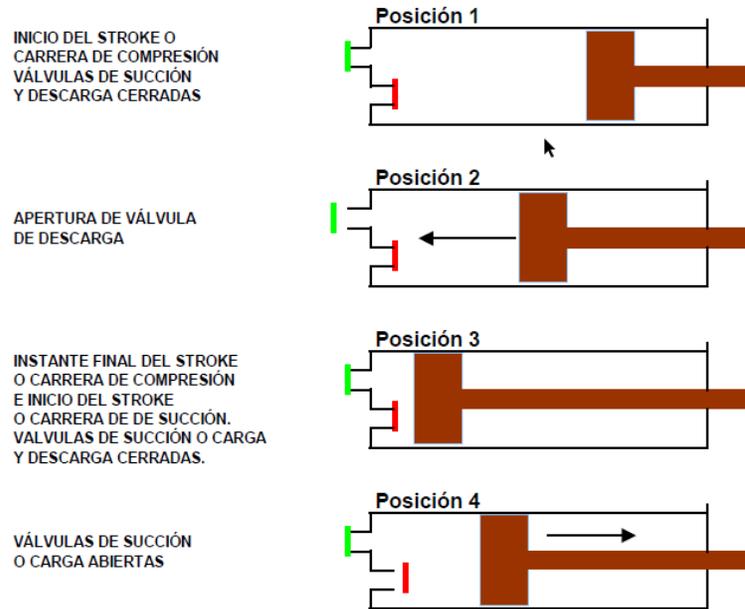


FIGURA 3-7. Movimiento del pistón dentro del cilindro. (Fuente: Compresores recíprocos, Pedro Gómez R.).

3.1.1.3 Factores que afectan la confiabilidad de un compresor recíprocante.

En 1994 la Asociación Nacional de Petroquímicas y Refinerías (NPRA, por su denominación en inglés) de Estados Unidos, actualmente llamada “American Fuel & Petrochemical Manufacturers” (AFPM), realizó una encuesta a 20 empresas que empleaban compresores recíprocos en sus cadenas productivas. Se registraron las fallas que afectaban a un total de 52 compresores de potencias entre 37,3 [kW] hasta 9694 [kW], que acumularon un total de 171 cilindros de diversas dimensiones y presiones de operación. El estudio arrojó que cerca del 36% de las fallas presentadas por los compresores provenían de deficiencias originadas en las válvulas de compresión, un 18% de las fallas se producían en los elementos que hermetizan el sistema y el restante porcentaje se distribuía desde problemas de proceso, cilindros, tuberías, sistemas de refrigeración, sistema motriz, entre otros, tal como se aprecia en la Figura 3-8.

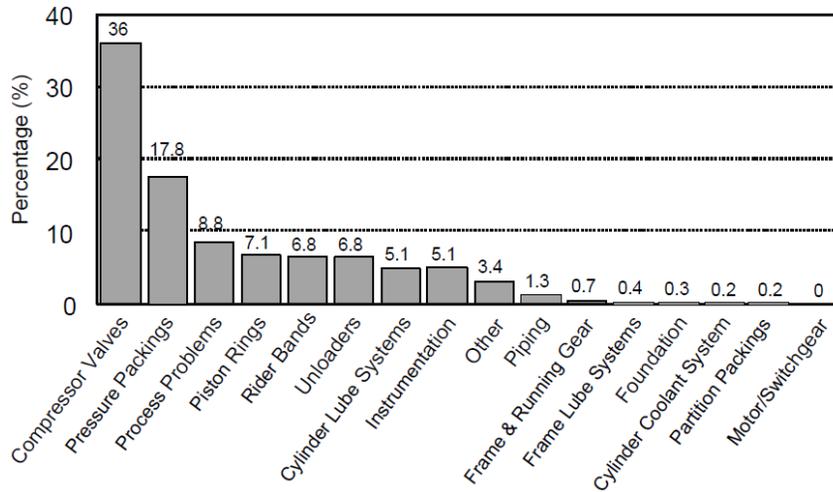


FIGURA 3-8. Causas de paradas no programadas en compresores recíprocos. (Fuente: Woollatt, 2001).

3.2 Válvulas.

Las válvulas de succión y descarga usadas en un cilindro del compresor reciproco varia en el tipo y la construcción según lo requerido por el cilindro en particular y las condiciones de operación.

3.2.1 Funcionamiento.

Las válvulas de un compresor son un dispositivo para permitir un flujo relativamente sin restricción de gas en una sola dirección. Cada extremo operativo debe tener dos válvulas o un conjunto de válvulas; una para admitir el gas antes de la compresión y la otra para descargar el gas después de la compresión.

Las válvulas que se utilizan hoy en día son de funcionamiento automático, se abren y se cierran únicamente a través de la diferencia de presión del gas entre el lado la línea de alimentación y el cilindro del compresor.

Cada vez que se abre una válvula se produce un impacto contra la placa de tope y cada vez que se cierra hay un impacto en el asiento. Aunque la mayoría de las fallas de las válvulas se debe al impacto (el impacto en las válvulas de descarga es más severo) hay otras causas a menudo no tan evidentes.

La válvula de succión se abre en el punto A cuando la velocidad del pistón (y por lo tanto la velocidad del gas) es moderada aproximadamente al 90% de la velocidad del pistón, la válvula de succión se cierra cuando la velocidad del pistón es cero, por lo que la válvula debe flotar hasta su asiento.

En el punto C, se abre la válvula de descarga, el pistón está cerca de su velocidad máxima por lo que puede haber un impacto considerable contra la placa de tope. En el punto D la válvula de descarga se cierra. Aquí de nuevo la velocidad del pistón es cero y no debe haber un impacto apreciable.

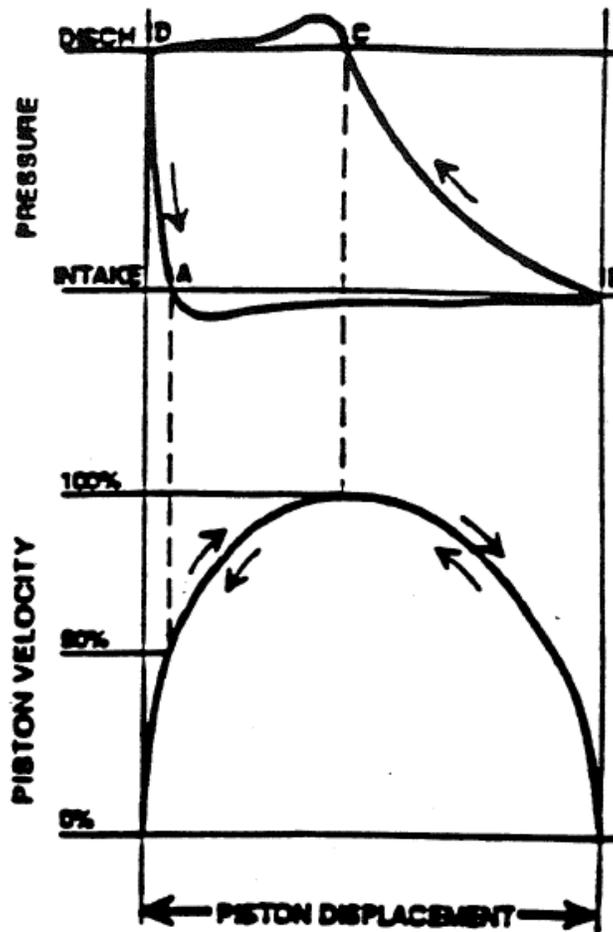


FIGURA 3-9. Relación del comportamiento de las válvulas de succión y descarga con la velocidad del pistón. (Fuente: Manual de compresor Dresser-rand).

3.2.2 Tipos de válvulas Utilizadas en ENAP refinерías Bío Bío.

En ENAP refinерías Bío Bío existen dos tipos de válvulas utilizadas comúnmente en los cilindros de los compresores recíprocos. Existen las válvulas de poppet y las válvulas de platos las cuales cumplen la función de dejar circular el gas en la succión y descarga del cilindro del compresor.

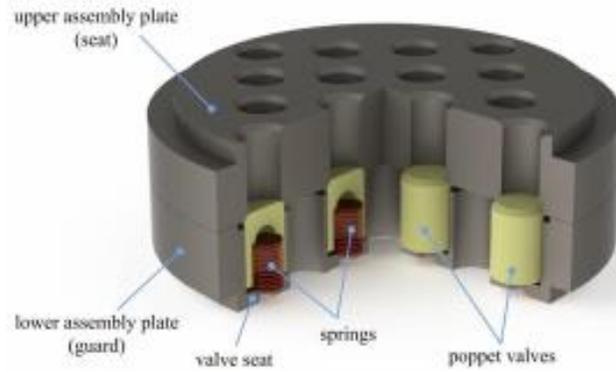


FIGURA 3-10. Ensamblaje válvula de Poppet. (Fuente: Dresser-Rand).



FIGURA 3-11. Válvula de plato. (Fuente: Dresser-Rand).

3.2.3 Montaje de las válvulas.

Las válvulas existentes en la refinería Bío Bío poseen diferentes montajes dependiendo de los requerimientos mecánicos que se necesiten en los compresores, dentro de estos diferentes tipos de montajes tenemos:

Montaje en válvulas de plato:

Las válvulas de plato tienen una araña de funcionamiento neumático, la cual regula el funcionamiento, es decir las activa o las deja inactiva las válvulas, con la finalidad de regular la carga de trabajo del compresor, el cual puede estar al 100%, 75 %, 50%, etc. Esto depende netamente del número de válvulas que hay que hay en el cilindro.

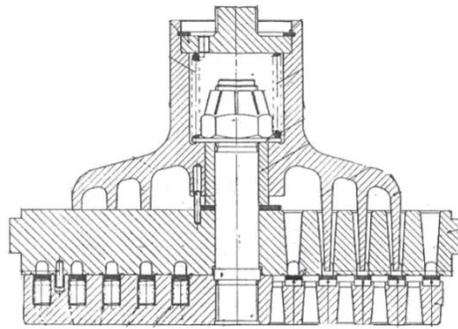


FIGURA 3-12. Montaje válvula de plato de succión.

(Fuente: Enap refinerías Bío Bío).

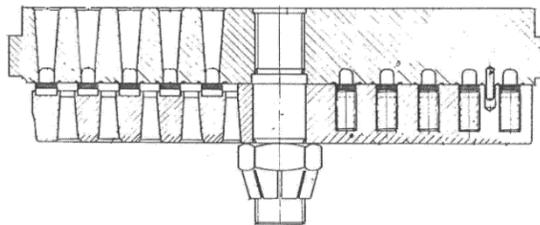


FIGURA 3-13. Montaje válvula de plato de descarga.

(Fuente: Enap refinerías Bío Bío).

Montaje válvulas de poppet:

Las válvulas de poppet tienen un montaje diferente para poder regular la carga de trabajo de los compresores, estos poseen actuadores de funcionamiento neumático los cuales bloquean las válvulas cuando se trabaja con un porcentaje menor de carga. Además, existen otros tipos de montaje en los cuales las válvulas están funcionando el 100% del tiempo, es decir no traen un regulador para deshabilitarlas, tales como los montajes de tornillo de ajuste central y las con sombrero.

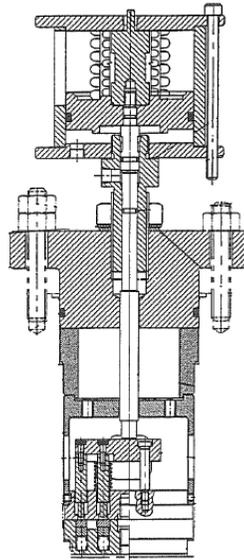


FIGURA 3-14. Montaje válvula de poppet con actuador.

(Fuente: Enap Refinerías Bío Bío).

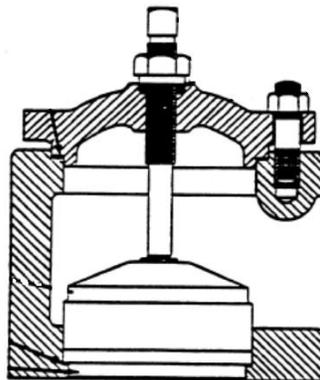


FIGURA 3-15 Montaje válvula de poppet con tornillo de fijación central.

(Fuente: Enap refinerías Bío Bío).

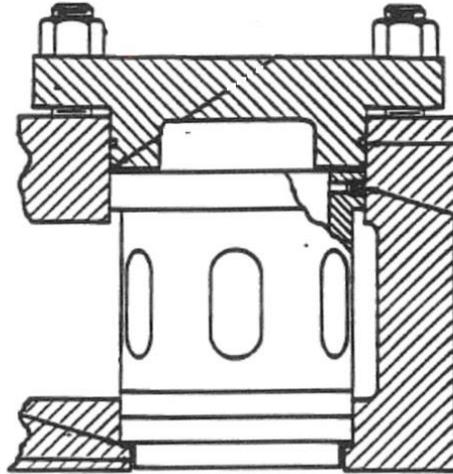


FIGURA 3-16. Montaje válvula de poppet de succión con sombrero.

(Fuente: Enap refineras Bío Bío).

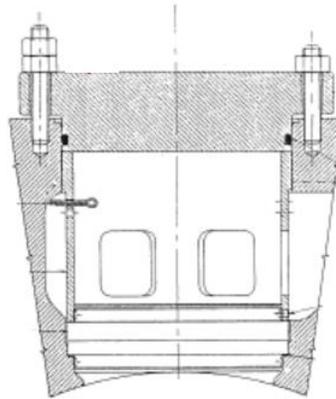


FIGURA 3-17. Montaje válvula de poppet de descarga con sombrero.

(Fuente: Enap refineras Bío Bío).

3.2.4 Modos de falla.

Los operadores de compresores recíprocos han observado que las fallas de las válvulas son la causa más frecuente de apagado no planeado. Por lo tanto, es extremadamente importante supervisar la operación del compresor e investigar cualquier indicación de problemas de las válvulas de una manera oportuna.

Las fallas de las válvulas pueden clasificarse como resultado de tres causas generales:

- I. Desgaste y fatiga.
- II. Materiales extranjeros.
- III. Acción mecánica anormal.

Desgaste y fatiga:

El desgaste como tal nunca puede ser completamente eliminado. Sin embargo, se puede minimizar mediante lubricación apropiada, el diseño y la selección de materiales.

La fatiga es el resultado de tensiones cíclicas repetidas. El nivel de estrés debe ser considerado en cualquier diseño. Sin embargo, salvo por la acción anómala las válvulas bien diseñadas y montadas tiene una larga vida útil.

Materiales extranjeros:

Los materiales extranjeros que se pueden encontrar en las válvulas se pueden clasificar en arrastre de líquidos, gas sucio y aleaciones corrosivas.

El arrastre de líquidos de un proceso puede producir fallas prematuras, particularmente en las válvulas de succión. El líquido puede provocar grandes daños en la válvula desde romper el asiento hasta arruinar la lubricación de esta.

El gas sucio puede causar diferentes problemas, acelera el desgaste muy rápido en las válvulas de succión. La materia extraña entre los resortes causa una falla frecuente en estos y posteriormente provoca fallos en otros componentes. La mezcla de gas sucio con el aceite del compresor puede generar graves daños en el funcionamiento mecánico del compresor.

La corrosión puede causar un alto estrés localizado y un fallo posterior. Los resortes son propensos a fallar en primer lugar. La solución a problemas de corrosión no siempre es simple, y rara vez es barata, los materiales de las válvulas se pueden cambiar. En algunos casos, depuradores o lavados químicos pueden eliminar o reducir los contaminantes en la corriente del gas antes de entrar en el compresor.

La corrosión no puede causar fallas en las válvulas durante varios meses. Cuando lo hace, lo mejor es cambiar y reparar todas las válvulas restantes. Cuando hay una condición corrosiva que no se puede eliminar, lo mejor es tener un juego completo de válvulas de repuesto. Esto resultara en menos tiempo de inactividad y menos gasto final.

Acción mecánica anormal:

En esta categoría encontramos dos causas generales de funcionamiento anormal, tales como, golpeteo, aleteo.

El golpeteo puede ocurrir cuando la válvula se abre o cuando cierra, se sabe que las válvulas tienen poca tendencia a golpear, excepto posiblemente cuando la válvula de descarga se abre.

Si una válvula se cierra tarde, cualquiera que sea la razón, en lugar que los resortes se cierren en la válvula el golpeteo es seguro que ocurra. Se sospecha golpeteo si la placa tiene un aspecto martillado donde entra en contacto con el asiento.

El aleteo es el resultado de una selección inadecuada del resorte o de una caída de presión insuficiente a través de la válvula. Si los resortes son demasiado rígidos, una válvula puede ser incapaz de abrir completamente. En casos más severos, una válvula puede golpear el asiento varias veces durante una carrera de pistón. La inercia de la válvula puede hacerla abrir completamente contra su tope, pero la caída de presión es insuficiente para retenerla en consecuencia, empieza a cerrarse de nuevo. La inercia puede cerrarla demasiado lejos, incluso de vuelta al asiento antes de que las fuerzas de flujo lo abran de nuevo. Al final de la carrera del pistón puede haber oscilado varias veces.

3.2.5 Recomendaciones generales.

Para lograra obtener una mejor vida de la válvula en los compresores recíprocos, y así lograr reducir los tiempos de detención de equipo y accidentes es necesario tener en cuenta los siguientes factores para un funcionamiento mejor:

- I. Número limitado de personas encargadas de la revisión de las válvulas de un compresor recíproco.
- II. Gas limpio
- III. Inspeccionar la acumulación de líquidos.
- IV. Lubricación adecuada.
- V. Registro sistemático.

3.3 Estrategias de mantenimiento.

Hoy en día en la industria existen diferentes estrategias de mantenimiento, estas técnicas se clasifican en 4 categorías.

Mantenimiento reactivo:

El Mantenimiento Reactivo es el tipo de mantenimiento en el que las acciones se toman tras una falla en el o los equipos, para corregir esa falla o avería, volviendo a dejar el equipo productivo. Más popular y habitualmente se le denomina Mantenimiento Correctivo.

Debido a los problemas que puede causar este tipo de manteniendo, no es recomendable usarlo como estrategia de manteniendo en equipos o elementos críticos e indispensables de la empresa.

Ventajas del mantenimiento REACTIVO_CORRECTIVO:

- No existe inversión de tiempo programación anticipada a la falla.
- Rentable en equipos pocos significativos en cuanto producción y costos.

Desventajas del manteniendo REACTIVO_CORRECTIVO:

- Se arriesga a que se genere una falla grave o catastrófica por no reparar la maquina a tiempo.
- Gran costo por perdida de producción debido al mayor tiempo que la maquina está detenida por no planificar su detención.
- No se lleva un registro del estado de las máquinas de la planta.

Mantenimiento Preventivo o basado en el tiempo.

Esta estrategia hace que se intervenga a la maquina a ciertos intervalos de tiempo prefijados, lo cuales están basados en criterios para realizar reparaciones o cambios de componentes en equipos, aun cuando la maquina esté operando satisfactoriamente el tiempo de reemplazo de las componentes son determinadas de manera estadística.

La finalidad de esta estrategia es reducir la probabilidad de falla o pérdidas de rendimiento del equipo.

Ventajas del mantenimiento PREVENTIVO o basado en el tiempo:

- Los costos de mantenimientos disminuyen respecto a la estrategia anterior, debido a que la detención de equipos es programada.

Desventajas del mantenimiento PREVENTIVO o basado en el tiempo:

- Las fallas pueden ocurrir entre las mantenciones programadas, las cuales pueden ser inesperadas e inconveniente.
- Durante la mantención muchos de los componentes pueden ser desmontados en buen estado e inspeccionados inesperadamente.
- Un proceso de mantención preventiva contempla examinar un gran número de componentes de la máquina, lo que toma un tiempo considerable y puede resultar en una importante pérdida de producción.

Mantenimiento PREDICTIVO o basado en la condición.

Esta estrategia de manteniendo evalúa la condición mecánica de la máquina, y como este comportamiento va evolucionando en el tiempo, a través del análisis de diversos síntomas que la máquina emite al exterior, mientras ella está operando.

Frente al mantenimiento sistemático por horas de funcionamiento o por tiempo transcurrido desde la última revisión, el mantenimiento predictivo tiene la ventaja indudable de que en la mayoría de las ocasiones no es necesario realizar grandes desmontajes, y en muchos casos ni siquiera es necesario parar la máquina. Generalmente son técnicas no invasivas. Si tras la inspección se aprecia algo irregular se propone o se programa una intervención.

Existen varias técnicas ocupadas en la industria para realizar mantenimiento predictivo a los equipos, algunas de estas son:

- Análisis de vibraciones.
- Termografías.
- Análisis de aceites.
- Análisis de ultrasonido.
- Control de espesor en equipos estáticos.

Ventajas del manteniendo PREDICTIVO o basado en la condición:

- Solo se detiene la maquina cuando sea estrictamente necesario, evitando las fallas prematuras.
- Extensión en el intervalo entre mantenimiento en forma segura. La condición de la maquina se conoce en todo momento y la maquina se puede detener justo antes que la falla llegue a ser peligrosa.
- La detención incipiente de la falla evita reparaciones de alto costo o inoportunas y eventuales efectos graves o catastróficos.
- El inventario de partes de repuestos que es necesario mantener en bodega es menor que para las estrategias anteriores.
- Disminuye el valor de las primas de seguro que las empresas contratan para sus máquinas críticas. El seguro cobra menos por una máquina que está protegida por un sistema de monitoreo continuo que en otra que no lo tenga.

Desventajas del manteniendo PREDICTIVO o basado en la condición:

- Requiere equipos especiales y costosos. Al buscarse medir todo con precisión, los equipos y aparatos suelen ser de alto costo.
- Es relevante contar con personal más calificado, esté debe contar con conocimientos más calificados, lo que eleva a su vez el costo y quizá, dependiendo del área, disminuyan las opciones.
- Costosa implementación, debido a la tecnología utilizada en esta técnica.

Mantenimiento proactivo.

La estrategia de mantenimiento proactiva está basada en detectar y minimizar las causas de fallas que disminuyen la vida nominal de los elementos de máquinas. Su objetivo es maximizar la vida operativa de la unidad.

Normalmente las técnicas utilizadas para esta estrategia son una extensión natural de aquellas utilizadas en un programa de mantenimiento predictivo.

Posteriormente, se presenta una gráfica comparativa en la cual, se pueden apreciar los distintos tipos de manteniendo respecto al costo que involucra su implementación.

COSTOS	CORRECTIVO	PREVENTIVO	PREDICTIVO
Para implementar	Bajo	Mediano	Altos
Improductivos	Altos	Mediano	Muy bajos
Tpo. de parada	Altos e indefinidos	Predefinidos	Mínimos
Asociado a existencia de repuestos	Alto consumo e indefinidos	Alto consumo y definidos	Consumo mínimo

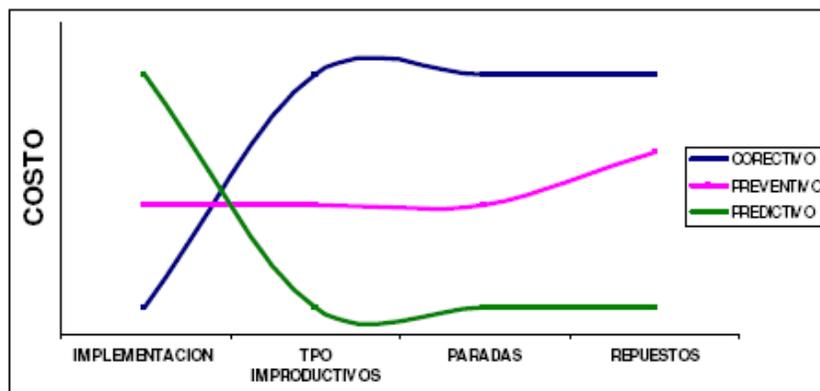


FIGURA 3-18. . Comparación de costos en los diferentes tipos de manteniendo. (Fuente: Mantenimiento Industrial, monografías.com).

3.4 Vibración mecánica.

Las vibraciones mecánicas son consideradas como el movimiento de una máquina o estructura, o una parte de ellas, alrededor de su posición de reposo o equilibrio.

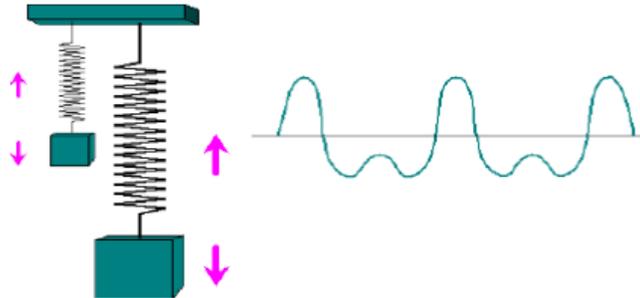


FIGURA 3-19. Representación de una vibración Mecánica vertical. (Fuente: Introducción a análisis de vibraciones “AZIMA|DLI”)

Existen dos tipos generales de vibraciones, las libres y forzadas. Las vibraciones libres ocurren cuando un sistema oscila bajo la acción de fuerzas inherentes al sistema mismo, es decir no existe ninguna fuerza aplicada o estas son nulas. Las vibraciones forzadas son las que ocurren cuando existe excitación de fuerzas externas al sistema.

La vibración es inherente en todo cuerpo rígido, por ejemplo si se analiza a cualquier máquina, evaluando el movimiento de las partes individuales las cuales rotan, oscilan, se generan fuerzas sobre partes específicas que generan un desplazamiento respecto a su centro de masa de las partes oscilantes.

3.4.1 Clasificación de las vibraciones mecánicas.

Las vibraciones mecánicas pueden ser clasificadas en 4 tipos:

1) Vibraciones libres.

Son vibraciones generadas al desplazarse el sistema de su posición de reposo, y luego dejar que vibre libremente.

2) Vibraciones forzadas.

Son vibraciones generadas por la acción de la fuerza variable sostenida en el tiempo. Por ejemplo, vibraciones generadas por el desbalanceamiento de rotores, rodamientos picados, fuerzas de engranes, pulsaciones de presión, etc.

3) Vibraciones paramétricas.

Son vibraciones generadas por las variaciones de un parámetro del sistema bajo la acción de las fuerzas constantes. El caso más frecuente es que sea la rigidez el parámetro que está variando en su tiempo.

4) Vibraciones auto-excitadas o inestabilidades.

Estas vibraciones son generadas por el traspaso de una forma de energía que tenga el sistema a energía vibratorio dentro del mismo sistema; de aquí su nombre auto-excitada.

3.4.2 Parámetros de la vibración.

Las principales características que definen una vibración son la amplitud y frecuencia. De la amplitud de vibración podemos apreciar tres parámetros, desplazamiento, velocidad, aceleración.

Frecuencia de vibración.

Es el tiempo para completar un ciclo vibratorio. En los estudios de vibraciones la frecuencia es generalmente expresada en CPM (ciclos por minuto) o Hz. Para la determinación de un problema específico, es indispensable conocer cuáles son las frecuencias de vibración, hay que tener claro que los diferentes componentes mecánicos provocan frecuencias distintas, por consiguiente, la vibración dependerá de las piezas o elementos que cambiaron sus condiciones iniciales, así como la velocidad de operación, por lo que, conociendo las particularidades de los diferentes elementos de la máquina y la frecuencia de vibración, se puede identificar la causa del origen de la vibración.

$$f = \frac{1}{T} [Hz]$$

Desplazamiento.

La distancia total que describe la parte que vibra desde un extremo a otro se denomina desplazamiento pico a pico se expresa en el SI (sistema internacional) como μm . El desplazamiento relaciona fuerzas elásticas o rigidez que ocasionan fallas por flexión, y enfatiza intervalos de frecuencias bajas ($< 35 \text{ Hz}$), no se recomienda utilizar las lecturas de amplitud de desplazamiento para conocer el estado general de una máquina.

Velocidad.

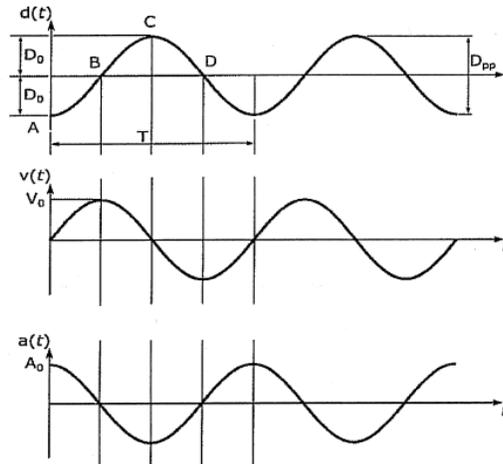
La velocidad es la tasa de cambio del desplazamiento y se encuentra desfasada en 90° del desplazamiento. Efectuando una analogía con el movimiento de un péndulo y evaluando cuando este llega a su parte alta, existirá un instante en que la velocidad tendrá que ser cero para cambiar de dirección, siguiendo la trayectoria del péndulo este varia la velocidad constantemente y alcanza su máximo en la parte media de la trayectoria total. Por lo general se selecciona la velocidad pico o máxima para fines de condiciones de severidad de las vibraciones. Se expresa en el SI como mm/s .

La velocidad nos relaciona poca fuerza, donde la principal causa de falla será por fatiga. Por lo general se utiliza la medición de velocidad para evaluar el estado general de las máquinas, se dice que medir la velocidad vibratoria es tomar medida directa de la severidad de vibración.

Aceleración.

Es considerada como la rapidez con la que cambia la velocidad con el tiempo, se encuentra desplazada a 90° de la velocidad y 180° del desplazamiento. Nos relaciona fuerzas donde el equipo tendera a fallar por flexión o pandeo, considerando la misma analogía del péndulo y evaluando la parte alta donde la velocidad es cero por un instante, podemos encontrar que la aceleración será máxima. La aceleración se expresa normalmente en “g pico”.

Las mediciones de aceleración proporcionan indicadores excelentes de alta frecuencia, pero una inadecuada respuesta a problemas de baja frecuencia.



- En la posición A (límite inferior del desplazamiento):
- ⇒ Desplazamiento: máximo negativo
 - ⇒ Velocidad : cero
 - ⇒ Aceleración : máxima positiva(hacia arriba)
- ⇒
- En la posición B (posición de reposo):
- ⇒ Desplazamiento: cero
 - ⇒ Velocidad : máxima positiva(hacia arriba)
 - ⇒ Aceleración : cero
- ⇒
- En la posición C (límite superior del desplazamiento):
- ⇒ Desplazamiento: máximo positivo
 - ⇒ Velocidad : cero
 - ⇒ Aceleración : máxima negativa(hacia abajo)
- ⇒
- En la posición D (posición de reposo):
- ⇒ Desplazamiento: cero
 - ⇒ Velocidad : máxima negativa(hacia abajo)
 - ⇒ Aceleración : cero

FIGURA 3-20.Desplazamiento, Velocidad y aceleración de una vibración armónica simple.
(Fuente: Curso análisis de vibraciones categoría I).

3.4.3 Diferencia de fase.

Es una medida de la diferencia de tiempo entre dos ondas sinusoidales. Aunque la fase es una diferencia de tiempo, siempre se mide en términos de ángulo, en grados o radianes. Eso es una normalización del tiempo que requiere un ciclo de la onda sin considerar su verdadero periodo de tiempo.

La diferencia en fase entre dos formas de onda se llama desfase o desplazamiento de fase. Un desplazamiento de fase de 360 grados es un retraso de un ciclo o un período completo de la onda, lo que realmente no es ningún desplazamiento. Un desplazamiento de 90 grados es un desplazamiento de $\frac{1}{4}$ del periodo de la onda, etc. El desplazamiento de fase puede ser considerado positivo o negativo; eso quiere decir que una forma de onda puede estar retrasada respecto a otra o puede estar

adelantada respecto a otra. Esos fenómenos se llaman retraso de fase y avance de fase respectivamente.

3.4.4 Medición de la vibración.

Al momento de realizar un análisis vibratorio lo primero que hay q tener en cuenta es la forma en cómo se obtiene los datos para luego poder analizarlos. Hay tres etapas a seguir para medir y analizar las vibraciones, estas se pueden clasificar en etapa transductora, etapa de medición y etapa de registro.

Etapa transductora:

Un transductor o sensor es un dispositivo electrónico que capta una magnitud física, tal como vibración convirtiéndola en una señal eléctrica (voltaje) que es proporcional a la magnitud medida. La relación entre la señal eléctrica de salida y la magnitud vibratoria de entrada se define como la sensibilidad del sensor. Por ejemplo un acelerómetro de 10 mV/g significa que si el acelerómetro mide una aceleración de 1g, el voltaje de salida que entrega es de 10 mV.

En la figura 3-20 se aprecia que la salida del acelerómetro es 200 mV pico y como la sensibilidad del acelerómetro es 100 mV/g, entonces el valor pico de la aceleración será 2g.

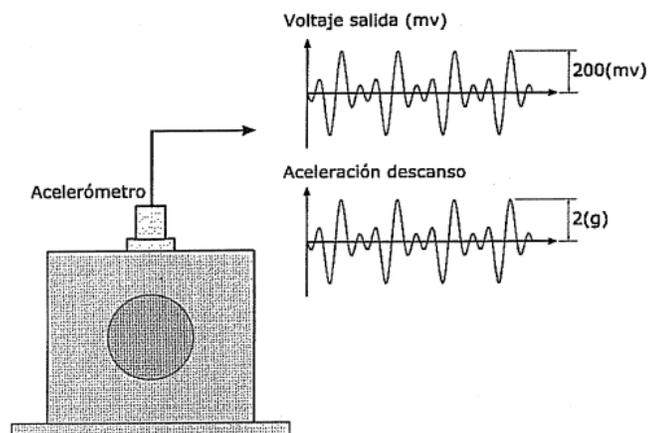


FIGURA 3-21. Transformación de la aceleración medida a una señal Eléctrica a la salida del acelerómetro. (Fuente: Curso análisis de vibraciones categoría I).

El sensor de vibración es el primer eslabón en la cadena de medición de vibraciones. Ese reproduce exactamente las características de la magnitud que se está midiendo. La selección y montaje de un sensor, es una decisión muy importante, por lo que es esencial conocer los diferentes tipos de sensores con sus características respectivas.

3.4.5 Tipos de sensores.

Típicamente existen tipos de sensores de vibraciones:

- Sensor de desplazamiento relativo sin contacto.
- Sensor de desplazamiento relativo con contacto.
- Sensor de velocidad o velocímetro.
- Sensor de aceleración o acelerómetro.

Sensor de desplazamiento sin contacto.

Existen diferentes tipos de sensores de desplazamiento, basados en diferentes principios de medición, sin embargo, el más utilizado hoy en día en las máquinas rotatorias es el de corrientes parásitas o de Foucault o “Eddy current”. Comúnmente son empleados para medir desplazamiento relativo entre el eje y el alojamiento en rotores con descansos hidrodinámicos.

En la práctica no son utilizados para medir frecuencias mayores a 1000 Hz, esto debido al run-out, es decir, el desplazamiento vibratorio capturado a velocidad de giro lento, debido principalmente a las imperfecciones en la superficie del eje.

Este tipo de sensor requiere de una instalación fija, por lo cual se debe utilizar un sensor por cada punto de medición.

Sensor de desplazamiento relativo con contacto.

Estos sensores corresponden a una tecnología antigua, sin embargo aún son utilizados en aplicaciones específicas tales como en mediciones de vibraciones del eje cuando la máquina no tiene instalado sensores de desplazamiento sin contacto, y en mediciones sobre ejes con superficies no-conductoras donde los sensores de desplazamiento sin contacto no funcionan. El rango de

frecuencias de este tipo de sensor es muy reducido, normalmente no son capaces de medir vibraciones sobre 12.000 CPM.

Sensor de velocidad o velocímetro.

Existen dos tipos de sensores de velocidad, el sensor de velocidad sísmico y el sensor de velocidad piezoeléctrico.

Sensor de velocidad sísmico.

El sensor de velocidad sísmico más empleado es del tipo electrodinámico. Este sensor es autogenerador de la vibración, es decir, no necesita fuente de poder para funcionar (caso del sensor de desplazamiento sin contacto y del acelerómetro). Además, genera una señal de baja impedancia que puede usarse directamente en el análisis o en el sistema de monitoreo sin necesidad de un acondicionamiento de la señal.

El rango de frecuencias está limitado en las bajas frecuencias por la primera frecuencia natural de vibrar del sensor y en las altas frecuencias por la necesidad de sobrellevar la inercia del sistema, como también por la presencia de frecuencias naturales de mayor orden. Para propósitos prácticos, un sensor de velocidad electrodinámico típico está limitado entre aproximadamente entre 10 y 1500 Hz (600 cpm a 90000 cpm). Bajo los 600 cpm el sensor atenúa la amplitud vibratoria. Por consiguiente, este tipo de sensor no es adecuado para medir vibraciones de baja frecuencia.

Sensor de velocidad piezoeléctrico.

Este sensor de velocidad es simplemente un acelerómetro que tiene un integrador analógico dentro del transductor. Ellos exhiben rangos de frecuencias mucho más amplios que los sensores de velocidad electrodinámicos. Sin embargo, están limitados para la medición de bajas frecuencias debido al filtro pasa alto que posee, con frecuencia de corte de 1.5 Hz. Una de las ventajas de este tipo de sensor es que tienen una alta sensibilidad en el rango de frecuencias de 1.5 a 12 Hz.

Sensor de aceleración o acelerómetro.

El sensor de aceleración más usado es el de tipo piezo-cerámico. Dichos materiales tiene una distribución asimétrica de carga interna, de manera que al aplicarles una fuerza externa en la dirección de su polarización se desarrolla una carga eléctrica entre sus superficies. La carga eléctrica generada es proporcional a la fuerza aplicada y por lo tanto, a la aceleración.

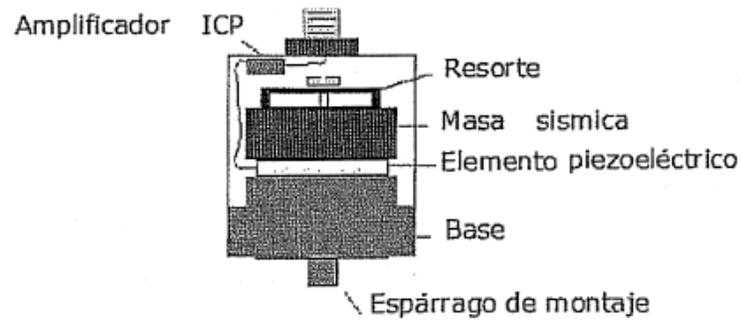


FIGURA 3-22. Acelerómetro piezoeléctrico con preamplificador ICP incorporado. (Fuente: Curso análisis de vibraciones categoría I).

Un acelerómetro piezómetro es un sensor autogenerador de su señal, pero tiene el inconveniente que la señal de salida es de carga (Coulomb), tiene una impedancia muy alta y es de bajo valor. Para ser utilizada es necesario bajarle su impedancia y transformar la señal de carga a voltaje a través de un pre-amplificador.

El pre-amplificador utilizado es de tipo ICP (**Integrated Circuit Piezoelectric**), el cual entrega una señal de voltaje de baja impedancia, es necesario saber esto, ya que para que funcione es necesario alimentarlo eléctricamente. Esta alimentación eléctrica la proporciona el recolector de datos.

3.4.6 Rango de Frecuencia típico de un acelerómetro.

El rango de frecuencias del sensor es el rango entre la menor y mayor frecuencia de la vibración que puede medir sin atenuarla considerablemente. Cada transductor tiene su propio rango de frecuencias y es fundamental que este sea conocido por el analista de vibraciones. El límite de las bajas frecuencias es una característica del sensor, mientras que el límite de altas frecuencias depende además del tipo de sensor, de la forma de como se monta el acelerómetro en la superficie en la que se quiere medir las vibraciones.

Tabla 3. Rangos de frecuencia para distintos acelerómetros.

Tipo de Montaje	Rango de Frecuencia
Con base magnética de dos polos	2-2000 Hz
Con base magnética plana	2-3000 Hz
Con adhesivo	Hasta 25% de la frecuencia resonante del sensor
Con espárrago	Hasta un 33% de la frecuencia resonante del sensor.

3.4.7 Formas de montar un acelerómetro.

Montaje del acelerómetro mediante un espárrago.

Este tipo de acelerómetro se caracteriza por tener en su base un agujero roscado de dimensión estándar, donde se puede atornillar un espárrago para luego atornillarlo a la superficie a medir. Este es el mejor método cuando se quiere medir vibraciones en alta frecuencia.

Sin embargo, este montaje no es práctico para usarlo en un programa de mantenimiento predictivo periódico, debido al tiempo para atornillar y desatornillar el acelerómetro.

Montaje con disco de montaje.

Consiste en pegar sobre la superficie del descanso un disco que tiene un espárrago donde se atornillara el acelerómetro para las mediciones. Esta es una técnica alternativa para medir vibraciones en alta frecuencia en los casos en que no se quiera montar un espárrago por temor a perforar el descanso.

Montaje usando una base magnética.

Consiste en atornillar una base magnética a la base del sensor, este montaje es el más usado en el mantenimiento predictivo. La disminución de rango de frecuencia depende de la fuerza con la que la base magnética queda sujeta al descanso. A medida que disminuye la fuerza del imán se reduce la frecuencia máxima de captación, cualquier suciedad, grasa o falta de apoyo del imán disminuye esta frecuencia máxima, por lo que se tiene que considerar limpiar la superficie a medir.

Montaje manual o apoyando con la punta.

Consiste en atornillar a la base del sensor un vástago. La ventaja de este montaje es que permite medir sobre superficies irregulares o en puntos de difíciles acceso. El principal defecto de este montaje es que limita significativamente de la frecuencia máxima de vibraciones que puede medir el acelerómetro. Queda limitado a frecuencias bajo 60.000 cpm aproximadamente.

A continuación, se presentar esquemáticamente las diferentes formas de montaje de un acelerómetro.

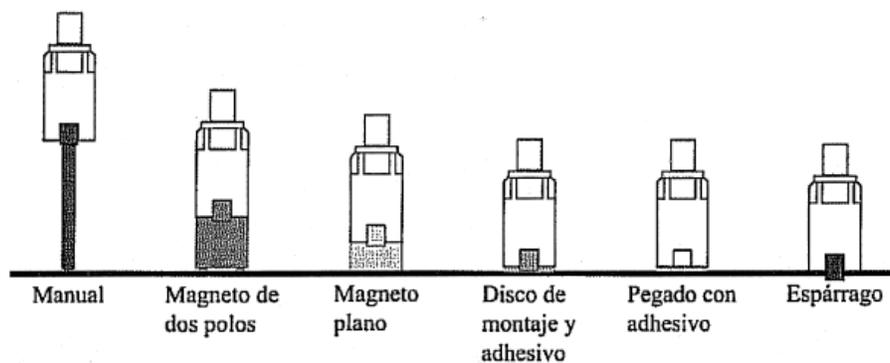


FIGURA 3-23. Diferentes formas de montaje de un acelerómetro. (Fuente: Curso análisis de vibraciones categoría I).

3.4.8 Vibraciones en alta frecuencia.

Antes que todo se debe entender que la frecuencia es el número de veces por segundo que se realiza el ciclo completo de la oscilación de un cuerpo, y se mide en Hertz (Hz), en otras palabras nos indica el número de veces que el elemento de máquina vibra por segundo. Las vibraciones mecánicas en alta frecuencia abarcan parámetros desde los 20 a 1000 Hz.

El análisis que se realiza con este tipo de vibraciones en los elementos de máquinas, es con el fin de poder detectar fallas insipientes en los equipos. Hoy en día en la industria es muy útil este tipo de análisis ya que ayuda enormemente al mantenimiento predictivo logrando así detectar fallas que recién están iniciándose.

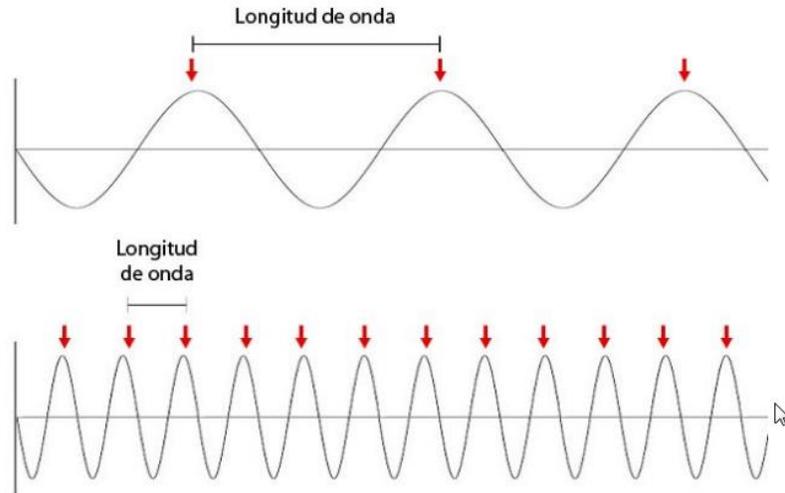


FIGURA 3-24. Comparación de ondas a baja y alta frecuencia. (Fuente: Introducción a análisis de vibraciones “AZIMA|DLI”)

Existen varias técnicas de análisis de las ondas o vibraciones de alta frecuencia, dentro de las más conocidas están:

- ❖ Demodulación análisis de la envolvente.
- ❖ Peak VUE de CSI.

Las causas que generan vibraciones en alta frecuencia pueden clasificarse en dos grupos.

Fuentes de excitación de origen impulsivo:

- Micro grieta y descascarillado de rodamientos.
- Picaduras de rodamientos.
- Engrane de ruedas dentadas.
- Impactos de partes de máquinas (Ej.: Válvulas en máquinas con movimiento alternativo)
- Solturas que generen impacto.

Fuentes de excitación de origen aleatorio:

- Falta de lubricación en rodamientos (contacto entre las rugosidades de las superficies)
- Cavitación.
- Roce de sellos o del rotor.
- Chillido (resbalamiento) de correas.
- Roce de polea contra su protección.
- Vapor y flujo de aire a alta presión.
- Turbulencias en fluidos.

Algunas causas que no generan vibraciones u ondas de alta frecuencia son:

- Desbalanceamiento.
- Desalineamiento.
- Problemas eléctricos.
- Problemas de pulsación de presión.
- Excentricidades.
- Resonancias.
- Ejes flectados.
- Distorsión de la carcasa.

3.5 PeaK VUE.

El Peak VUE es una técnica de análisis de vibraciones en alta frecuencia utilizada para detectar fallas insipientes en rodamientos y engranes, recientemente se ha empezado a utilizar en el análisis de fallas en las válvulas de succión y descarga de los compresores recíprocos.

Estas técnicas son aplicables siempre y cuando la falla genere vibraciones u ondas de alta frecuencia. Las vibraciones de alta frecuencia son generadas cuando la falla genera fuerzas de origen impulsivo o aleatorio.

Aquí, se presenta la técnica del Peak VUE, enfocada en el análisis de vibraciones en alta frecuencia en las válvulas de succión y descarga de los compresores recíprocos de ENAP refinería Bío Bío, ya que estos generalmente presentan fallas por el deterioro de las válvulas.

El Peak VUE es una técnica de detección del valor peak o peakvue, su nombre está registrado por CSI technologies. El objetivo de esta práctica es la detección de ondas de esfuerzo o excitaciones de frecuencias naturales de la estructura producidas por impacto que generan distintos mecanismos de fallas.

3.5.1 Ondas de esfuerzo.

Las ondas de esfuerzo son ondas transientes de corta duración, que se producen en un amplio rango de frecuencias, desde 1kHz hasta 50khz o más. Se producen principalmente por la acción del contacto metal- metal o de fricción de componentes.

Las ondas de esfuerzo pueden ser generadas en cualquier medio elástico. Estas vienen acompañadas de repentinos desplazamientos de pequeñas cantidades de material en periodos muy cortos de tiempo, durando de varios a unos pocos milisegundos. Los eventos transientes se propagan del lugar de iniciación como ondas de flexión y ondas longitudinales a la velocidad del sonido en el metal.

Algunos ejemplos de fallas que generan ondas de esfuerzo son las grietas producidas por fatiga en dientes de engranajes o en los rodamientos, fricción entre superficies y desgaste abrasivo. En los rodamientos en la etapa inicial de falla por fatiga se produce una grieta superficial que puede dar origen a las ondas de esfuerzo, como además de las causadas por hendiduras, rayas y rebordes sobre las pistas debido al desgaste. En los engranajes se pueden originar por grietas, rebordes, mal contacto en el engrane y escasez de lubricante.

3.5.2 Técnica Peak VUE.

La técnica del valor peak consiste en reemplazar los valores instantáneos de una señal, para cada intervalo de muestreo por el valor máximo que ocurre en el más reciente intervalo de tiempo.

Los intervalos de tiempo dependen del ancho de banda de análisis ($\Delta t = 1/fs$ y $fs = 2.56 \times f_{m\acute{a}x}$). La implementación del Peak VUE se puede realizar digital o analógicamente. En forma digital, la señal filtrada es muestreada a la máxima razón que permite el analizador de vibraciones (el CSI 2120 muestrea a una razón de alrededor de 100 kHz), guardando sólo los valores máximos. Estos valores se guardarán a una razón que dependerá de la frecuencia máxima de análisis escogida. La salida del circuito de peakvue es constante, para el intervalo de tiempo especificado.

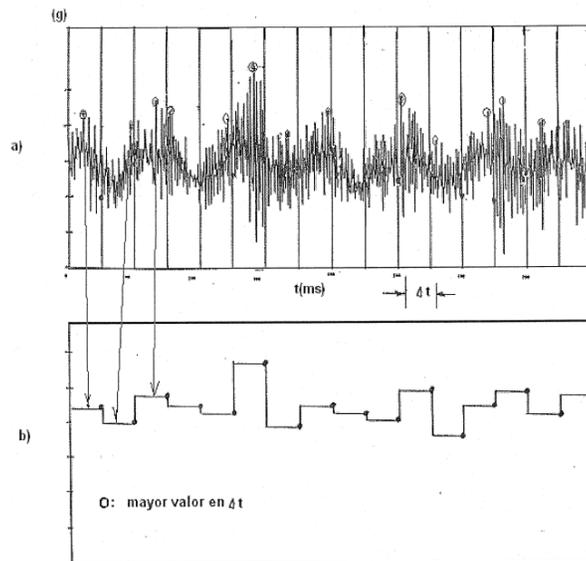


FIGURA 3-25. Detención de los valores peak para cada intervalo de muestreo. (Fuente: Curso análisis de vibraciones, Categoría III).

- a) Señal muestreada a alta frecuencia (80 kHz)
- b) Señal re-muestreada con método Peak VUE

3.5.3 Factores a considerar en el análisis con Peak VUE.

Antes de realizar alguna medición de ondas de esfuerzo mediante las técnicas de Peakvue es necesario tener claro los factores que pueden influir en la medición, de tal manera de obtener mediciones confiables y repetibles en el tiempo.

Tipo de sensor.

La importancia en el tipo de sensor radica en que generalmente las excitaciones de las zonas resonantes ocurren a alta frecuencia y esto requiere de un sensor que sea capaz de medir en altas frecuencias y no atenué o corte tales componentes.

En nuestro caso se utilizara un acelerómetro de 10 mV/g los cuales son utilizados para mediciones en alta frecuencia ya que tienen un alto rango de respuesta de frecuencia (60-1.500.000 CPM).



FIGURA 3-26. Acelerómetro de alta frecuencia 10 mV/g, modelo AC131-1A, marca CTC.

(Fuente: www.ctconline.cl)

Tipo de montaje del acelerómetro.

En la figura 3-23 se muestra diferentes tipos de montaje de los acelerómetros y la figura 3-27 podemos apreciar la sensibilidad relativa de cada uno de ellos. Se puede observar que la sensibilidad aumenta en las zonas resonantes del sensor. También se observa que el rango de frecuencias en el cual la respuesta del sensor es lineal, aumenta de acuerdo al tipo de montaje de 1 al 6.

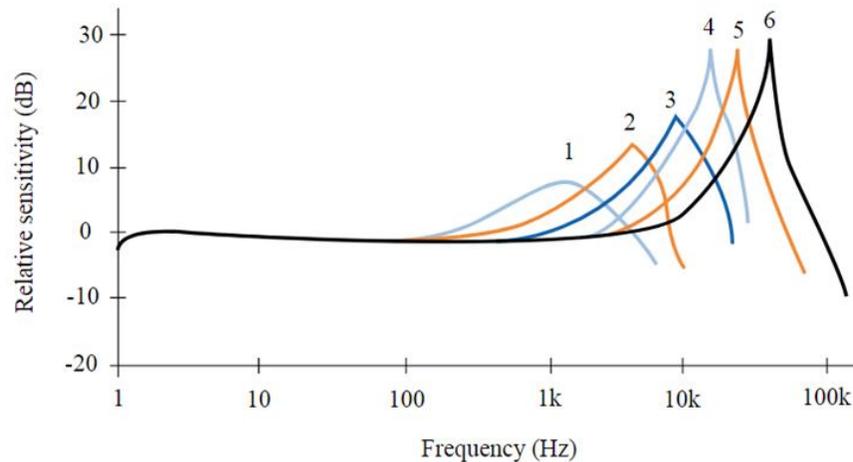


FIGURA 3-27. Sensibilidad relativa de los diferentes acelerómetros. (Fuente: Curso análisis de vibraciones categoría I).

El montaje a utilizar en las mediciones de compresores recíprocos es el magneto plano porque es más factible en relación a frecuencias máximas y montaje del equipo, ya que el monitoreo a realizar es a una gran cantidad de válvulas, este se realiza mediante rutas de medición.

Selección de filtro de análisis.

Para captar las zonas resonantes a alta frecuencia con la técnica del Peak VUE es necesario seleccionar filtros pasa alto. CSI y otros fabricantes de analizadores de vibraciones, han tabulado algunas recomendaciones para la selección de estos filtros en base a la velocidad de giro de la máquina. Sin embargo, estas recomendaciones no siempre son efectivas, ya que las zonas resonantes de alta frecuencia que se excitan, normalmente tienen relación con las frecuencias naturales estructurales, las cuales dependen de algunos factores tales como la rigidez del sistema, su masa y

los juegos internos. Es por ello que es recomendable antes de seleccionar el filtro, adquirir un espectro de aceleración en un amplio rango de frecuencia y en base a este definir los rangos de frecuencias de interés, para luego definir el filtro pasa alto o pasa banda a utilizar.

Ruta de transmisión.

La ruta de transmisión está definida por la distancia que recorre la señal generada desde el punto de origen de los impactos hasta el punto de ubicación del sensor.

Las ondas de alta frecuencia tienen la característica de que se reflejan en gran proporción en las interfaces y son atenuadas al trasladarse de un punto a otro sobre la máquina, es por ello que se recomienda para la medición de ondas de alta frecuencia ubicar el sensor lo más cercano a la ubicación de donde se encuentra el defecto si éste ya está identificado o cerca de la zona de carga, y así asegurar medir la magnitud real de las vibraciones que genera el defecto. Además, es recomendable siempre medir en el mismo punto de la máquina, utilizar el mismo sensor y montaje, para asegurar la repetitividad de las mediciones y poder proyectar tendencias de éstas.

Es por ello que el empleo de las técnicas de Peakvue se puede emplear para determinar el lugar de donde proviene la falla en una máquina, puesto que las magnitudes de las ondas de alta frecuencia son atenuadas al recorrer mayor distancia desde el origen de la falla hacia la ubicación del sensor.

3.5.4 Definición de filtros de frecuencia.

Filtros:

Los filtros son circuitos electrónicos que eliminan o filtran algunas componentes vibratorias, desde este punto de vista los filtros pueden ser clasificados como:

- ❖ Filtros pasa bajo
- ❖ Filtros pasa alto
- ❖ Filtros pasa banda

Filtro pasa bajo:

Así como su nombre lo indica, es un filtro que elimina o filtra las componentes que tienen frecuencias de valor mayor a una frecuencia especificada, llamada la frecuencia de corte de filtro, f_c .

Filtro pasa alto:

Es un filtro que elimina o filtra todas las componentes que tienen frecuencias bajo la frecuencia de corte del filtro especificada y deja pasar todas las componentes de frecuencia que estén sobre dicha frecuencia.

Filtro pasa banda:

Es un filtro que solo deja pasar las componentes vibratorias cuyas frecuencias están dentro de un rango de frecuencias f_1 y f_2 especificadas, llamado el ancho de banda del filtro.

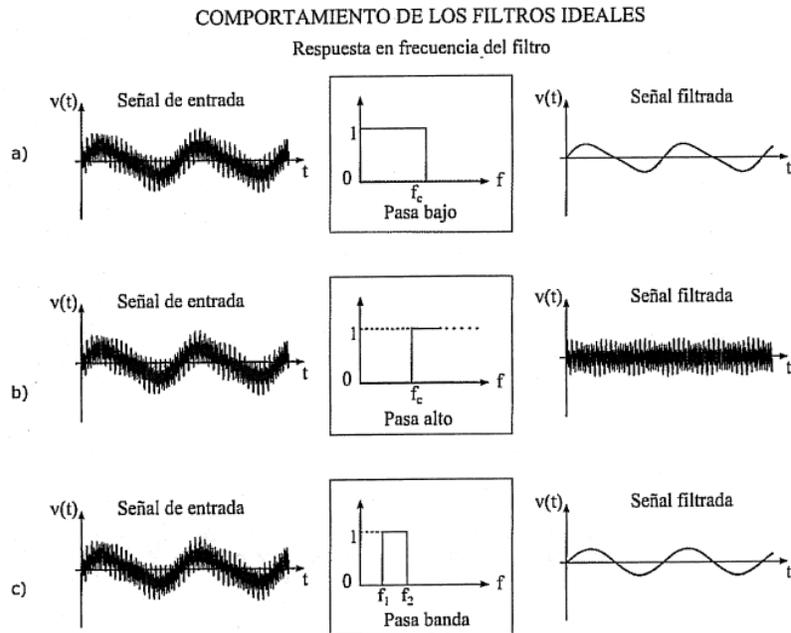


FIGURA 3-28. Características de filtro pasas bajo, pasa alto y pasa banda ideales. (Fuente: Curso análisis de vibraciones categoría III).

3.6 Termografía.

La termografía es un registro de la intensidad de la radiación en la zona infrarroja del espectro electromagnético y la convierte en una imagen visible.

Ventajas de la termografía:

- Sin costo en averías ni pérdidas de tiempo.
- Mayor rapidez y máxima eficiencia a menor costo.
- Toma de datos a largas distancias.
- Se pueden usar como una videocámara o cámara digital.
- Proporciona una imagen completa de la situación.

A pesar de las ventajas de una cámara termografía en el mantenimiento predictivo, esto no es suficiente para poder percibir fallas incipientes en los elementos de un conjunto mecánico. La termografía puede ser utilizada como un complemento al análisis de vibraciones para asegurar la severidad del daño.

CAPÍTULO 4: Adquisición y análisis de datos.

En el siguiente capítulo se dará a conocer la adquisición de datos, es decir la forma en como los datos fueron obtenidos. Aquí se presentará el monitoreo de los equipos de la refinería, con el fin del reconocimiento de los equipos a evaluar, los planos y puntos de medición de cada válvula. También, veremos la configuración del equipo CSI 2040 para llevar a cabo las distintas mediciones de vibraciones en alta frecuencia de las válvulas presentes en los compresores recíprocos, además de la termografía en los compresores recíprocos.

Este capítulo está enfocado en el análisis de datos, teniendo como resultado el comportamiento de algunas válvulas, las fallas que presentan y las soluciones a los posibles problemas.

4.1 Adquisición de datos.

4.1.1 Monitoreo de válvulas mediante vibraciones en alta frecuencia.

En los capítulos anteriores se explicó detalladamente en que consiste este tipo de seguimiento en los compresores recíprocos, lo primordial es mantener saludable el comportamiento de los compresores recíprocos en especial las válvulas de succión y descarga, a las cuales va enfocada la investigación.

Para llevar a cabo el monitoreo de los compresores recíprocos de la empresa ENAP refinerías Bío Bío es necesario tener en cuenta los siguientes pasos para llevar a cabo el análisis:

4.1.1.1 Identificación de los equipos de la refinería.

Lo primero que se necesita es un reconocimiento de los equipos que se desean evaluar, en este caso los compresores recíprocos de Enap refinerías Bío Bío. Posteriormente, se presenta una tabla con los diferentes equipos de la refinería clasificados por la planta en la que se encuentran identificando la cantidad de pistones y válvulas de succión y descarga.

Tabla 4. Listado de equipos a evaluar, diferenciado de sus diferentes plantas de trabajo.

PLANTA	EQUIPO	N° DE PISTONES	VVA SUCCIÓN	VVA DESCARGA	DESCRIPCIÓN SAP
CCR	J-600	1	2	2	COMPRESOR ALTERNATIVO NHT CCR
CCR	J-600 S	1	2	2	COMPRESOR ALTERNATIVO NHT CCR
CCR	J-651 A	4	28	28	COMPRESOR GAS ALTERNATIVO PLAT CCR
CCR	J-651 B	4	28	28	COMPRESOR GAS ALTERNATIVO PLAT CCR
HDG	J-196 A	1	2	2	COMPR H2 RECICLO A D-186 HDG CRL
HDG	J-196 B	1	2	2	COMPR H2 RECICLO A D-186 HDG CRL
HCK	J-702 A	3	8	8	COMPRESOR DE HIDROGENO ALTA HCK
HCK	J-702 B	3	8	8	COMPRESOR DE HIDROGENO ALTA HCK
MHC	J-1202 A	3	9	9	COMPRESOR MAKE UP ALTA MHC
MHC	J-1202 B	3	9	9	COMPRESOR MAKE UP ALTA MHC
TOP 1	J-1	1	2	2	COMPRESOR GASES TOPE I-RAND TOP1
TOP 2	J-401	1	2	2	COMPRESOR GASES DE TOPE TOP2
TOP 2	J-401 B	2	12	12	COMPRESOR GASES DE TOPE TOP2
HDS 1	J-901-902 A	2	6	6	COMPR MAKEUP-RECICLO GAS HDS
HDS 1	J-901-902 B	2	6	6	COMPR MAKEUP-RECICLO GAS HDS
HDS 2	J-1901-1902	2	8	8	COMP. RECIP.MAKE UP RECICLO HDS2
ISO	J-303	1	2	2	COMPRESOR RECICLO NHU ISO
ISO	J-303 S	1	2	2	COMPRESOR RECICLO NHU ISO
ISO	J-351 A	1	2	2	COMPRESOR RECICLO ISOM ISO
ISO	J-351 B	1	2	2	COMPRESOR RECICLO ISOM ISO
VIS	J-214	1	2	2	MOTOCOMPRESOR GASES VISB
VIS	J-214 S	1	2	2	MOTOCOMPRESOR GASES VISB
HDT	C-1501 A	2	4	4	COMPRESOR H2 DE MAKE-UP, HDT
HDT	C-1501 B	2	4	4	COMPRESOR H2 DE MAKE-UP, HDT

4.1.2.2 Reconocimiento de los planos de los compresores recíprocos y las posiciones de las válvulas de succión y descarga.

Primero que todo se tiene que tener presente que la mayoría de los compresores recíprocos presentan en el cilindro de compresión, válvulas de succión, válvulas de descarga, actuadores y válvulas ciegas.

Válvulas de succión: La función de estas válvulas es dejar entrar el gas al compresor, para que este sea comprimido, una vez que el cilindro se ha llenado de gas esta se cierra, iniciando así el retroceso del pistón dando inicio a la compresión del gas dentro de él.

Actuadores: Los actuadores están ubicados en el lado de succión del compresor, su función es regular la carga de trabajo del compresor recíproco, ya que si están cerrados el compresor estará trabajando al 100 % pero si se encuentran abiertas el aire recirculara por el espacio libre que deja el actuator. El porcentaje de carga de trabajo depende de las la cantidad de válvulas y actuadores que tiene cada compresor.

Válvulas de descarga: Tal como su nombre los dice, estas válvulas dejan salir el gas del cilindro a una presión mayor que la de entrada. Cuando la presión del cilindro supera la presión de trabajo de válvula, esta se abre dejando que circule el gas comprimido por la válvula.

Válvulas ciegas: las válvulas ciegas son simplemente una tapa en un orificio de descarga en la cámara de compresión.

De acuerdo a la obtención de información de los planos de los compresores recíprocos, se detectaron dos tipos de válvulas:

- I. Válvulas de poppet.
- II. Válvulas de plato.

A continuación, se presenta un esquema de un compresor recíproco de Enap refinерías Bío Bío, en el cual se representan la posición de las válvulas de succión y descarga, explicando la nomenclatura a usar para cada pistón.

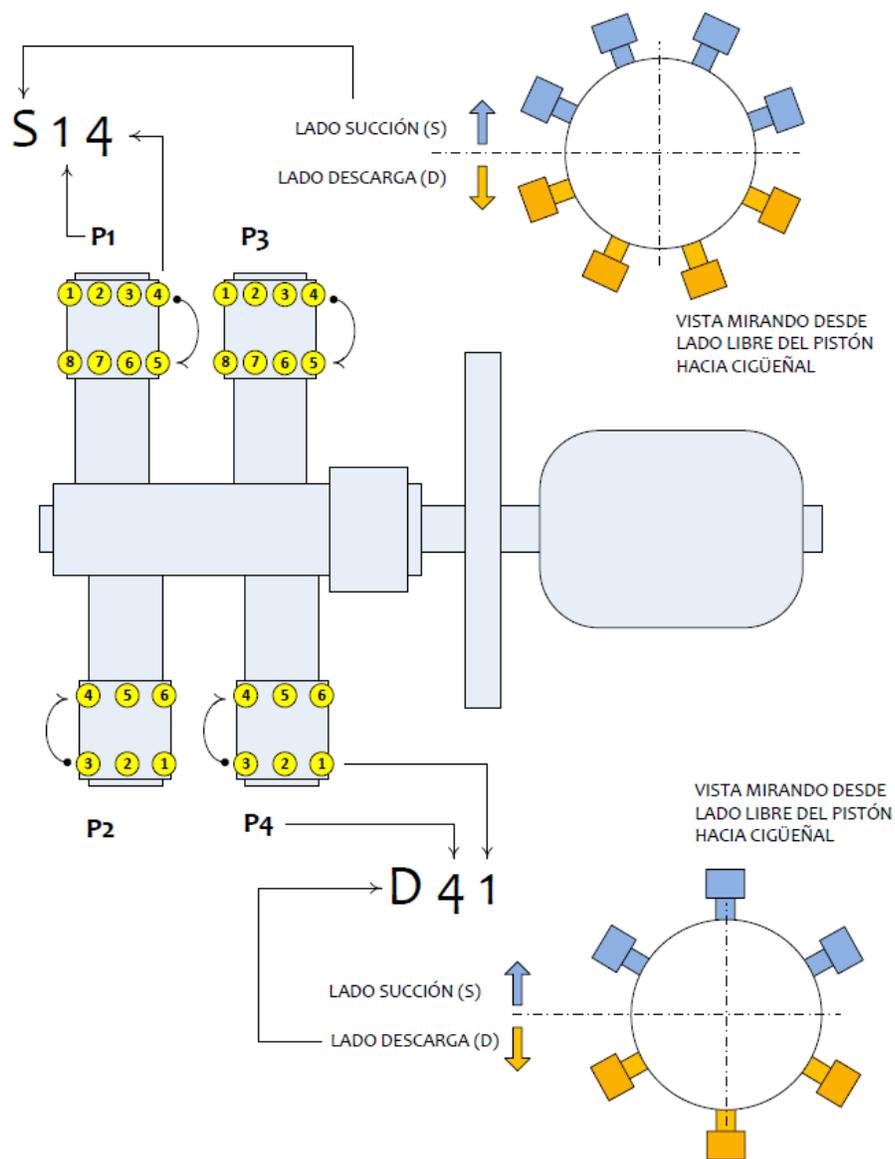


FIGURA 4-1. Esquema compresor recíproco J-651A, Planta CCR (Fuente: ENAP)

El esquema presentado anteriormente representa la posición de las válvulas de succión y descarga, incluyendo actuadores, como estos compresores son antiguos en la refinería no había información acabada de la posición de los actuadores y las válvulas de succión, mediante el análisis de vibraciones en alta frecuencia se pudo lograr reconocer la posición de cada componente en los cilindros de este compresor.

Tabla 5. Posición de los componentes del compresor reciproco J-561 A de la planta CCR.

PISTON N° 1	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18
VVA succión		✓	✓	✓	✓	✓	✓									
VVA descarga									✓	✓	✓			✓	✓	✓
Actuador	✓							✓								
VVA ciega												✓	✓			

PISTON N°2	S21	S22	S23	S24	S25	S26	D21	D22	D23	D24	D25	D26
VVA succión	✓	✓			✓	✓						
VVA descarga								✓	✓	✓	✓	
Actuador			✓	✓								
VVA ciega							✓					✓

PISTON N° 3	S31	S32	S33	S34	S35	S36	S37	S38	D31	D32	D33	D34	D35	D36	D37	D38
VVA succión	✓	✓	✓			✓	✓	✓								
VVA descarga										✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Actuador				✓	✓											
VVA ciega									✓							✓

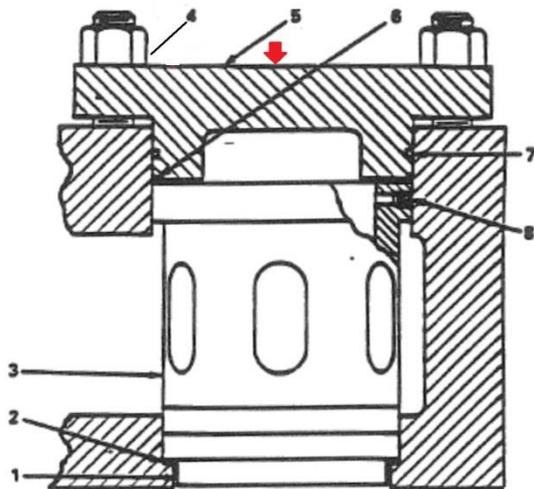
PISTON N°4	S41	S42	S43	S44	S45	S46	D41	D42	D43	D44	D45	D46
VVA succión	✓	✓			✓	✓						
VVA descarga								✓	✓	✓	✓	
Actuador			✓	✓								
VVA ciega							✓					✓

4.1.2.3 Determinar el punto de medición de cada válvula de succión y descarga de los compresores recíprocos.

Para poder determinar el punto de medición de cada válvula de succión y descarga de los compresores recíprocos, es necesario enfocarse en los planos del conjunto, ya que mediante este podremos determinar el lugar óptimo para realizar las mediciones.

Continuaremos con el estudio del compresor reciproco J-651 A. En la Figura 4-3 podemos apreciar el plano de la válvula de succión del compresor reciproco J-651 A en el cual se indica con una flecha roja el punto de medición. Este punto fue elegido después de un análisis en su conjunto ya que es la mejor parte para poder captar el comportamiento del flujo de gas.

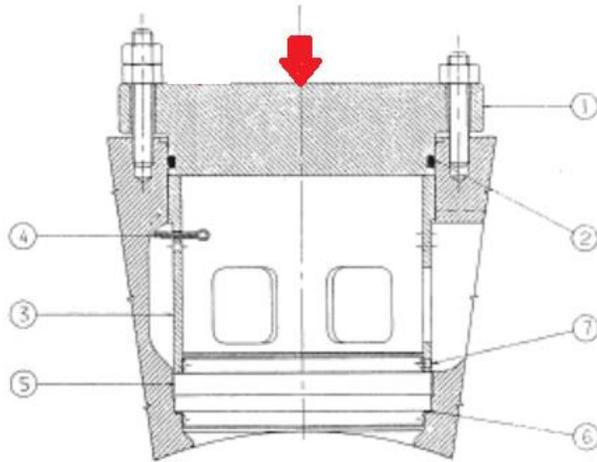
El punto ideal de medición de todas las válvulas, tanto de succión como descarga es el punto más cercano al centro de la tapa de la válvula.



N°	NOMBRE
1	Válvula
2	Junta de asiento de la VVA.
3	Sombreo de la VVA.
4	Tuerca
5	Tapa de la VVA.
6	Anillo metálico
7	Anillo de neopreno
8	Anillo de retención

FIGURA 4-2. Plano del conjunto de la válvula de succión del compresor reciproco J-651 A.

(fuente: ENAP refinерías Bío Bío.)



N°	NOMBRE
1	Tapa VVA.
2	Anillo de neopreno
3	Sombrero VVA.
4	Anillo de retención
5	Válvula
6	Asiento de la VVA.
7	Anillo metálico.

FIGURA 4-3. Plano del conjunto de válvula de descarga del compresor J-651 A. (Fuente: ENAP refinерías Bío Bío.)

4.1.2.4 Toma de datos de vibraciones en alta frecuencia en las válvulas de succión y descarga.

Frecuencia de inspección:

La medición de los equipos se realiza una vez al mes, al igual que las termografías, estos datos se van tomando simultáneamente con la finalidad de llevar una coherencia en cualquier cambio que pueda ocurrir durante el proceso.

El lugar de medición de cada válvula debe estar lo más limpio posible, idealmente tiene que ser una superficie plana sin pintura con una base de sujeción plana, porque las vibraciones en alta frecuencia se disipan con facilidad.

Equipo de medición:

El equipo de medición a utilizar es el AMS 2140 analizador de mantenimiento de las máquinas, toma los datos de vibración. Cuenta simultáneamente con 4 canales plus fase de recogida de datos. Además entrega la recopilación de datos más rápido por menos tiempo en el campo o más máquinas de seguimiento.

- Rango de frecuencia: DC a 10 mínimos Hz, DC a 80 KHz máximo.
- Dimensiones (HxLxW): 248 mm x40 mm x226 mm.
- Peso: 1.79 Kg.
- Temperatura de funcionamiento: -10 a 50 °C.



FIGURA 4-4.AMS 2140 machinery health analyzer. (Fuente: Emerson)

Configuraciones del equipo:

Para realizar las mediciones a los diferentes equipos de la refinería lo primero que se debe hacer es la configuración del analizador AMS 2140, la cual consiste en identificar todos los puntos de medición del equipo para luego programar la configuración de medición de Peak VUE, donde está asociada a diferentes filtro de frecuencia lo que permite evaluar la condición del equipo en diferentes rangos de frecuencias. Los rangos de frecuencia a ocupar son 500 Hz, 1KHz, 5KHz, 10KHz y 20KHz.

Una vez configurado los puntos de medición con sus filtros correspondientes se procede a configurar la ruta de medición, la finalidad es clasificar los equipos que se van a medir.

Cuando ya se adquirieron todos los datos en terreno, estos se cargan en el AMS, este es un software de almacenamiento de datos en el cual se analizan los datos obtenidos.

A continuación, se presenta un ejemplo de una medición realizada al compresor perteneciente a la ruta CCR, compresor recíproco J-651 A.

En la siguiente figura se puede apreciar la configuración de equipo en la cual se muestra claramente el árbol jerárquico de todos los compresores recíprocos, las rutas de medición las que están clasificadas por planta y por último el listado de los equipos configurados.

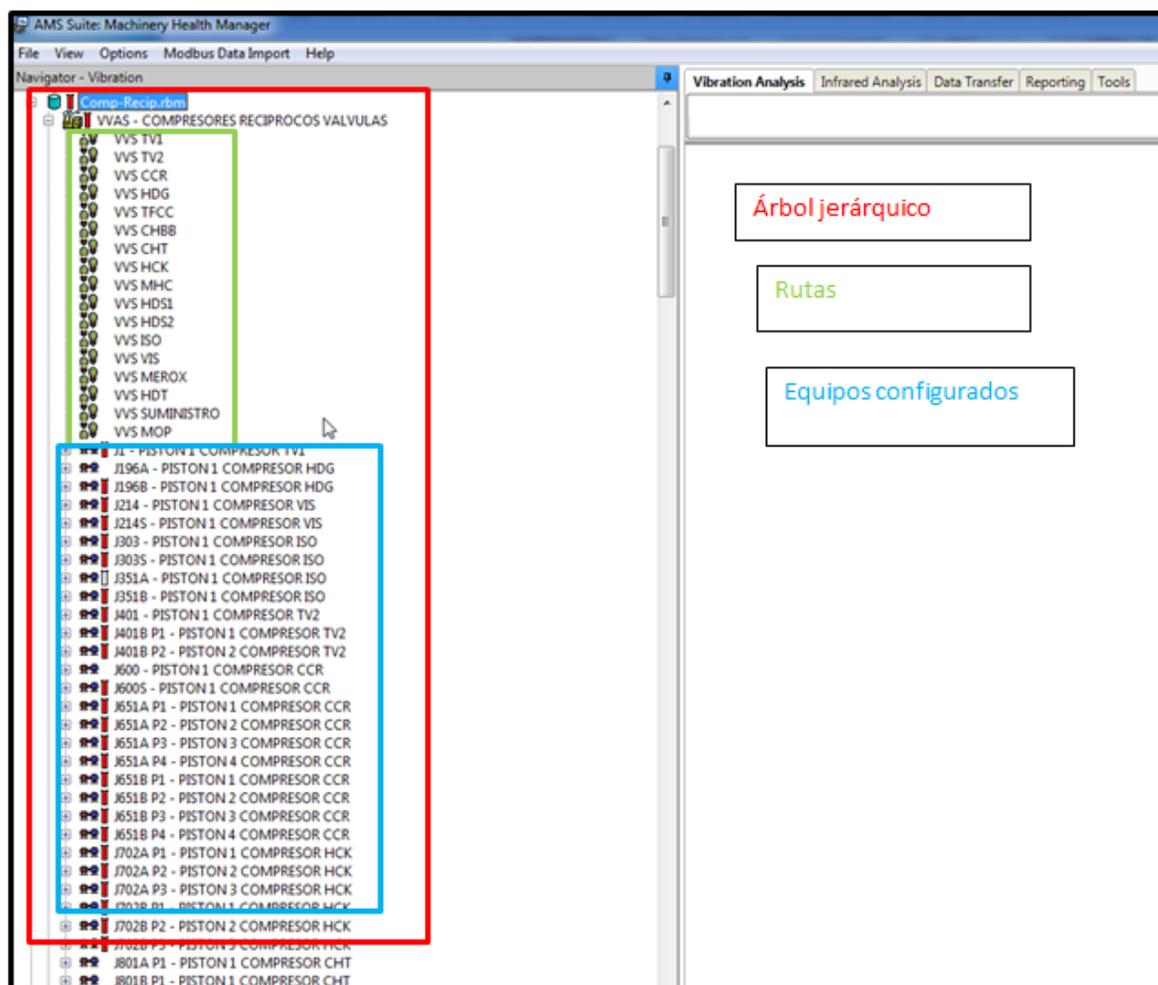


FIGURA 4-5. Datos configurados en AMS. (Fuente: ENAP refinерías Bío Bío).

Aquí se muestra la configuración de un equipo, esta es la del pistón 1 del compresor recíproco J-651 A, donde están detallados todos los filtros de frecuencia a ocupar por punto de medición.

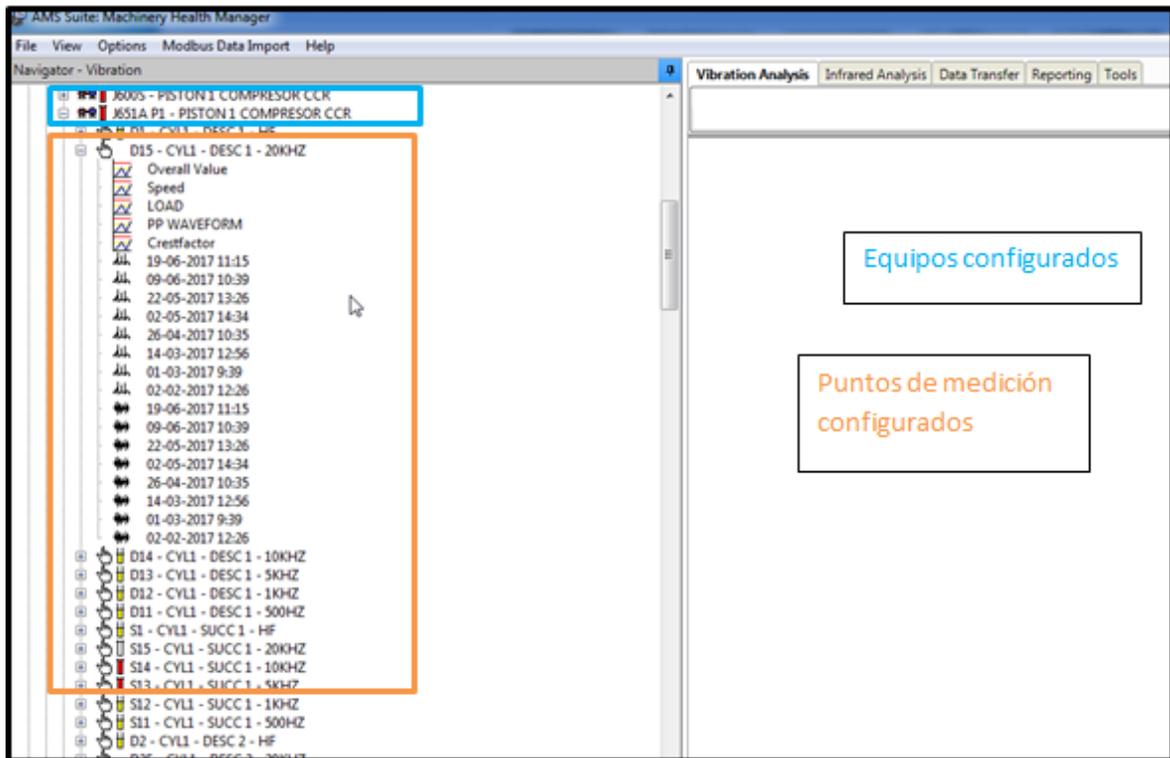


FIGURA 4-6. Configuración de puntos de medición. (Fuente: ENAP refinерías Bío Bío).

Una vez realizado todo este proceso se puede proceder a analizar los datos, solo basta con hacer click sobre un filtro de frecuencia para que nos muestre los datos obtenidos.

Los datos obtenidos por CSI 2140, AMS nos entrega tres gráficas, la primera nos da un comportamiento de tendencia en el tipo del punto de medición, en otras palabras, nos muestra el comportamiento histórico de la válvula, después nos muestra el espectro de la medición para finalmente darnos el comportamiento de la forma de onda. Esta última la puede entregar lineal o circular va a depender de los requerimientos del analista. La gráfica de forma de onda circular se configura de acuerdo a la velocidad de funcionamiento del compresor.

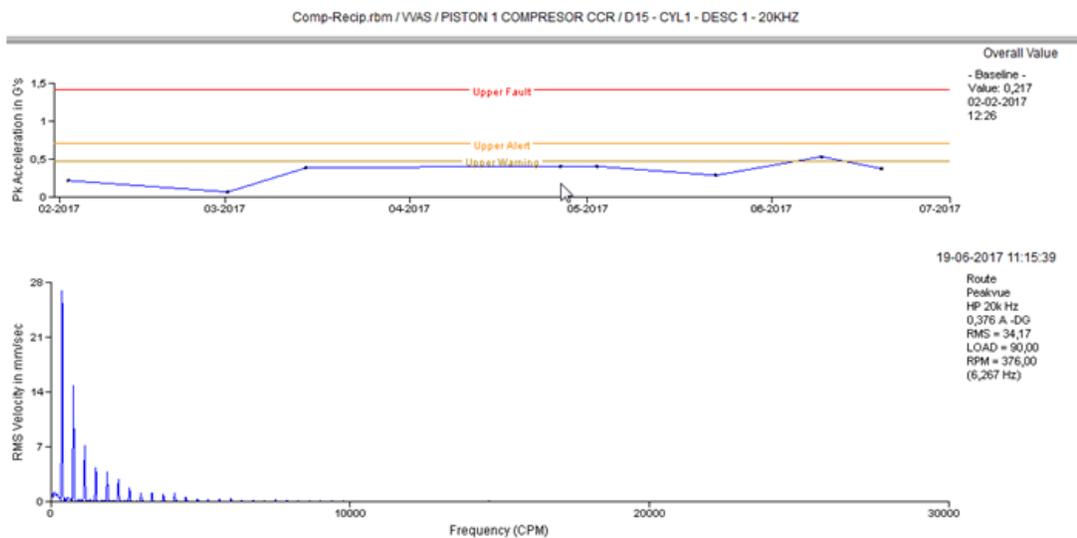


FIGURA 4-7. Grafica de comportamiento histórico y espectro de la medición.

(Fuente: ENAP refinерías Bío Bío).

A continuación se presenta la forma de onda lineal y circular de la medición.

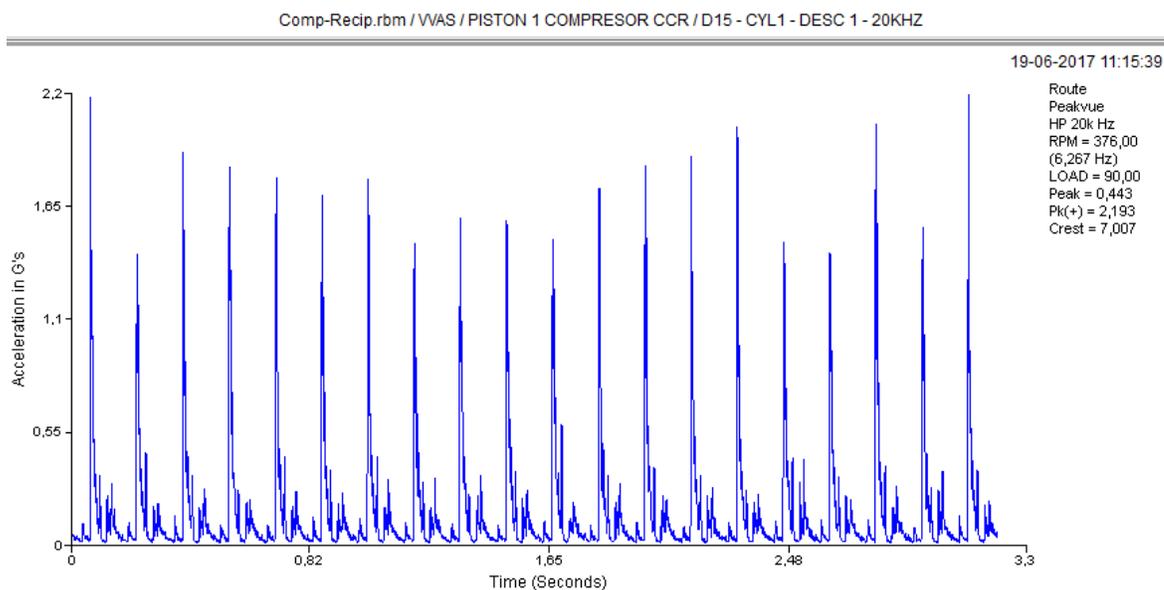


FIGURA 4-8. Grafica de forma de onda lineal de la válvula. (Fuente: ENAP refinерías).

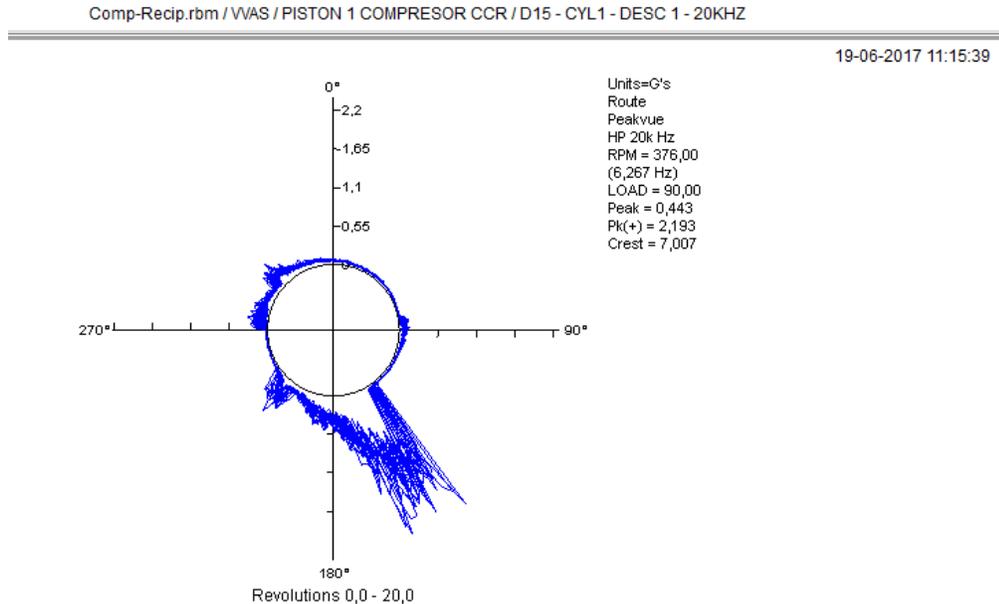


FIGURA 4-9. Grafica de forma de onda circular de la válvula (Fuente: ENAP refinерías).

4.1.2 La termografía en compresores recíprocos.

Hoy en día la termografía en la industria es utilizada constantemente para poder identificar fallas en los compresores recíprocos.

Le empresa ENAP refinерías Bío Bío, utiliza esta tecnología para realizar inspecciones cada 30 días a las diferentes válvulas de succión y descarga de los compresores recíprocos mediante una ruta de toma de datos, con el fin de detectar alzas de temperaturas, las cuales están asociadas a fugas del gas con el que se está trabajando. Es importante saber si existe fuga, ya que, estas averías provocan bajas de rendimiento en los compresores y pérdidas económicas para la empresa.

Con el paso del tiempo se ha concluido que no basta tan solo realizar un análisis de termografía en las válvulas del compresor ya que esta detecta la falla cuando ya está presente el problema. Es por esto que se realizan análisis de vibraciones en alta frecuencia con la técnica del Peak VUE para detectar fallas insipientes en las válvulas del compresor recíproco, complementándolo con un seguimiento de termografías en las válvulas.

A continuación, se ilustra un análisis de termografía tomado por la DIM de la empresa ENAP refinерías Bío Bío.



FIGURA 4-10. Análisis de termografía de una Válvula de descarga de un compresor recíprocante. (Fuente: ENAP refinерías Bío Bío).

En la imagen anterior se puede apreciar la captura de temperatura de una válvula de descarga del compresor J-214. De acuerdo a los parámetros de temperatura que existen se puede apreciar que la válvula está en buen estado ya que la temperatura en las válvulas de descarga de este compresor varía entre 55° y 60° C aproximadamente.

4.2 Análisis de datos.

ENAP refinерías Bío Bío, está compuesta por diversas plantas en las cuales hay uno o más compresores, por lo que se dará a conocer con un ejemplo el análisis de uno de los compresores que pudo ser intervenido por falla de válvulas. El compresor J_401 presento falla de válvulas, las cuales fueron removidas e inspeccionadas, este compresor pertenece a la planta TOP II (Topping II).

El compresor J-401 consta de 4 válvulas de succión y 4 válvulas de descarga. El tipo de válvulas que ocupa este compresor son válvulas de poppet, con un montaje de tornillo de fijación central. En la figura 3-15 se puede apreciar con más detalle su montaje.

Este equipo es crítico por su frecuencia de falla y por la sustancia que opera, la sustancia que opera es Slop liviano gaseoso, este es un gas inflamable. A continuación, en la figura 4-11 Se puede apreciar que el equipo tiene un alto nivel de criticidad.



Frecuencia	Alta	5		J-421		J-422XB J-422XBS			J-408			J-401	
	Media	4		J-413			J-409 J-409B	J-406 J-406S	J-407 J-416	J-411 J-411S J-427 J-427S	J-402 J-402B J-402S J-410 J-410B J-410S	J-401B	
	Baja	3		J-418 J-420 J-420B J-421B	J-424		J-409S		J-407S J-408S	J-404	J-403 J-403S J-427B	J-412 J-412S	
	Remota	2	J-422			J-414				J-404S J-405 J-405S			
	Inexistente	1	J-422S	J-418S			J-421XB J-423XB	J-431			J-405B		
			4	5	6	7	9	10	11	12	13	14	16
			Inexistente			Menor		Moderado			Grave		
Impacto													

FIGURA 4-11. Matriz de criticidad de Topping II. (Fuente: ENAP Refinerías Bío Bío).

El compresor consta de un pistón donde están instaladas las 8 válvulas. A continuación, se presenta una fotografía y el esquema del compresor, donde se pueden apreciar con más detalle sus componentes.



FIGURA 4-12. Fotografía compresor recíproco J-401. (Fuente: ENAP Refinerías Bío Bío).

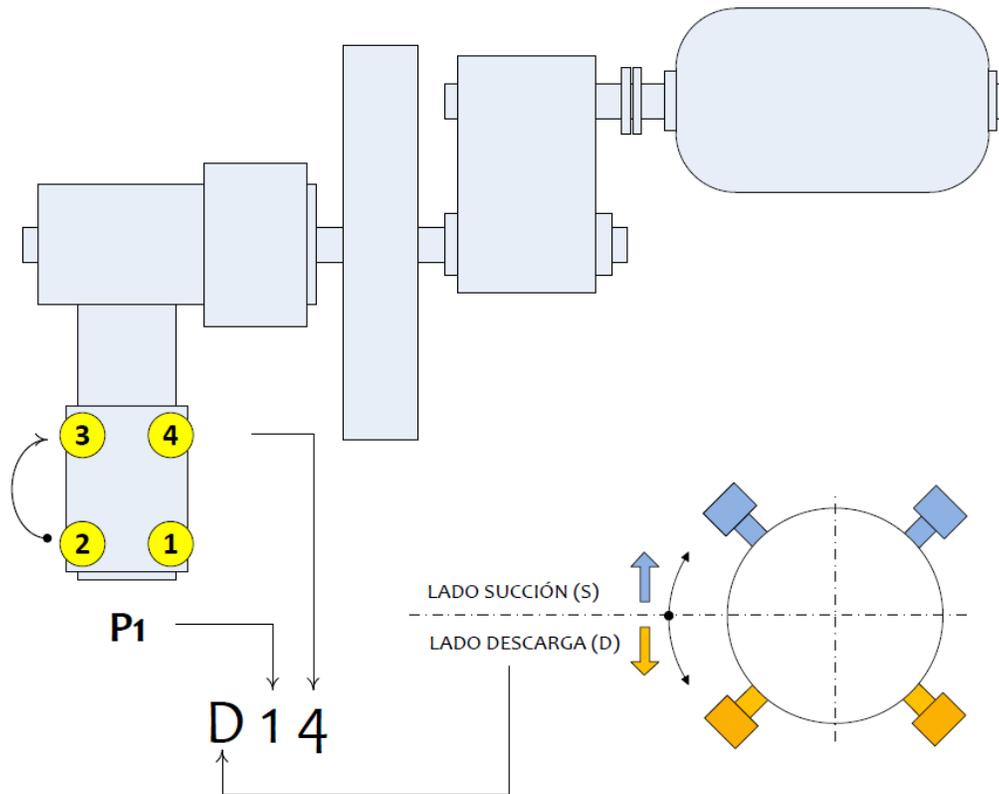


FIGURA 4-13. Esquema de medición compresor J-401. (Fuente: ENAP Refinerías Bío Bío).

4.2.1 Mediciones de datos.

4.2.1.1 Análisis vibratorio mediante Peak VUE en las válvulas.

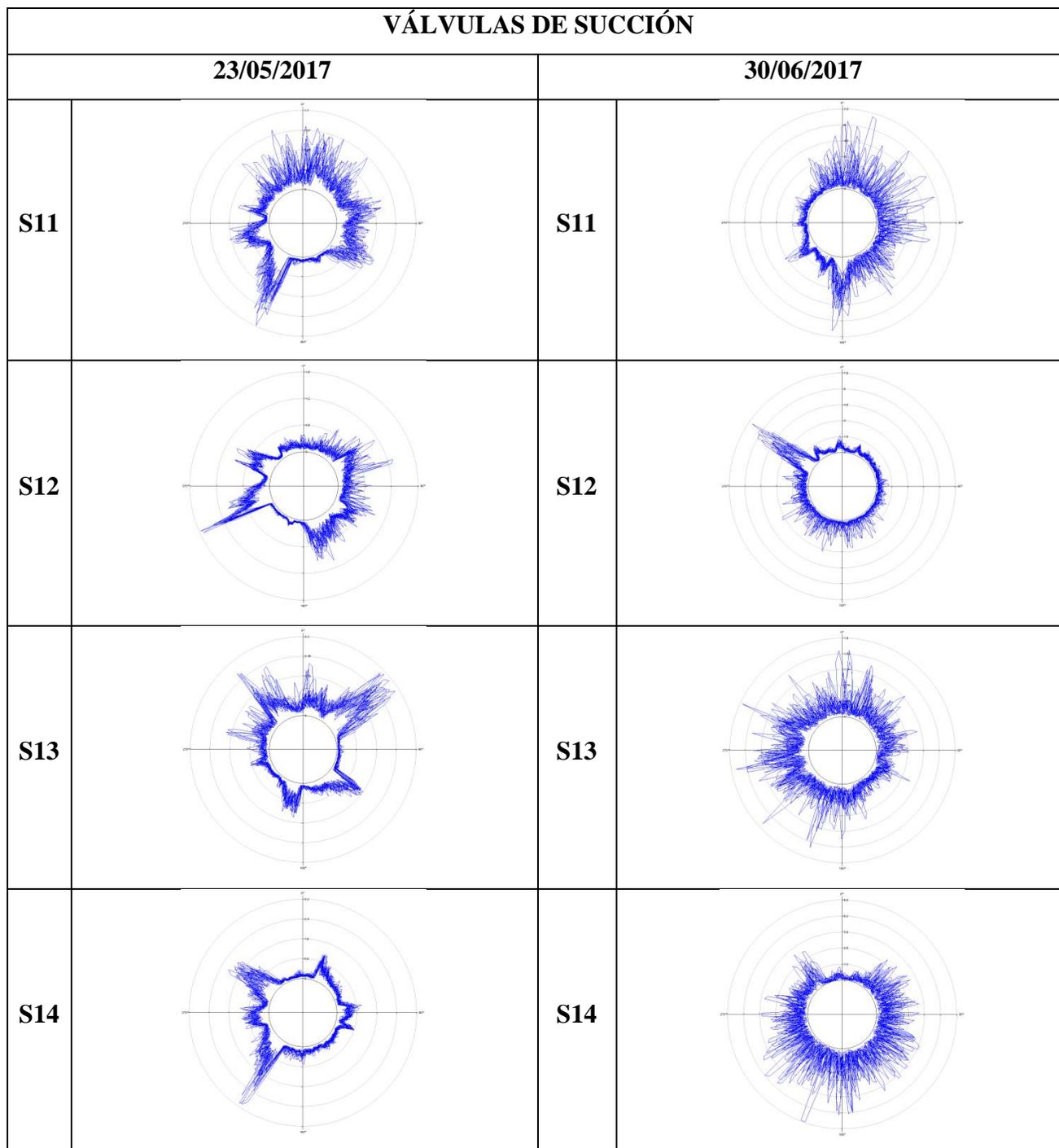


FIGURA 4-14. Comportamiento válvulas de succión compresor J-401. (Fuente: ENAP Refinerías Bío Bío).

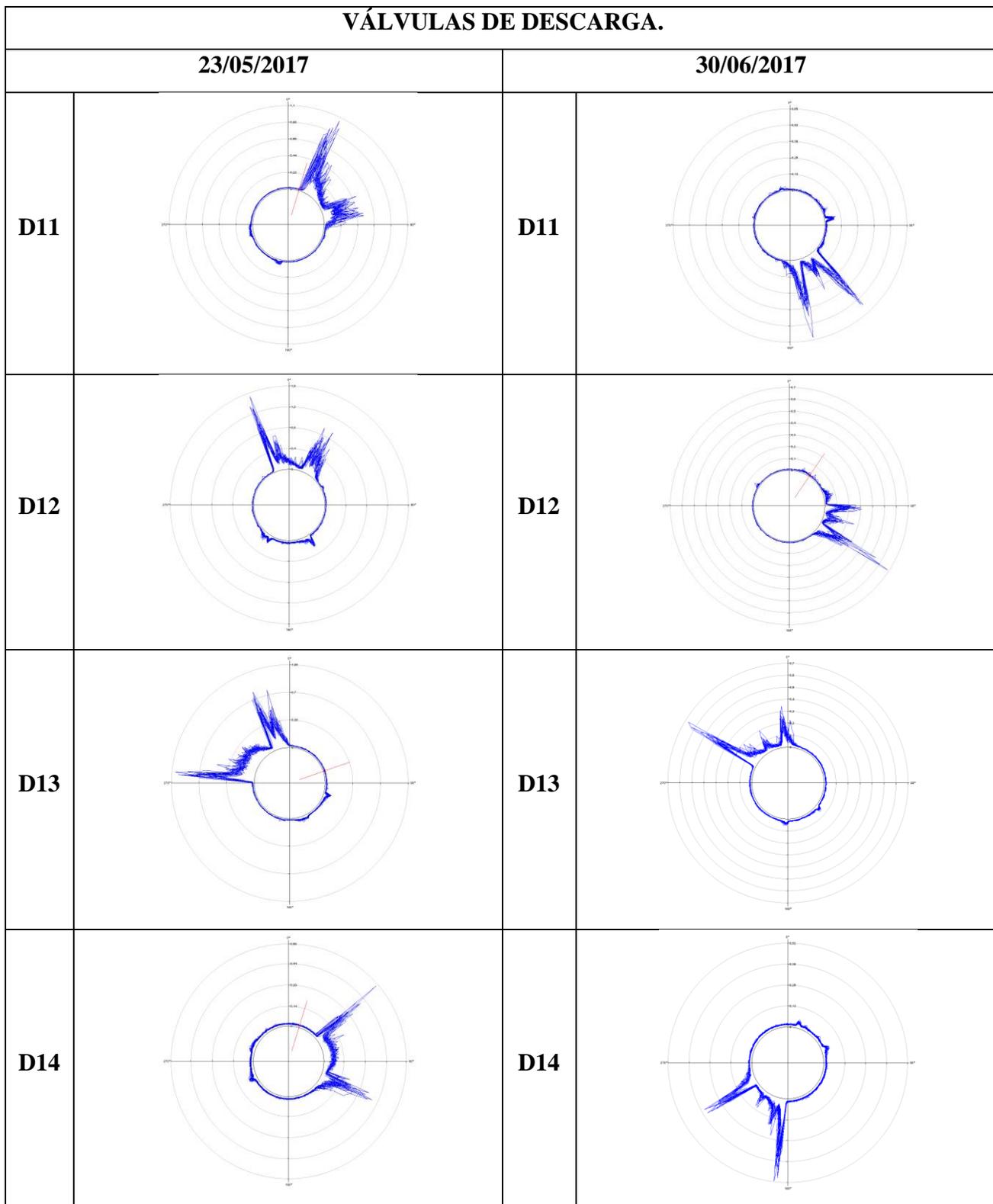


FIGURA 4-15. Comportamiento válvulas de descarga compresor J-401. (Fuente: ENAP Refinerías Bío Bío).

A continuación, se presenta el comportamiento de la forma de onda después de la reparación de las válvulas de succión y descarga.

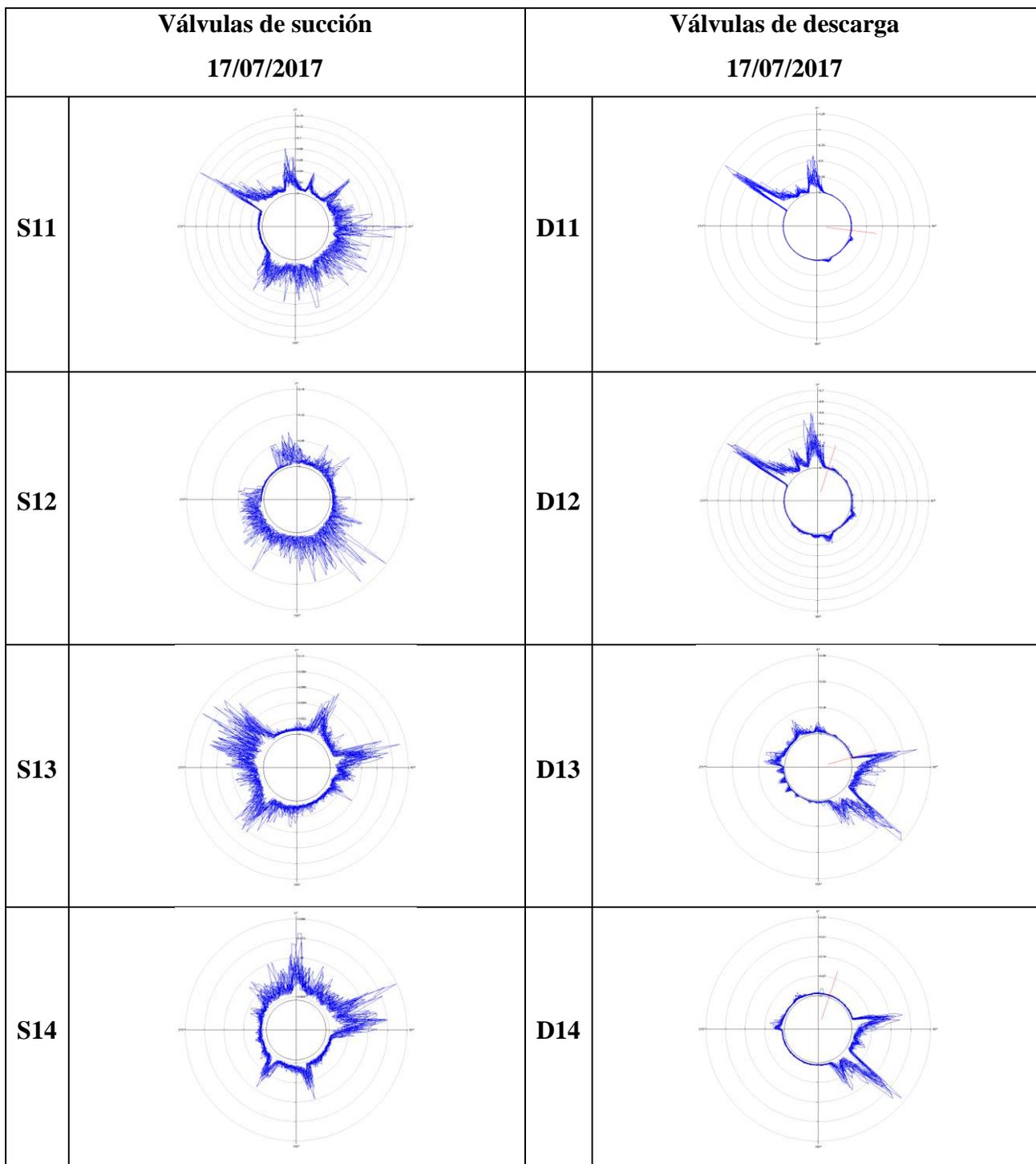


FIGURA 4-16 Comportamiento válvulas compresor J-401. (Fuente: ENAP refineras Bío Bío).

Análisis de tendencia en el tiempo antes de retirar las válvulas de succión y descarga para su reparación.

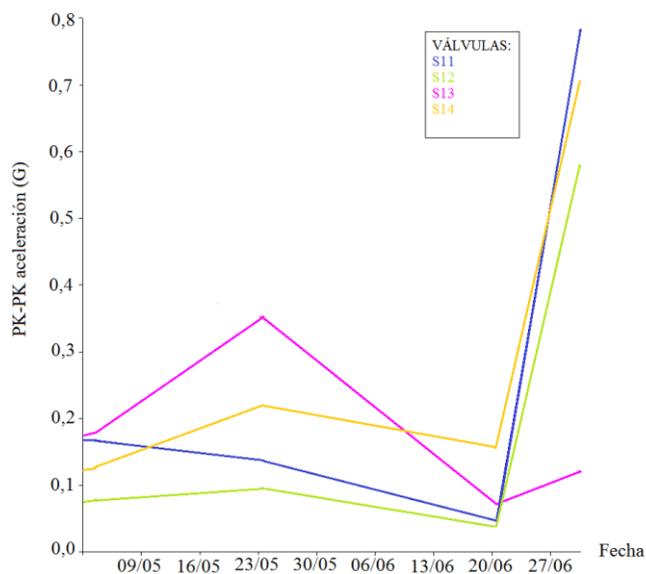


FIGURA 4-17. Tendencia PK-PK válvulas de succión (Filtro 10 KHz). (Fuente: ENAP Refinerías Bío Bío).

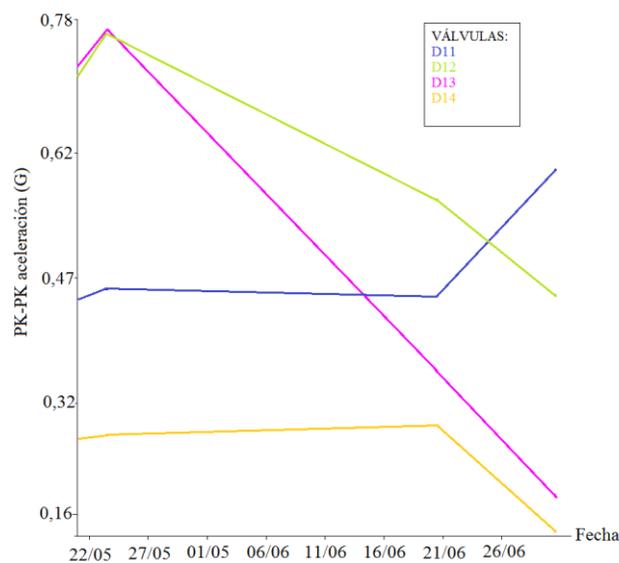


FIGURA 4-18. Tendencia PK-PK válvulas de descarga (Filtro 20 KHz). (Fuente: ENAP Refinerías Bío Bío).

Análisis de tendencia en el tiempo después de la reparación de las válvulas de succión y descarga.

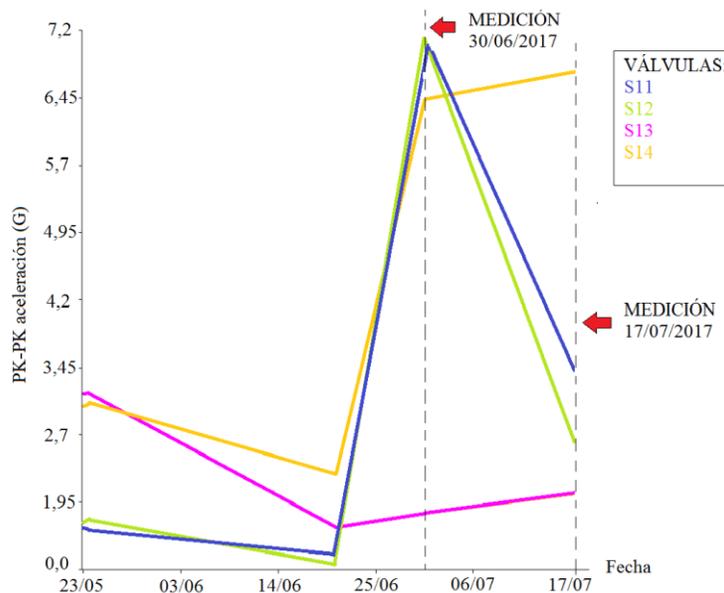


FIGURA 4-19. Tendencia PK-PK válvulas de succión (Filtro 10 KHz). (Fuente: ENAP Refinerías Bío Bío).

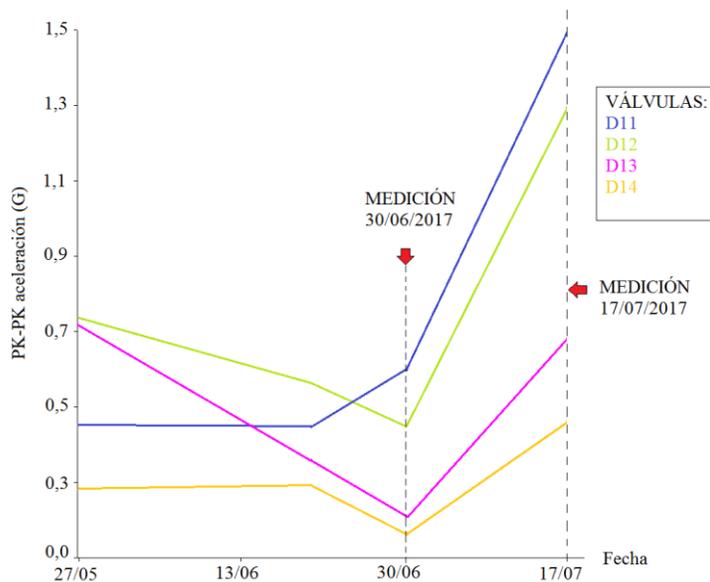
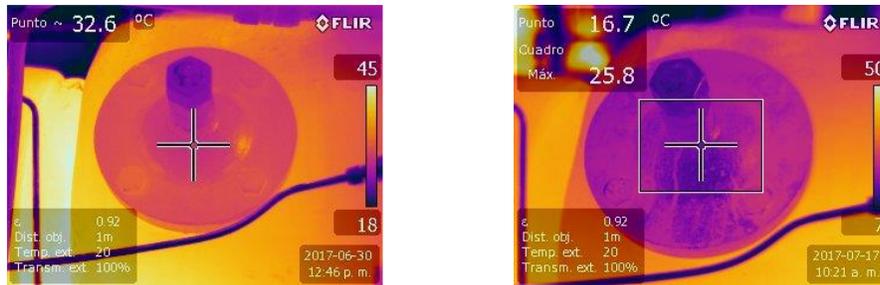


FIGURA 4-20. Tendencia PK-PK válvulas de descarga (Filtro 20 KHz). (Fuente: ENAP Refinerías Bío Bío).

4.2.1.2 Análisis de termografía en las válvulas.

A continuación, se presentan un ejemplo de un análisis de termografía en las válvulas S13 Y D11 antes de desmotarlas y después de repararlas, la temperatura es tomada en el centro de la tapa de la válvula, en el mismo punto de medición de vibraciones, además de una tabla con las mediciones de temperaturas de todas las válvulas pertenecientes al compresor J-401.

Válvulas de succión



Válvulas de descarga

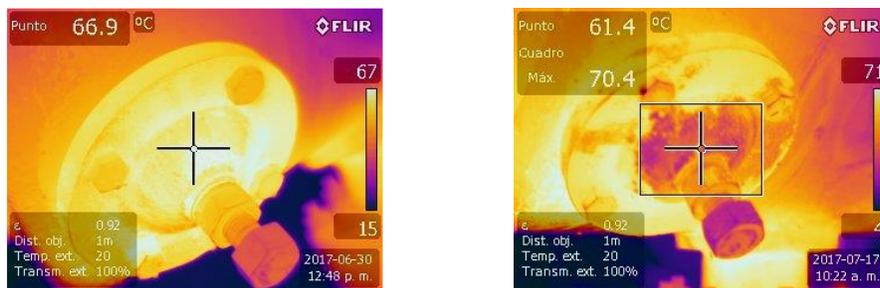


FIGURA 4-21. Análisis de termografía, compresor J-401. (Fuente: ENAP Refinerías Bío Bío.

Tabla 6. Temperaturas Válvulas de succión y descarga compresor J-401

Válvula	Temperatura °C. 30/06/2017	Temperatura °C. 17/07/2017	ΔT °C
S11	32.2	23.3	8.9
S12	28.8	18.2	10.6
S13	32.6	16.7	15.9
S14	33.6	22.4	11.2
D11	66.9	61.4	5.5
D12	61.2	58.7	2.5
D13	54.2	45.8	8.4
D14	54.2	62.9	8.7

Se puede observar que las válvulas de succión fueron las que presentaron el mayor problema ya que se ensuciaron, provocando un aumento de amplitud y de temperatura.

Promedio succión: 11.66 °C.

Promedio descarga: 6.2 °C.

4.3 Resultados.

- El equipo presenta baja eficiencia en lo que respecta a la presión de descarga del conjunto compresor.
- En el análisis de las válvulas a través del Peak VUE se logra apreciar un cambio en la amplitud de la tendencia del valor peak-peak tanto en válvulas de descarga como de succión del compresor, siendo en estas últimas más relevante. En análisis del patrón de la forma de onda también se logra apreciar el cambio en la forma de vibrar de estas, condiciones que nos dan un indicio de un funcionamiento deficiente en las válvulas de succión y un flujo turbulento en su paso por estas, siendo más relevante en válvulas de succión lado libre del compresor. Por otra parte, la forma de vibrar en las válvulas de descarga se mantiene, lo que nos da indicios de que el flujo que está pasando por la válvula disminuye sin verse afectado el funcionamiento de las válvulas de descarga, lo que se refleja en una disminución en la amplitud de los impactos del fluido.
- Se realiza medición de termografía para evaluar comportamiento de temperatura en las válvulas, en donde se aprecia que esta se muestra con temperaturas y diferencial de estas dentro de los rangos normales, lo que nos da un indicio de que las válvulas de descarga se encuentran en buen funcionamiento y que el compresor está comprimiendo, sin embargo, sin alcanzar la presión y el flujo requerido.
- En consideración a los antecedentes recopilados y lo observado en medición de Peak VUE en válvulas, se concluye que válvulas de succión se encuentran trabajando de manera deficiente, por lo que se solicita su intervención.
- En la intervención se realiza el retiro de las válvulas del conjunto, donde se observa que estas presentan suciedad y sedimentación en cantidades suficientes, lo que dificulta el normal

funcionamiento de las válvulas de succión. Se aprecia además, que cámaras de compresión se encuentran también con bastante material adherido.

- La suciedad encontrada a las válvulas se asocia a la combinación de las partículas que presentaba el gas en combinación con el lubricante ya que se presenció la formación de una mezcla barrosa en las válvulas.
- Después que se realizó el montaje de las válvulas ya reparadas se observa claramente una disminución de amplitud en las válvulas de succión, ya que al limpiarlas y cambiar los resortes y poppet, pudo entrar una mayor cantidad de flujo, provocando una disminución de la turbulencia de este. Como entraba mayor flujo al cilindro se pudo comprimir un volumen más grande de gas logrando que las válvulas de descarga aumentaran su amplitud, además en el comportamiento de forma de onda se puede observar que el periodo de acción de la válvula en abrir y cerrar es mayor.

4.3.1 Registro fotográfico en taller.

Válvulas de succión.



FIGURA 4-22. Fotografía válvulas de succión. (Fuente: ENAP Refinerías Bío Bío).

Válvulas de descarga.



FIGURA 4-23. Fotografía válvulas de descarga. (Fuente: ENAP Refinerías Bío Bío).

Cámaras de succión y descarga.

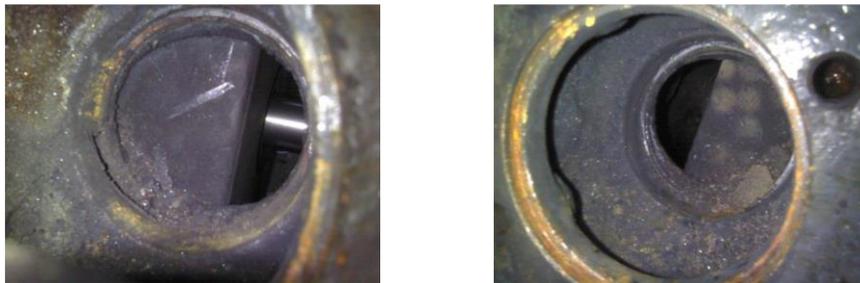


FIGURA 4-24. Fotografía cámara de succión. (Fuente: ENAP Refinerías Bío Bío).



FIGURA 4-25. Fotografía cámara de descarga. (Fuente: ENAP Refinerías Bío Bío).

4.3.2 Solución.

Para solucionar el problema en las válvulas, se desmontaron del compresor, llevándose a tallar, ahí se les realizó una limpieza completa, se le cambiaron los resortes y poppet.



FIGURA 4-26. Válvulas de succión y descarga limpias. (Fuente: ENAP Refinerías Bío Bío).

CAPÍTULO 5: Conclusiones.

En este capítulo se presentan las conclusiones de esta investigación, también se evaluara la coherencia entre objetivos y resultados, limitaciones del estudio, aporte del estudio y algunas dificultades que se presentaron durante el proceso.

5.1 Coherencia entre objetivos y resultados.

Los resultados obtenidos en esta investigación han concordados con los objetivos ya que se logró con éxito el monitoreo de las válvulas de succión y descarga de los compresores recíprocos de ENAP refinerías Bío Bío, logrando detectar posibles fallas que afectan a las válvulas. El monitoreo de los compresores mediante la técnica de Peak VUE ha sido útil para complementarlo con los análisis de termografías que se le realizaban desde antes a los compresores. Además, mediante las formas de onda circulares entregadas por el Peak VUE se ha podido verificar anomalías en las válvulas de succión y descarga.

5.2 Limitaciones del estudio.

El tiempo en el cual se lleva a cabo esta investigación es relativamente corto por lo que existieron factores, los cuales dificultaron los resultados, tales como el análisis de tendencia en el tiempo de los las válvulas de succión y descarga ya que no se logró observar anomalías en todas las válvulas de los compresores. Además, en marzo del 2017 se realizó un paro general de planta en donde se intervinieron todos los equipos. Aquí se le hizo mantenimiento a todos los compresores, donde se le cambiaron las válvulas, lo que dificulto encontrar fallas en el último tiempo.

5.3 Dificultades del estudio.

Uno de los principales inconvenientes en el monitoreo de las válvulas de succión y descarga de los compresores recíprocos fue la falta de un historial de fallas, sin embargo existía el análisis de termografía en el que se dejaba registro de los cambios de temperatura que estas presentaban, pero no bastaba para realizar un análisis detallado.

Por otra parte no se contó con un speed vue, el cual consiste en una medición laser, con este instrumento se lograba reconocer en que parte del ciclo de compresión se encontraba el cilindro, en otras palabras detectaba el movimiento del pistón dentro del cilindro de compresión.

La técnica del Peak VUE es una aplicación nueva que se realiza para el monitoreo de las válvulas, por lo que no hay un registro por el cual se pueda guiar la investigación, solamente existen análisis de laboratorio realizados por la empresa EMERSON.

5.4 Aporte del estudio.

Con los resultados obtenidos se logró realizar un historio de las válvulas respecto a lo que va del año 2017, este monitoreo se seguirá haciendo y con el tiempo se irán afinando los resultados. El estudio realizado a las válvulas de succión y descarga es relevante ya que cumplen una función muy importante en los compresores y de estas dependen el rendimiento de cada compresor, además se sabe que la principal causar de paradas de equipos no programadas corresponde a las válvulas de succión y descarga. Por ende es relevante monitorear las válvulas para evitar fallas.

5.5 Conclusiones.

El estudio realizado a 24 compresores recíprocos de ENAP refinерías Bío Bío, mediante la técnica del Peak VUE, resulto útil ya que se logró monitorear el comportamiento de las válvulas de succión y descarga, cabe destacar que esta técnica se complementa con el análisis de termografías ya que el Peak VUE detecta fallas insipientes en las válvulas, las cuales no afectan el comportamiento del compresor por ende la técnica del Peak VUE es un indicador para realizar el seguimiento de alguna anomalía en las válvulas mediante termografía.

La frecuencia de falla en los compresores debido a las válvulas se puede presentar por diferentes factores, tales como la utilización de un gas sucio, este gas al llevar partículas contamina las válvulas, en especial las de succión ya que las partículas que este lleva se mezclan con el lubricante, lo que provoca la formación de una mezcla barrosa la que se adhiere a las entradas de gas de las válvulas, resortes, trayendo como consecuencia un comportamiento anómalo en las válvulas de succión y descarga. Esta mezcla hace que se genere una tensión dentro del sistema de resortes haciendo que la válvula no cumpla de manera óptima su función, dejando que el gas circule libremente por esta, en otras palabras se produce una filtración de gas.

La obstrucción del gas en las válvulas de entrada, repercuten las válvulas de descarga ya que no se alcanza la presión deseada dentro de la cámara de compresión por ende las válvulas cierran a destiempo y no comprimen el gas necesario para su funcionamiento correcto.

Es importante llevar a cabo un registro histórico del comportamiento de las válvulas ya que las mediciones de vibraciones pueden variar, como por ejemplo las válvulas se pueden quedar pegadas haciendo que el aire recircule, no necesariamente estas presentan una falla, ya que con el tiempo se pueden despegar y seguir su funcionamiento normal.

Es importante destacar que el Peak VUE representa el comportamiento del flujo de gas y mediante este se puede detectar anomalías en el funcionamiento de las válvulas.

Bibliografía.

ENAP Refinerías Bío Bío. 2017. Plan de Acción División Ingeniería de Mantenimiento. Empresa Nacional de Petróleo.

Hoerbiger. (2009). Compresores Alternativos Generalidades.

Woollatt, D. (2001). Factors Afecting Compressor Reliability. Dresser-Rand Company.

Pedro Saavedra González. 2013. Análisis de vibraciones de máquinas. Curso Análisis de Vibraciones, categoría I, ISO 184336-2. Instituto de investigaciones tecnológicas.

Pedro Saavedra González. 2013. Análisis de vibraciones de máquinas. Curso Análisis de Vibraciones, categoría III, ISO 184336-2. Instituto de investigaciones tecnológicas.

James Jenkinson. Quality Assurance Technical Dossier. Petrox S.A.

Alessandro da Silva. 2014. Análisis de irregularidades en los compresores recíprocos. Ingeniería de Aplicación. BITZER international.

CTC, connection technology center, Inc. 2017. [en línea]. <<http://www.cstonline.cl/>>. [consulta: 17 de mayo de 2017].

Woollatt, D. 2001. *Factors Affecting Compressor Reliability*. Dresser- Rand Company. Painted post: National petrochemical & Refiners Association.

Scott Bassett. 2014. Utilizing PeakVue™ Technology for Continuous Valve Health Monitoring on Reciprocating Compressors. [en línea]. Agosto 2014. <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Asset%20Optimization%20Documents/ProductWhitePapers/MHM_WP_UtilizingPeakVueTechnology.pdf> [Consulta: 20 de marzo de 2017].