

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**ESTUDIO DEL DESGASTE EN LOS MOTORES DE LAS  
BOMBAS PRINCIPALES DEL OLEODUCTO DE CRUDOS  
PESADOS OCP ECUADOR S.A.**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
MECÁNICO**

**FABRICIO BLADIMIR VEGA ALVAREZ**

fabla\_cat@hotmail.com

**DIRECTOR: ING. HERNAN PATRICIO ESTUPIÑAN MELO MSC.**

patricio.estupinan@epn.edu.ec

**CODIRECTOR: ING. CARLOS WIME DIAZ CAMPOVERDE MSC.**

carlos.diaz.@epn.edu.ec

**Quito, Enero 2013**

## DECLARACIÓN

Yo, Fabricio Bladimir Vega Álvarez, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional, y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo los derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**Fabricio Bladimir Vega Álvarez**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Fabricio Bladimir Vega Álvarez, bajo la supervisión.

---

**Ing. Hernán Estupiñan. Msc**

**DIRECTOR DEL PROYECTO**

---

**Ing. Carlos Díaz. Msc.**

**CODIRECTOR DEL PROYECTO**

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios y a la Virgen por haberme dado la vida, por protegerme, por la sabiduría que me brinda para resolver diferentes problemas y para guiarme en este proceso, de conseguir un título profesional en la mejor facultad del mundo y la mejor universidad del país.

Agradezco a la empresa de Transporte de Oleoducto de Crudos Pesados OCP Ecuador S.A., por depositar la confianza absoluta en el desarrollo de este proyecto.

A mi director de tesis, por su apoyo constante y la guía de esta gran investigación.

A mi madre Elena, que a pesar de la distancia, viajó muy lejos para darme la mejor herencia que es el estudio; mediante consejos, su infinito amor y la motivación constante para luchar en este capítulo, dura de mi juventud.

A mi primo y gran hermano Alex, por acompañarme desde la infancia; ayudándome en la buenas y malas circunstancias.

A Ronald Espinosa, por cuidarme, educarme y motivarme, sin pedir nada a cambio.

A mi jefe y el mejor amigo David Mafla, por ayudarme a conseguir este anhelado objetivo, por sus enseñanzas laborales revelando algunos “secretos de los magos”, por su apoyo infinito y sus buenos consejos.

A mis Tíos Kleber, Sambito, Luisa, porque nunca me abandonaron y me guiaban para ser un buen profesional.

A la selección de Ingeniería Mecánica, por ayudarme a conseguir el tricampeonato de los interfacultades.

FABRICIO VEGA ÁLVAREZ

## DEDICATORIA

A mi madre Elena, que es mi mayor inspiración, la base de mi vida y mi única familia; a pesar que no disfrute de su amor directo, consiguió crear un hombre profesional con buenos sentimientos, bajo la bendición y cuidado de mi querida abuelita.

A mi abuelita Rosa Álvarez, que me inculcó con los mejores principios, valores, derechos y las responsabilidades, para ser una buena persona en esta sociedad, me extendieron sus brazos y abrió su corazón para sustituir el puesto de un padre.

A mi jefe David Mafla, por ayudarme cuando más lo necesité, por sus motivaciones, su amistad incondicional y por ayudarme a obtener el título de Ingeniero Mecánico.

FABRICIO VEGA ÁLVAREZ

## CONTENIDO

|   |            |
|---|------------|
| <b>DECLARACIÓN</b> .....                          | <b>ii</b>  |
| <b>CERTIFICACIÓN</b> .....                        | <b>iii</b> |
| <b>AGRADECIMIENTOS</b> .....                      | <b>iv</b>  |
| <b>DEDICATORIA</b> .....                          | <b>v</b>   |
| <b>CONTENIDO</b> .....                            | <b>vi</b>  |
| <b>CONTENIDO DE FIGURA</b> .....                  | <b>xii</b> |
| <b>CONTENIDO DE TABLAS</b> .....                  | <b>xvi</b> |
| <b>RESUMEN</b> .....                              | <b>xix</b> |
| <b>CAPÍTULO 1</b> .....                           | <b>1</b>   |
| <b>INTRODUCCIÓN</b> .....                         | <b>1</b>   |
| 1.1. TÍTULO DESCRIPTIVO DEL PROYECTO.....         | 1          |
| 1.2. OBJETIVO GENERAL .....                       | 1          |
| 1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                   | 1          |
| 1.4. PROBLEMA A INVESTIGAR.....                   | 2          |
| 1.5. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....               | 3          |
| 1.6. JUSTIFICACIÓN.....                           | 4          |
| 1.7. HIPÓTESIS.....                               | 5          |
| 1.8. DESCRIPCIÓN DE LA RUTA DEL OLEODUCTO .....   | 6          |
| 1.9. DESCRIPCIÓN DE LAS ESTACIONES DE BOMBEO..... | 7          |
| 1.9.1. BOMBAS PRINCIPALES .....                   | 9          |
| 1.9.1.1. Bombas Principales Amazonas.....         | 9          |
| 1.9.1.2. Bombas Principales Cayagama.....         | 9          |
| 1.9.1.3. Bombas Principales Sardinas.....         | 10         |
| 1.9.1.4. Bombas Principales Páramo .....          | 10         |
| 1.10. CONDICIONES PARA OPERACIÓN .....            | 11         |
| <b>CAPÍTULO 2</b> .....                           | <b>13</b>  |
| <b>CORROSIÓN</b> .....                            | <b>13</b>  |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| 2.1.     | INTRODUCCIÓN.....  | 13 |
| 2.2.     | DEFINICIÓN DE CORROSIÓN .....  | 13 |
| 2.2.1.   | SERIE POTENCIAL DE LOS ELEMENTOS.....  | 14 |
| 2.2.1.1. | Series Electroquímicas Y Galvánicas .....  | 14 |
| 2.3.     | TIPOS DE DESGASTE CORROSIVO EN ELEMENTOS DEL MOTOR<br>WARTSILA 12V32LN.....                        | 15 |
| 2.3.1.   | CORROSIÓN EN CALIENTE.....   | 15 |
| 2.3.1.1. | Constituyentes de la cenizas .....   | 18 |
| 2.3.1.2. | Corrosión por sales fundidas. ....   | 20 |
| 2.3.1.3. | Corrosión en caliente tipo I.....  | 21 |
| 2.3.1.4. | Corrosión en caliente tipo II .....  | 22 |
| 2.3.2.   | MECANISMOS DE LA CORROSIÓN EN CALIENTE .....   | 22 |
| 2.3.3.   | REACCIONES FORMADOS DE LOS VANADATOS DE SODIO .....  | 22 |
| 2.3.4.   | SISTEMA SODIO-VANADIO-AZUFRE: (Na-V-S).....  | 23 |
| 2.3.5.   | FASES DEL SISTEMA SULFATO-VANADATO .....   | 24 |
| 2.3.6.   | CORROSIÓN EN FRÍO .....  | 28 |
| 2.3.7.   | CORROSIÓN LOCALIZADA POR PICADURA .....  | 28 |
| 2.3.8.   | CORROSIÓN POR EROSIÓN .....  | 29 |
| 2.4.     | FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR WARTSILA 12V32 LN.....  | 31 |
| 2.5.     | CONDICIONES DE OPERACIÓN .....   | 34 |
| 2.5.1.   | TEMPERATURA .....  | 34 |
| 2.5.2.   | TEMPERATURA DE GASES DE COMBUSTIÓN .....   | 35 |
| 2.5.3.   | EXCESO DE AIRE EN LA COMBUSTIÓN .....  | 35 |
| 2.6.     | CARACTERÍSTICAS DEL COMBUSTIBLE.....   | 35 |
| 2.6.1.   | CONTENIDO DE CENIZA PARA EL MOTOR WARTSILA.....  | 38 |
| 2.7.     | ESTADO DEL ARTE.....   | 39 |
| 2.7.1.   | PÉRDIDA DEL MATERIAL EN VÁLVULAS DE ESCAPE QUE<br>UTILIZA FUEL-OIL .....                           | 39 |
| 2.7.2.   | TECNOLOGÍA DE LOS ADITIVOS PARA DIÉSEL Y FUEL OÍL .....  | 41 |
| 2.7.2.1. | El efecto del aditivo en base de magnesio .....  | 42 |
| 2.7.2.2. | Magnesio como solución a problemas de corrosión derivados de la<br>combustión del fuel – oíl ..... | 42 |
| 2.7.2.3. | Elementos constitutivos de los aditivos para fuel- oíl y diésel .....                              | 43 |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CAPÍTULO 3</b> .....  | <b>45</b> |
| <b>PARTE EXPERIMENTAL</b> .....  | <b>45</b> |
| 3.1. INTRODUCCIÓN.....   | 45        |
| 3.2. SECUENCIAS DE FASE .....  | 45        |
| 3.3. TRABAJO DE CAMPO .....  | 46        |
| 3.3.1. CARACTERÍSTICAS DEL COMBUSTIBLE CRUDO- NAPO.....                        | 50        |
| 3.4. MÉTODOS Y TÉCNICAS DE ANÁLISIS .....                                      | 51        |
| 3.4.1. ENSAYOS METALOGRAFICOS.....   | 51        |
| 3.4.2. ANÁLISIS METALOGRAFICOS .....   | 51        |
| 3.4.3. MICROSCOPIA ÓPTICA.....   | 51        |
| 3.4.4. PROBETAS ANALIZADAS .....   | 52        |
| 3.4.5. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS METALOGRAFICAS .....                        | 52        |
| 3.4.5.1. Extracción de las muestras.....                                       | 52        |
| 3.4.5.2. Desbaste grueso .....   | 52        |
| 3.4.5.3. Desbaste fino .....   | 53        |
| 3.4.5.4. Pulido fino .....   | 53        |
| 3.4.5.5. Montaje de la muestras .....  | 53        |
| 3.4.5.6. Ataque del material.....  | 53        |
| 3.5. EQUIPOS UTILIZADOS EN LA PREPARACIÓN DE MUESTRAS<br>METALOGRAFICAS.....   | 54        |
| 3.5.1. DESBASTE GRUESO .....   | 54        |
| 3.5.2. DESBASTE FINO .....   | 54        |
| 3.5.3. PULIDO FINO.....  | 55        |
| 3.5.4. EQUIPO DE ENSAYO METALOGRAFICO .....                                    | 55        |
| 3.6. ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL .....   | 56        |
| 3.6.1. EQUIPO UTILIZADO EN EL ENSAYO DE DUREZA .....                           | 57        |
| 3.6.1.1. Procedimiento de utilización del durómetro.....                       | 57        |
| 3.7. ANÁLISIS QUÍMICO .....  | 59        |
| 3.7.1. ENSAYO DE COMPOSICIÓN QUÍMICA .....                                     | 59        |
| 3.7.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB).....                           | 59        |
| 3.7.2.1. Equipo utilizado en la microscopia electrónica de barrido (MEB) ..... | 61        |
| 3.7.2.2. Procedimiento de la microscopia electrónica de barrido.....           | 61        |



|                                     |   |           |
|-------------------------------------|---|-----------|
| 3.7.3.                              | ANÁLISIS QUÍMICO POR ESPECTROMETRÍA DE EMISIÓN<br>ÓPTICA O DE CHISPA.....   | 62        |
| 3.7.3.1.                            | Equipo utilizado en el análisis químico de emisión óptica por<br>chispa .....   | 62        |
| 3.7.3.2.                            | Procedimiento del análisis químico de emisión óptica por chispa .....   | 63        |
| 3.7.4.                              | ENSAYO DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....  | 63        |
| 3.7.4.1.                            | Equipo utilizado en el ensayo de difracción de rayos X.....   | 64        |
| 3.7.4.2.                            | Procedimiento del análisis químico de difracción de rayos X.....  | 65        |
| <b>CAPÍTULO 4</b> .....             |   | <b>66</b> |
| <b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> ..... |   | <b>66</b> |
| 4.1.                                | INTRODUCCIÓN.....   | 66        |
| 4.2.                                | RESULTADOS .....  | 66        |
| 4.2.1.                              | IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS .....  | 66        |
| 4.2.2.                              | DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS .....   | 68        |
| 4.2.3.                              | RESULTADOS METALOGRAFICOS .....   | 69        |
| 4.2.4.                              | RESULTADOS DE DUREZA .....  | 72        |
| 4.2.5.                              | RESULTADOS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA .....   | 73        |
| 4.2.5.1.                            | Resultados de microscopia electrónica del inyector con<br>refrigeración.....  | 73        |
| 4.2.5.2.                            | Resultados de microscopia electrónica del inyector sin refrigeración.....   | 75        |
| 4.2.5.3.                            | Resultados de microscopia electrónica de la válvula con pérdida de<br>material .....                                  | 76        |
| 4.2.5.4.                            | Resultados de microscopia electrónica de válvula sin deterioros.....  | 80        |
| 4.2.5.5.                            | Resultados de microscopia electrónica de la carcasa de un<br>turbocargador .....                                      | 83        |
| 4.2.5.6.                            | Resultados de microscopia electrónica del anillo de seguridad de los<br>alabes del turbocargador (dumping wire) ..... | 87        |
| 4.2.6.                              | RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL ENSAYO DE DIFRACCIÓN<br>DE RAYOS X.....   | 90        |
| 4.3.                                | DISCUSIÓN DE LOS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....   | 91        |
| 4.3.1.                              | TOBERAS REFRIGERADAS Y SIN REFRIGERACIÓN .....  | 91        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.3.2.   | VÁLVULAS DE ESCPAE CON PÉRDIDA DE MATERIAL Y SIN PÉRDIDA DE MATERIAL .....                             | 92         |
| 4.3.3.   | ANILLO DE SEGURIDAD DE LOS ÁLABES DEL TURBOCARGADOR.....   | 94         |
| 4.3.4.   | CARACASA DE LOS TURBOCARGADORES DE LAS BOMBAS PRINCIPALES DE LAS ESTACIONES DE BOMBEO .....            | 95         |
| 4.3.5.   | ANÁLISIS POR CHISPA A LA VÁLVULA CON PÉRDIDA DE MATERIAL Y TOBERAS REFRIGERADAS Y SIN REFRIGERAR ..... | 97         |
| 4.3.6.   | ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X A LOS DÉPOSITOS .....  | 98         |
| 4.3.7.   | ANÁLISIS DE COSTOS.....  | 98         |
| 4.3.7.1. | Mantenimiento actual .....   | 99         |
| 4.3.7.2. | Mantenimiento con aditivo en el combustible.....   | 100        |
| 4.3.7.3. | Mantenimiento con recomendaciones de cambio de frecuencia y componentes .....                          | 101        |
| 4.4.     | ANÁLISIS FINAL DE RESULTADOS .....   | 102        |
|          | <b>CAPÍTULO 5.....</b>   | <b>105</b> |
|          | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>  | <b>105</b> |
| 5.1.     | CONCLUSIONES .....   | 105        |
| 5.2.     | RECOMENDACIONES.....   | 106        |
|          | <b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>  | <b>107</b> |
|          | <b>ANEXOS .....</b>  | <b>111</b> |
|          | <b>ANEXO A .....</b>   | <b>112</b> |
|          | <b>ANEXO B .....</b>   | <b>121</b> |
|          | <b>ANEXO C .....</b>   | <b>122</b> |
|          | <b>ANEXO D .....</b>   | <b>125</b> |
|          | <b>ANEXO E .....</b>   | <b>127</b> |
|          | <b>ANEXO F .....</b>   | <b>128</b> |
|          | <b>ANEXO G.....</b>  | <b>129</b> |

|                     |            |
|---------------------|------------|
| <b>ANEXO H.....</b> | <b>130</b> |
| <b>ANEXO I.....</b> | <b>131</b> |

## CONTENIDO DE FIGURA

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. 1. Válvula de escape del motor D-0101D con depósitos de carbón.....                              | 3  |
| Figura 1. 2. Sistema Sodio-Vanadio-Azufre, en función de la temperatura.....                               | 6  |
| Figura 1. 3. Transporte de crudo pesado desde Amazonas (PS1) hasta Terminal Marino (TM).....               | 8  |
| Figura 2. 1. Diagrama de fases del sistema $V_2O_5 - Na_2O$ . ....   | 17 |
| Figura 2. 2. Mecanismos de corrosión por vanadatos de sodio. ....  | 18 |
| Figura 2. 3. Diagrama de estabilidad de fases para un sistema $Na_2SO_4 - V_2O_5$ . ....                   | 24 |
| Figura 2. 4. Corrosión por picaduras en un sistema que funciona con crudo combustible. ....                | 30 |
| Figura 2. 5. Diseño y descripción del funcionamiento del motor Wartsila 12V32LN. ....                      | 31 |
| Figura 3. 1. Recepción de las válvulas de las estaciones de Amazonas (PS1) y Páramo (PS4).....             | 48 |
| Figura 3. 2. Recepción de toberas refrigeradas del equipo D-0201B de Cayagama (PS2). ....                  | 48 |
| Figura 3. 3. Recepción de las toberas sin refrigerar del equipo D-0201D de la estación Cayagama (PS2)..... | 49 |
| Figura 3. 4. Recepción del Dumping Wire de la estación de Paramo (PS4). ....                               | 49 |
| Figura 3. 5. Incremento de la fuerza previa hasta la fuerza total.....                                     | 56 |
| Figura 3. 6. Posicionamiento del indentador sobre la superficie a medir. ....                              | 58 |
| Figura 3. 7. Lectura de dureza en la escala Rockwell B, Rockwell C.....                                    | 58 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3. 8. Esquema de funcionamiento de MEB. ....   | 60 |
| Figura 3. 9. Difracción de los Rayos X. ....  | 64 |
| Figura 4. 1. Microscopía electrónica de la zona de corrosión. ....  | 73 |
| Figura 4. 2. Espectrografía de elementos químicos presentes en la zona de corrosión.....                                  | 74 |
| Figura 4. 3. Zona de desgaste analizado mediante un punto de referencia. ....   | 75 |
| Figura 4. 4. Espectrografía de la composición química tomado de referencia en un punto cerca la zona de desgaste.....     | 76 |
| Figura 4. 5. Microscopía electrónica de la zona donde se presenta el crecimiento del grano por elevadas temperaturas..... | 77 |
| Figura 4. 6. Microanálisis con el proceso de EDS. ....  | 78 |
| Figura 4. 7. Composición química en la zona afectada.....   | 78 |
| Figura 4. 8. Espectrografía de los elementos presentes en la superficie afectada por elevadas temperaturas.....           | 79 |
| Figura 4. 9. Microscopia electrónica de una válvula sin defectos visibles. ....   | 80 |
| Figura 4. 10. Distribución de diferentes elementos químicos que se encuentran en el asiento de la válvula. ....           | 81 |
| Figura 4. 11. Elementos contaminantes depositados en la válvula de escape, sin presencia de pérdida de material. ....     | 81 |
| Figura 4. 12. Espectrografía de los elementos químicos presentes en la válvula de escape.....                             | 82 |
| Figura 4. 13. Superficie corroída con nódulos de grafito. ....  | 83 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4. 14. Microanálisis con EDS correspondientes a la superficie corroída de la carcasa del turbocargador.....                               | 83 |
| Figura 4. 15. Elemento químicos presentes en la superficie de desgaste por corrosión.....  | 84 |
| Figura 4. 16. Espectrografía de elementos químicos presentes en la superficie de corrosión.....  | 84 |
| Figura 4. 17. a) Microscopía electrónica ampliada a 100 X de la zona de corrosión, presenta pérdida de nódulos de grafito de la superficie. .... | 85 |
| Figura 4. 18. b) Se observa un nódulo de grafito y la presencia de óxido de hierro adherido. ....  | 86 |
| Figura 4. 19. Espectrografía de elementos químicos presentes en la superficie de corrosión, observadas a 100 X.....                              | 86 |
| Figura 4. 20. Microscopia electrónica, ampliación de la zona de fractura del anillo. ....  | 87 |
| Figura 4. 21. Mapeo de la composición química en la superficie de fractura. ....   | 88 |
| Figura 4. 22. . Elementos químicos con gran porcentaje, presentes en toda la superficie de fractura.....   | 88 |
| Figura 4. 23. . Espectrografía de elementos químicos de la zona de fractura del anillo.....  | 89 |
| Figura 4. 24. Elementos contaminantes presentes en los depósitos de las válvulas de escape y del hollín.....                                     | 90 |
| Figura 4. 25. Comparación de los elementos presentes en las toberas.....   | 92 |
| Figura 4. 26. Comparación de las válvulas de escape.....   | 94 |
| Figura 4. 27. . Porcentajes de los compuestos de un anillo de seguridad.....   | 95 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4. 28. Porcentajes de los compuestos de la carcasa del turbocargador. ...                                     | 96 |
| Figura 4. 29. Porcentajes de los compuestos presentes en las toberas y en la<br>válvula con pérdida de material..... | 97 |
| Figura 4. 30. Porcentajes de los compuestos de los depósitos.....  | 98 |

## CONTENIDO DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. 1. Identificación de los motores de combustión interna.....                                      | 2  |
| Tabla 1. 2. Condiciones de operación para diferentes escenarios.....                                      | 11 |
| Tabla 2. 1. Puntos de fusión de los principales constituyentes de la ceniza.....                          | 17 |
| Tabla 2. 2. Compuestos de una mezcla de 80% $V_2O_5$ - 20% $Na_2SO_4$ a temperaturas de 600 y 1000°C..... | 25 |
| Tabla 2. 3. Temperatura de fusión con relación al peso molecular.....                                     | 27 |
| Tabla 2. 4. Características del combustible que se utiliza en el motor Wartsila...                        | 36 |
| Tabla 2. 5. Diferencia entre HFO1 y HFO2.....   | 39 |
| Tabla 3. 1. Componentes del motor Wartsila 12V32LN.....   | 47 |
| Tabla 3. 2. Sustancias del combustible Crudo – Napo.....  | 50 |
| Tabla 3. 3. Especificaciones técnicas de la desbastadora de disco.....                                    | 54 |
| Tabla 3. 4. Especificaciones técnicas de la devastadora fina.....   | 54 |
| Tabla 3. 5. Especificaciones técnicas de la pulidora de paño.....   | 55 |
| Tabla 3. 6. Especificaciones técnicas del microscopio metalográfico.....                                  | 55 |
| Tabla 3. 7. Especificaciones técnicas del durómetro.....  | 57 |
| Tabla 3. 8. Especificaciones técnicas del equipo de MEB.....  | 61 |
| Tabla 3. 9. Especificaciones técnicas del Espectrómetro de emisión por chispa.                            | 63 |
| Tabla 3. 10. Especificaciones técnicas del difractor de rayos X.....                                      | 65 |
| Tabla 4. 1. Identificación de las muestras.....   | 67 |



|   |    |
|---|----|
| Tabla 4. 2. Resultado metalográfico de la probeta 1. ....   | 69 |
| Tabla 4. 3. Resultado metalográfico de la probeta 2. ....   | 69 |
| Tabla 4. 4. Resultado metalográfico de la probeta 3. ....   | 70 |
| Tabla 4. 5. Resultado metalográfico de la probeta 5. ....   | 71 |
| Tabla 4. 6. Resultado metalográfico de la probeta 9. ....   | 71 |
| Tabla 4. 7. Dureza del inyector con refrigeración. ....   | 72 |
| Tabla 4. 8. Dureza del inyector sin refrigeración. ....   | 72 |
| Tabla 4. 9. Dureza de la válvula picada. ....   | 72 |
| Tabla 4. 10. Dureza de la carcasa del turbocargador. ....   | 73 |
| Tabla 4. 11. Cuantificación del espectro tomando como referencia al elemento de hierro (Fe) de la tobera refrigerada. ....                              | 74 |
| Tabla 4. 12. Cuantificación del espectro tomando como referencia al elemento de hierro (Fe), analizada a la tobera sin refrigeración. ....              | 76 |
| Tabla 4. 13. Cuantificación de los valores en peso de los elementos de la válvula de escape. ....   | 79 |
| Tabla 4. 14. Valores obtenidos en forma de porcentajes en peso de cada elemento químico presente en el asiento de la válvula. ....                      | 82 |
| Tabla 4. 15. Cuantificación porcentual del espectro de la carcasa del turbocargador. ....   | 85 |
| Tabla 4. 16. Cuantificación porcentual del espectro tomado a 100 X de la carcasa. ....  | 87 |
| Tabla 4. 17. Cuantificación de los valores porcentuales del espectro, teniendo como referencia al elemento de hierro (Fe) del anillo de seguridad. .... | 89 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 4. 18. Costo de mantenimiento actual. ....                                      | 99  |
| Tabla 4. 19. Costo de mantenimiento con aditivo.....                                  | 100 |
| Tabla 4. 20. Costo de mantenimiento con cambios de frecuencia y componentes.<br>..... | 101 |

## RESUMEN

El presente estudio resalta los problemas que se encuentran en los motores Wartsila 12V32 de las unidades principales, instaladas en las estaciones de bombeo de Oleoducto de Crudos Pesados Ecuador OCP S.A.

Los componentes mecánicos ubicados en la etapa de postcombustión, están presentando pérdida de material, bajo la acción de sustancias corrosivas, operación inadecuada y paradas prolongadas de operación de las bombas principales, provocando mantenimientos inesperados y aumentando los costos, por el reemplazo de elementos desgastados.

Para el debido estudio, se utiliza ensayos metalográficos, ensayos de dureza, difracción de rayos X, espectrometría de chispa y análisis semicuantitativo de sólidos.

En el primer capítulo, se presenta una descripción de las estaciones de bombeo a lo largo de la ruta de OCP, identificando la cantidad de motores Wartsila 12V32 en cada estación de bombeo y las condiciones en las que se encuentran operando.

El segundo capítulo se presenta información sobre los problemas de corrosión que se presentan en motores que trabajan con crudo-combustible; este crudo combustible presenta alto contenido de azufre, sodio y vanadio. Las mismas que reaccionan con el oxígeno en la cámara de combustión provocando, corrosión en caliente, corrosión en frío, corrosión por sales fundidas y el proceso de corrosión - erosión.

También se indica estudios de la corrosión en caliente, en válvulas de escape de motores de media potencia que trabaja con fuel-oíl, al igual se presenta una tecnología de aditivo para la reacción con el fuel-oíl, con la finalidad de evitar la formación de sales corrosivas.

El tercer capítulo, se estudia a los tipos de corrosión que presentan los componentes mecánicos del motor Wartsila 12V32, bajo diferentes parámetros de

operación, como la temperatura, presión y la humedad en que se encuentran las diferentes estaciones de bombeo.

Se describe el funcionamiento de los equipos y los procedimientos de los ensayos efectuados a las diferentes muestras, para determinar con exactitud la causa raíz del problema de los elementos mecánicos.

En el capítulo cuarto se indica las metalografías de todas las muestras defectuosas, los resultados de los ensayos químicos, la cuantificación de los elementos químicos presentes en las zonas donde se evidencia los procesos de corrosión. Una vez determinado el inicio de la corrosión, se realiza un análisis de costos de mantenimiento, con diferentes alternativas.

Finalmente el capítulo cinco, determina la causa raíz del problema en los componentes del motor Wartsila 12V32, presentando las posibles conclusiones y recomendaciones del presente estudio.

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1. TÍTULO DESCRIPTIVO DEL PROYECTO**

ESTUDIO DEL DESGASTE EN LOS MOTORES DE LAS BOMBAS PRINCIPALES DEL OLEODUCTO DE CRUDOS PESADOS OCP ECUADOR S.A.

### **1.2. OBJETIVO GENERAL**

Estudiar el desgaste en los motores de las bombas principales del oleoducto de crudos pesados OCP Ecuador S.A.

### **1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Evaluar el tipo de desgaste que predomina desde la cámara de combustión hasta el turbocargador del motor Wartsila 12V32 LN.

Establecer el origen del proceso de desgaste en cada sector de combustión y post combustión.

Valorar la pérdida económica que ha sufrido la empresa debido al desgaste presente desde la cámara de combustión hasta el turbocargador del motor Wartsila 12V32 LN.

Identificar el impacto financiero de la posible solución a implementar para mitigar el desgaste.

#### 1.4. PROBLEMA A INVESTIGAR

Debido a los problemas de pérdida de material por corrosión que presentan algunos elementos del motor de combustión interna, desde la cámara de combustión hasta el turbocargador, es necesario determinar la causa raíz del problema, para aplicar una solución que ayude a eliminar o mitigar los problemas de corrosión; esto permitirá aumentar la vida útil en los motores de combustión interna Wartsila y generar beneficios económicos para la organización.

Tabla 1. 1. Identificación de los motores de combustión interna.

| <b>ESTACIÓN</b> | <b>TAG DEL MOTOR</b> |
|-----------------|----------------------|
| Amazonas        | D-0101A              |
| Amazonas        | D-0101B              |
| Amazonas        | D-0101C              |
| Amazonas        | D-0101D              |
| Amazonas        | D-0101E              |
| Amazonas        | D-0101               |
| Amazonas        | D-0102               |
| Cayagama        | D-0201A              |
| Cayagama        | D-0201B              |
| Cayagama        | D-0201C              |
| Cayagama        | D-0201D              |
| Cayagama        | D-0201E              |
| Sardinas        | D-0301A              |
| Sardinas        | D-0301B              |
| Sardinas        | D-0301C              |
| Sardinas        | D-0301D              |
| Sardinas        | D-0301E              |
| Sardinas        | D-0301F              |
| Sardinas        | D-0301               |
| Sardinas        | D-0302               |
| Páramo          | D-0401A              |
| Páramo          | D-0401B              |
| Páramo          | D-0401C              |
| Páramo          | D-0401D              |
| Páramo          | D-0401E              |
| Páramo          | D-0401F              |

Elaboración Propia

## 1.5. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Se proporcionaron por parte de OCP Ecuador algunos accesorios pertenecientes a los motores de combustión interna Wartsila que utilizan crudo pesado y presentan depósitos, así como síntomas de corrosión en caliente y corrosión en frío. El problema será analizado desde dos perspectivas, el daño de componentes por corrosión en caliente y el daño de componentes por corrosión en frío.

En el primer escenario se observa la figura 1.1, una válvula de escape del sistema de combustión que incluye depósitos y carbonización, debido al crudo pesado, que tiene altas cantidades de Azufre, Sodio y Vanadio. De la experiencia de OCP ha trabajado con combustibles que tienen alrededor del 2% en Azufre, hasta 130 ppm de vanadio y una viscosidad de hasta unos 500 centipoise (cP).



Figura 1. 1. Válvula de escape del motor D-0101D con depósitos de carbón.

En análisis preliminares realizados por parte de OCP Ecuador<sup>1</sup> y mediante ensayos químicos, difracción de rayos X, existen depósitos con altos contenidos de vanadio y sodio, los cuales son causantes de la corrosión en caliente, es muy

---

<sup>1</sup> ESTUPIÑAN, P., & PAZMIÑO, M. (2010). *Informe técnico análisis de falla*. Quito, Ecuador: Autor.

probable que los componentes en la zona de la cámara de combustión estén sufriendo este tipo de corrosión.

En el segundo escenario cuando los motores se encuentran sin operar por largos periodos de tiempo, es posible que las carcasas de los turbocargadores presenten corrosión por picaduras, debido a la geometría en el interior del turbocargador, que facilita almacenar contaminantes y vapor de agua.

## **1.6. JUSTIFICACIÓN**

El departamento de operaciones y mantenimiento de OCP Ecuador S.A. solicitó un estudio de diagnóstico de corrosión, destacando que en varias inspecciones realizadas a los motores de combustión interna Wartsila 12V32 de diferentes estaciones de bombeo del Oleoducto, se observó que había deterioro en ciertos componentes mecánicos, los cuales pueden ocasionar problemas en la estación de bombeo, de allí la importancia del presente estudio en plantear a la empresa las medidas que podrían implementarse para evitar se generen mayores gastos ocasionados por un aumento en la frecuencia de los mantenimientos preventivos y correctivos, debido a fallas en los equipos y componentes del motor de combustión interna y que ameriten reparaciones o reemplazo, a fin de evitar accidentes que pongan en riesgo la integridad física de los trabajadores.

Los motores Wartsila utilizados en las estaciones de bombeo del Oleoducto presentan un fenómeno de excesiva pérdida de material sobre todo en componentes de la cámara de combustión. En los motores Wartsila existen depósitos con altos contenidos de vanadio y sodio<sup>1</sup>, los cuales son los mayores responsables de corrosión debido al bajo punto de fusión que poseen, lo cual induce a que es muy probable que las partes metálicas en la zona de la cámara de combustión estén sufriendo procesos de corrosión.



Mediante el presente estudio se pretende:

Minimizar los problemas de poca fluidez de los gases de escape, la elevada presencia de depósitos que contienen azufre, vanadio, sodio y agua.

Reducir las emisiones contaminantes, las paras por limpieza, disminución de la probabilidad de corrosión en caliente y disminución de corrosión en frío.

Optimizar la combustión, que permita tener una combustión más completa y eficiente, reduciendo los productos que puedan ser causantes de la formación de depósitos de carbón, aprovechar de mejor manera el poder calórico del combustible e incluso lograr disminuir la cantidad de carbón en el material particulado que sale por las chimeneas. Mientras el combustible sea más pesado y más viscoso se dificulta una combustión completa razón por la cual se presentan carbonizaciones y material particulado con alta cantidad de carbón.

## **1.7. HIPÓTESIS**

OCP utiliza motores de combustión interna de marca Wartsila que utilizan como combustible crudo pesado. La posibilidad de corrosión en caliente en las válvulas de escape, toberas refrigeradas y sin refrigerar es debido a los gases de escape y a las sales contaminantes; la corrosión en frío se presenta en las carcasas de los turbocargadores, donde inicia la acumulación de los depósitos, para posteriormente adherirse a las paredes internas debilitando al material; con la presencia de vapor de agua, la carcasa presenta efectos como picaduras; en algunos casos el proceso de corrosión erosión es sumamente alta, por la cantidad de depósitos encontrados.

La presencia de Vanadio y Sodio sumado a la presencia de azufre en el combustible, producen sales de tipo corrosivo que afectan a los componentes internos del motor de combustión interna desde la cámara de combustión hasta

las chimeneas de los gases de escape. Los sistemas Na-V-S<sup>2</sup>, generan tres clases de vanadatos que tienen diferentes grados corrosivos en función de la relación V/Na y condiciones de reacción como es la temperatura.

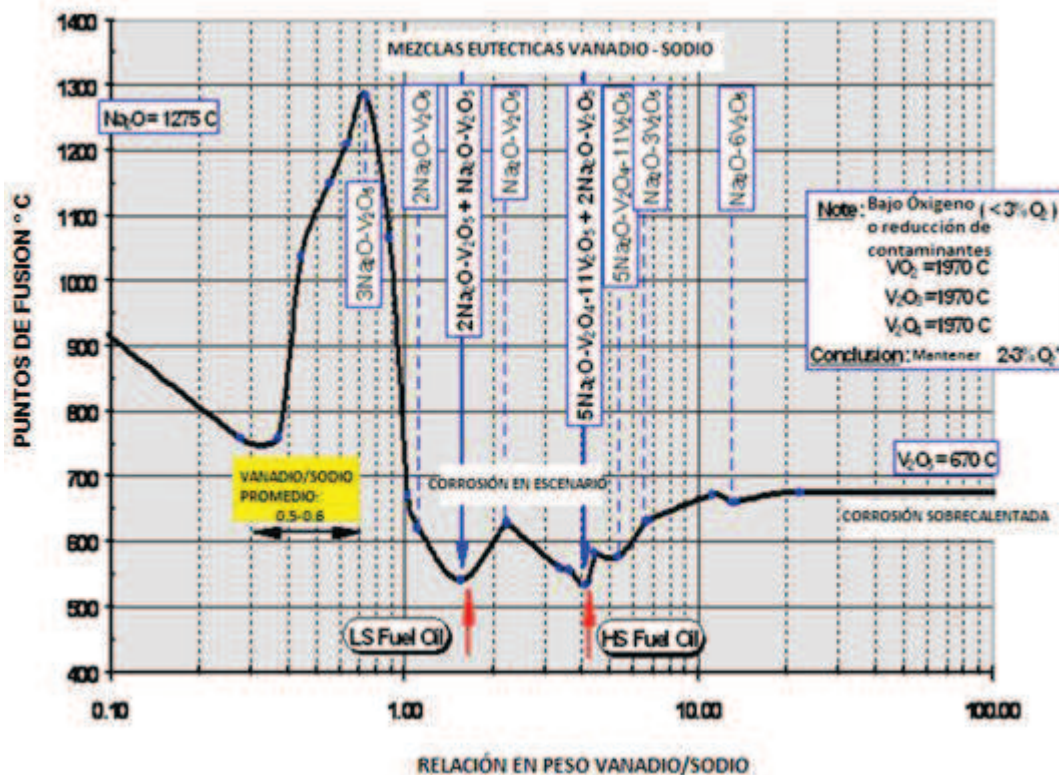


Figura 1. 2. Sistema Sodio-Vanadio-Azufre, en función de la temperatura.<sup>3</sup>

## 1.8. DESCRIPCIÓN DE LA RUTA DEL OLEODUCTO

El propósito principal del oleoducto es transportar el crudo pesado desde los campos orientales de Ecuador, desde el terminal de almacenamiento Amazonas

<sup>2</sup> ESTUPIÑAN, P., & MAFLA, D. (2010). *Proyecto de optimización del proceso de combustión de las unidades principales de OCP*. Quito, Ecuador: Autor.

<sup>3</sup> <http://www.monografias.com/trabajos94/corrosion-panes-tubos-centrales-termoelectricas/corrosion-panes-tubos-centrales-termoelectricas.shtml>

que se encuentra en Nueva Loja hasta el terminal Marino de OCP, ubicado en la costa noroeste ecuatoriana, cerca de Esmeraldas.

La ruta del oleoducto atraviesa Ecuador de este a oeste cruzando todas las regiones importantes del país. Comienza en una área oriental, esta área incluye la estación de bombeo Amazonas (PS1) en Lago Agrio, seguidamente atraviesa el Aguarico, donde se encuentra ubicada la estación de bombeo Cayagama (PS2), desde aquí impulsa el crudo hacia la estación de bombeo Sardinias (PS3), la que se encuentra cerca de Baeza. Desde aquí el crudo sube hacia la estación de bombeo Paramo (PS4). Esta zona se lo denomina área sierra o andina, el oleoducto atraviesa su máxima elevación en la zona de la Virgen que se encuentra a 4062 m.s.n.m.

Desde este punto el oleoducto comienza a descender por toda el área de la Costa o Litoral, atravesando reservas naturales como el área de Mindo, posterior a este punto se encuentra con la primera estación reductora de presión Chiquilpe (PRS-1) y la segunda estación reductora de presión Puerto Quito (PRS-2), ubicada en el Noroccidente de Pichincha. Culminando el transporte del crudo en el Terminal Marino de Esmeraldas ubicada a 204 m.s.n.m.

## **1.9. DESCRIPCIÓN DE LAS ESTACIONES DE BOMBEO**

El oleoducto está destinado a transportar crudo pesado de 18 ° hasta 24 ° API.

La primera estación de bombeo inicia en Amazonas PS-1 (KP 0 + 000) a 303 m.s.n.m en Lago Agrio. La estación de bombeo Amazonas (PS-1) consta de 5 bombas de refuerzo de 5175 BPH (Barriles por hora), a 188 psi de presión diferencial, motor diésel de 856 HP de potencia, con 5 bombas principales, cada bomba principal de 5160 BPH, motores de crudo-diésel de 5731 HP.

La estación de bombeo de Cayagama (PS-2) se encuentra en el punto KP 67+435, a 1028 m s. n. m. Consta de 5 bombas principales con una capacidad de 5128 BPH, motores de crudo-diésel de 5579 HP de potencia. El crudo es impulsado hacia la estación de bombeo de Sardinias

La estación de bombeo Sardinias (PS-3), su ubicación es en el KP 148+280, a 1800 m s. n. m, la estación está conformada por 6 bombas principales con capacidad de transportar 4531 barriles por día, motores de crudo-diésel de 5060 de HP. Desde aquí es impulsada hasta la estación de bombeo de Páramo (PS4).

La estación de bombeo Páramo (PS-4), tiene una ubicación en KP 185+900, consta de 6 bombas principales con capacidad para transportar 4526 barriles por día, con motores de crudo-diésel de 4629HP.

La figura 1.3, se presenta un esquema donde indica el transporte del crudo, desde Amazonas hasta el Terminal Marino<sup>4</sup>.

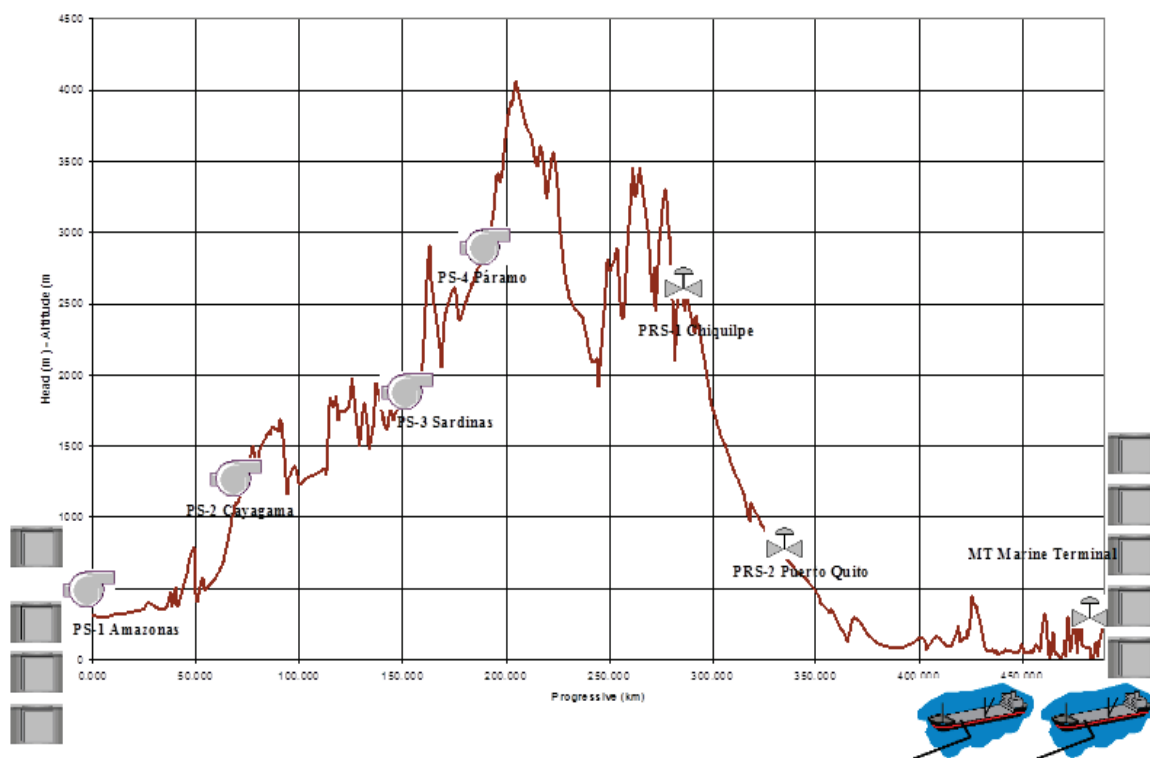


Figura 1. 3. Transporte de crudo pesado desde Amazonas (PS1) hasta Terminal Marino (TM).<sup>4</sup>

<sup>4</sup> OCP, ECUADOR S.A. (2003). *Manual de operación del Oleoducto de Crudos Pesados*. Quito, Ecuador: Autor.

## **1.9.1. BOMBAS PRINCIPALES**

Se presenta la descripción de las bombas principales, que se encuentran en diferentes estaciones de bombeo del oleoducto de OCP.

### **1.9.1.1. Bombas Principales Amazonas**

La estación trabaja con bombas centrifugas de 6 etapas denominadas P-0101A hasta P-0101E, con una capacidad de 5160 BPH, temperatura máxima de 80°C y temperatura mínima de 38°C, con un crudo de 18°API, accionadas por motores de crudo-diésel de 5731 HP cada motor. La operación es por lo general de cuatro bombas y con una de reserva, para entregar el caudal de diseño. En la bomba de reserva permanece abierta las válvulas de descarga y de succión, mientras que la válvula de recirculación permanece cerrada y en paralelo con la válvula de retención. Esto se lo hace para mantener caliente la bomba. Dependiendo de la viscosidad del crudo puede variar las alarmas. Una alarma de presión baja en la succión es de 74 (psig), permitiendo sacar de servicio a la bomba principal a los 70 (psig), con esto se previene cavitaciones. La presión de succión referida al eje de la bomba está por encima de 36.9 (psig), una presión atmosférica de 14.1 (psia), por lo tanto la presión de salida de servicio es de 13.2 (psi). El caudal mínimo recomendado es de 1950 BPH a máxima velocidad de la bomba y para 795 BPH a mínima velocidad de la bomba.

### **1.9.1.2. Bombas Principales Cayagama**

La estación de bombeo contiene cinco bombas centrifugas de 6 etapas denominadas como P-0201A hasta P-0201E, temperatura normal 66.2°C, temperatura mínima 38°C y temperatura máxima de 80°C, con una capacidad de 5128 BPH, a 1632 (psi) para un crudo de 18°API, los cuales son accionados por los motores de crudo-diésel con una capacidad de 5579 HP cada uno. De igual manera la estación está diseñada para trabajar con cuatro unidades principales y una de reserva. En el lado de la succión se encuentra una placa orificio que indica el caudal y ciertas alarmas. Estas alarmas pueden sacar de servicio a la bomba para proteger el oleoducto en el caso de bloqueo y el golpe de ariete. La presión de succión referida al eje de la bomba está por encima de los 36.9 (psia). La

presión atmosférica es de 12.8 (psia), como consecuencia una presión de salida de servicio de 25 (psig) da un margen de 0.9 (psi).

#### **1.9.1.3. Bombas Principales Sardinas**

Esta estación de bombeo está constituido por seis bombas centrifugas compuesta de 6 etapas, llamadas P-0301A hasta la P-0301F, temperatura máxima 73.3°C y temperatura mínima de 38°C, con una capacidad de 4531 BPH, con 1702 (psi) para 18°API, las cuales son accionadas por motores de crudo-diésel con una potencia 5060 HP cada uno. Las cinco unidades principales pueden alcanzar el caudal de diseño, mientras la sexta bomba principal permanece en reserva, con las válvulas de succión y de descarga abiertas, la válvula de recirculación permanecerá cerrada para mantener caliente a la bomba. De igual forma en la parte de la succión consta de una placa orificio que indica alarmas y el caudal, cuando la alarma de bajo caudal indica; saca de servicio a la bomba para proteger el oleoducto y en muchos de los casos el golpe de ariete.

La presión de succión referida al eje de la bomba debe estar por encima de 33 (psia), la presión atmosférica es de 11.6 (psia), entonces la presión de salida de servicio de 27 (psig), dando un margen de 5.6 (psi).

#### **1.9.1.4. Bombas Principales Páramo**

Páramo es la última estación de bombeo, la cual está constituido por seis bombas centrifugas de 6 etapas, denominadas P-0401 A hasta la P-0401F, temperatura nominal 72°C y mínima 38°C, con capacidad de 4526 BPH, con 1686 psi para 18°API. Donde son accionadas por motores de crudo-diésel de capacidad 4629 HP de potencia cada uno. Tiene similar funcionamiento que las demás estaciones, cinco unidades en funcionamiento y la sexta unidad se deja de reserva, con válvulas de succión y de descarga abiertas, la válvula de recirculación cerrada y en paralelo con la válvula de retención para mantener caliente la bomba.



|                               |                     |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Cayagama<br>Entrada           | Temperatura<br>(°F) | 147  | 147  | 126  | 126  | 126  | 119  | 86   | 113  |
| PS-2<br>Cayagama<br>Salida    | Presión(Psi)        | 1623 | 1579 | 1584 | 1571 | 1528 | 1522 | 1558 | 1362 |
|                               | Temperatura<br>(°F) | 150  | 151  | 129  | 129  | 128  | 125  | 92   | 118  |
| PS-3<br>Sardinas<br>Entrada   | Presión(Psi)        | 150  | 160  | 170  | 170  | 170  | 180  | 180  | 250  |
|                               | Temperatura<br>(°F) | 125  | 124  | 108  | 108  | 108  | 103  | 84   | 85   |
| PS-3<br>Sardinas<br>Salida    | Presión(Psi)        | 1726 | 1693 | 1702 | 1689 | 1704 | 1689 | 1699 | 1502 |
|                               | Temperatura<br>(°F) | 158  | 158  | 131  | 131  | 113  | 108  | 86   | 167  |
| PS-4<br>Páramo<br>Entrada     | Presión(Psi)        | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
|                               | Temperatura<br>(°F) | 151  | 151  | 126  | 126  | 106  | 101  | 85   | 137  |
| PS-4<br>Páramo<br>Salida      | Presión(Psi)        | 1785 | 1754 | 1768 | 1754 | 1792 | 1726 | 1743 | 1663 |
|                               | Temperatura<br>(°F) | 155  | 154  | 130  | 130  | 110  | 107  | 91   | 143  |
| PRS-1<br>Chiquilpe<br>Entrada | Presión(Psi)        | 850  | 900  | 900  | 900  | 900  | 900  | 900  | 1450 |
|                               | Temperatura<br>(°F) | 138  | 137  | 116  | 116  | 100  | 100  | 87   | 99   |
| PRS-1<br>Chiquilpe<br>Salida  | Presión(Psi)        | 182  | 119  | 112  | 101  | 146  | 138  | 142  | 36   |
|                               | Temperatura<br>(°F) | 142  | 142  | 121  | 121  | 104  | 105  | 92   | 107  |
| PRS-2<br>P. Quito<br>Entrada  | Presión(Psi)        | 1100 | 1200 | 1200 | 1200 | 1200 | 1300 | 1300 | 2600 |
|                               | Temperatura<br>(°F) | 145  | 144  | 125  | 125  | 110  | 110  | 98   | 90   |
| PRS-2<br>P. Quito<br>Salida   | Presión             | 112  | 60   | 62   | 66   | 66   | 60   | 69   | 38   |
|                               | Temperatura<br>(°F) | 151  | 150  | 131  | 131  | 117  | 117  | 105  | 104  |
| MT<br>Terminal<br>Marino      | Presión(Psi)        | 120  | 140  | 160  | 170  | 170  | 200  | 230  | 600  |
|                               | Temperatura<br>(°F) | 131  | 129  | 116  | 116  | 105  | 105  | 97   | 80   |

Fuente: Tomado del manual de Operación del Oleoducto de Crudos Pesados.



## **CAPÍTULO 2**

### **CORROSIÓN**

#### **2.1. INTRODUCCIÓN**

En el siguiente capítulo se describe los tipos de corrosión que se pueden presentar en los elementos de los motores de combustión interna de las bombas principales de las estaciones de bombeo de OCP.

Las características corrosivas de ciertos elementos y medios, constituyen un gran riesgo para los equipos y en consecuencia para las personas de la organización. La corrosión de los materiales causa accidentes frecuentes, por lo tanto se debe conocer los argumentos teóricos de los fenómenos corrosivos y formas de prevención, para evitar la reducción en la vida útil de los equipos.

#### **2.2. DEFINICIÓN DE CORROSIÓN**

Corrosión es el deterioro de las propiedades, físicas, químicas y mecánicas de un metal o de aleaciones, como resultado de su interacción química o electroquímica con el medio que lo rodea. La corrosión se produce porque todos los materiales metálicos tienden a volver a la condición en cual se encuentra en la naturaleza; termodinámicamente, a su estado estable que son: sales u óxidos.

Para presentar el efecto corrosivo deben existir zonas anódicas, catódicas (camino metálico) y un electrolito que en ciertos casos puede ser el medio donde se encuentran los equipos. Por efectos de la corrosión el desgaste del material es muy lento y continuo, pero en condiciones con humedad se puede acelerar el proceso de la corrosión.

El fenómeno puede manifestarse sin cambios aparentes externos, pero con afecciones internas a la estructura del metal y variaciones en sus propiedades mecánicas. Otro aspecto a considerar es que el daño del fenómeno corrosivo, en

la gran mayoría de los casos, no es directamente proporcional al tiempo en el cual los metales están sometidos a la acción de los ambientes corrosivos.<sup>5</sup>

Los factores importantes que influyen a la corrosión son: acides de la solución, agentes oxidantes, formación de películas, potencial eléctrico de los metales, temperatura y velocidad.

### **2.2.1. SERIE POTENCIAL DE LOS ELEMENTOS**

En la serie potencial de los metales contienen elementos que son positivos con respecto al potencial de hidrógeno, es decir que son de mayor potencial y se denominan zona noble, en el extremo contrario, se denomina zona activa y están situados los elementos de potencial negativo con respecto al hidrógeno.<sup>6</sup>

#### **2.2.1.1. Series Electroquímicas Y Galvánicas**

En las series electroquímicas se ordenan los metales por sus potenciales de equilibrio con relación normal de hidrógeno y solo dá una idea sobre el comportamiento frente a la corrosión. La mayor información es suministrada por la serie galvánica, donde los metales y aleaciones se han ordenado por sus potenciales de disolución.

Los metales o aleaciones que figuran en cualquiera de las series con potencial negativo son por que tienden a emitir iones positivos, se comportan como anódicos, por el contrario los que tienen potencial positivo son catódicos, debido a que atraen aniones.<sup>6</sup>

---

<sup>5</sup> POSADA, B., & BETANCOURTH, D. (2007). *Protección contra la corrosión en sales fundidas de un acero por rociado térmico con una aleación níquel-cromo en el rango de temperatura de 500°C-650°C*. Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.

<sup>6</sup> CUESTA, F. (2009). *Análisis del fenómeno de corrosión en materiales de uso técnico*.

## **2.3. TIPOS DE DESGASTE CORROSIVO EN ELEMENTOS DEL MOTOR WARTSILA 12V32LN**

Al utilizar crudo como combustible en un motor diésel, se forman como productos de la combustión, compuestos residuales, vanadatos de sodio, que son muy corrosivos por encontrarse en estado líquido a temperaturas entre 350 °C y 650°C. En función de la relación molar Vanadio/Sodio del compuesto formado, la presencia de esos vanadatos de sodio ocasionan corrosiones en todo el sistema de combustión y post-combustión, donde la temperatura sea superior a los 350 °C, y son más graves cuando mayor sea el contenido de vanadatos y más alta la temperatura.

Debido a estas características se produce corrosión a gran escala en los siguientes elementos mecánicos de estudio: toberas de inyección de combustible (refrigeradas y sin refrigerar), válvulas de escape de los motores, carcasas de admisión de gases de escape en los turbocargadores y en anillos de seguridad de los alabes direccionales (Dumping Wire).

La corrosión en caliente se produce cuando el motor está en operación independientemente si es régimen continuo o si el régimen del motor es discontinuo, es decir si los motores realizan las paradas por un largo tiempo superior a un mes.

La corrosión en frío se produce por la acides de los residuos adheridos, debido fundamentalmente a la oclusión de  $\text{SO}_3$ , entre los residuos que al enfriarse por debajo de los 160° C pueden dar lugar a la condensación de ácido sulfúrico.

### **2.3.1. CORROSIÓN EN CALIENTE**

El deterioro de metales y aleaciones expuestas en aire u otras atmosferas oxidantes a elevadas temperaturas, en presencia de depósitos de sales fundidas, es un tipo específico de oxidación denominada corrosión por sales fundidas o (hot corrosion). Este tipo de corrosión es típico de las plantas industriales, que producen vapor para generar energía eléctrica o vapor para el proceso industrial,

estas plantas operan a elevadas temperaturas consumiendo combustibles fósiles que son nocivos ya que presentan altos contenidos de azufre, vanadio, sodio y asfáltenos.

Durante la combustión normal de un combustóleo que poseen altos contenidos de sodio (Na), azufre(S), y vanadio (V), se forman vapores de pentóxido de vanadio  $V_2O_5$  y sulfatos de metales alcalinos ( $Na_2SO_4$ ), los cuales reaccionan para producir compuestos de vanadio, principalmente vanadatos de sodio. El compuesto formado por el sulfato de sodio, el pentóxido de vanadio ( $Na_2SO_4 \cdot V_2O_5$ ) y mezclas de vanadio-sodio ayudan a disminuir el punto de fusión de la ceniza.

Esta clase de compuestos  $Na_2SO_4$  y  $V_2O_5$  forman un sistema binario que sufren una reacción eutéctica a temperatura relativamente baja, menor de  $600^\circ C$ , causando fusión, formando una capa estable de electrolito sobre la superficie del metal. Los compuestos de vanadio formados son muy corrosivos y estables bajo condiciones normales de operación en motores de combustión interna.<sup>5</sup>

Esta capa de electrolito cubre la superficie metálica, tratando de proteger al material de la oxidación o agentes corrosivos presentes en el ambiente, pero cuando la capa de óxido protector es desgastada, la velocidad de oxidación aumenta, obteniendo la corrosión en caliente.

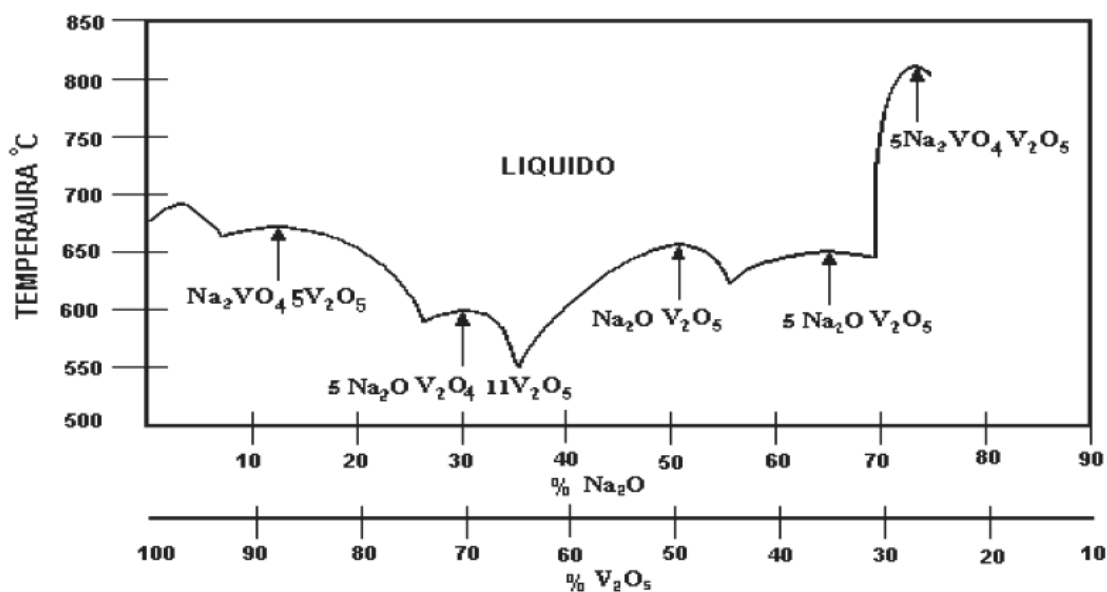


Figura 2. 1. Diagrama de fases del sistema  $V_2O_5 - Na_2O$ .<sup>5</sup>

En la tabla 2.1, se puede observar los puntos de fusión de los principales compuestos que se forman a partir de dicha reacción, constituyentes de la ceniza.

Tabla 2. 1. Puntos de fusión de los principales constituyentes de la ceniza.

| COMPUESTO                           |                                      | PUNTO DE FUSION (°C) |
|-------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|
| Trióxido de vanadio                 | $V_2O_3$                             | 1971                 |
| Tetróxido de vanadio                | $V_2O_4$                             | 1971                 |
| Pentóxido de Vanadio                | $V_2O_5$                             | 691                  |
| Metavanadato de Sodio               | $Na_2O \cdot V_2O_5$                 | 630                  |
| Pirovanadato de Sodio               | $2Na_2O \cdot V_2O_5$                | 641                  |
| Ortovanadato de Sodio               | $3Na_2O \cdot V_2O_5$                | 849                  |
| $\beta$ -Vanadil vanadato de sodio  | $Na_2O \cdot V_2O_4 \cdot 5V_2O_5$   | 627                  |
| $\gamma$ -Vanadil vanadato de sodio | $5Na_2O \cdot V_2O_4 \cdot 11V_2O_5$ | 535                  |
| Bisulfato de Sodio                  | $NaHSO_4$                            | 249                  |
| Sulfato de sodio                    | $Na_2SO_4$                           | 885                  |
| Pirosulfato de sodio                | $Na_2S_2O_7$                         | 399                  |
| Óxido de níquel                     | $NiO$                                | 2091                 |
| Óxido de hierro                     | $Fe_2O_3$                            | 1566                 |
| Óxido de calcio                     | $CaO$                                | 2572                 |

Fuente: Tomado de POSADA, B., & BETANCOURTH, D. (2007)

La corrosión por cenizas definió como un fenómeno en fase líquida a alta temperatura, se presenta cuando las capas de óxido de hierro formadas

espontáneamente durante la operación son disueltas por los vanadatos de sodio fundidos. Los compuestos permiten que el oxígeno y otros agentes corrosivos difundan rápidamente hacia la superficie metálica, dando lugar a un ataque corrosivo acelerado, el cual reduce el espesor del material, con lo que disminuye el área que soporta la carga y aumentando los esfuerzos en la zona afectada. Ver figura 2.2.

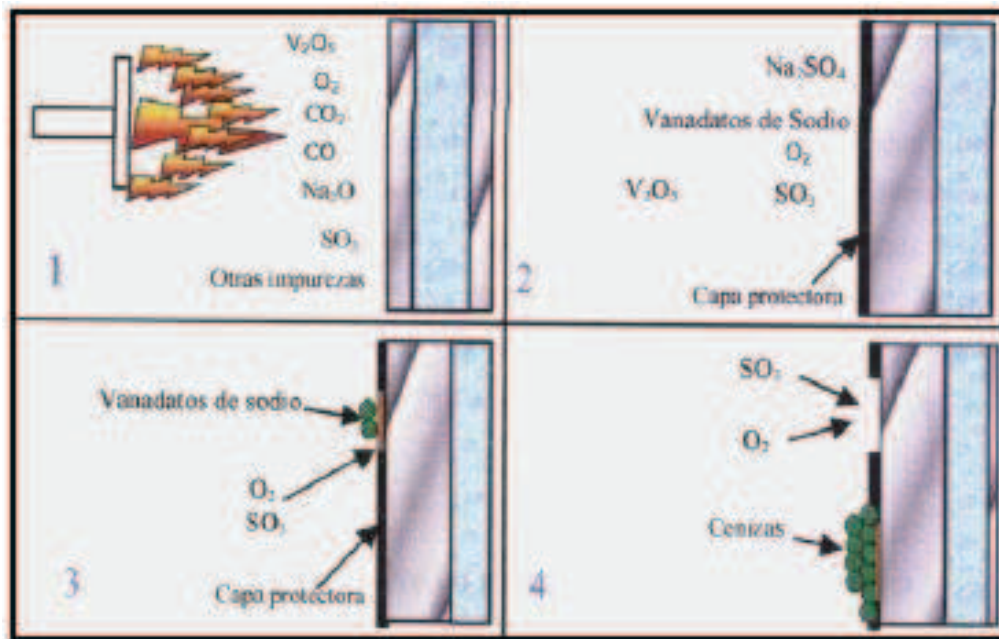


Figura 2. 2. Mecanismos de corrosión por vanadatos de sodio.<sup>7</sup>

### 2.3.1.1. Constituyentes de la cenizas

Los principales constituyentes de las cenizas son las siguientes:

**Vanadio.-** Es un constituyente del petróleo, causante de corrosión por sus bajos puntos de fusión. La concentración del vanadio en el crudo es alrededor de 600-650 ppm, lo cual puede representar un alto porcentaje de la ceniza depositada. Se puede decir que a medida que aumenta el contenido de vanadio en el crudo mayor será el riesgo de corrosión por sales fundidas.

<sup>7</sup> NIÑO, C., & DIAZ, W. (2005). *Evaluación de la corrosión en caliente por método electroquímico de un acero AISI 304 H en presencia del óxido de níquel como inhibidor*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Sodio.- Es el elemento primario que reacciona con el vanadio en la formación de compuestos de bajo punto de fusión. Al reaccionar con el oxígeno en la combustión, forma óxidos de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), pero como existe azufre, tiende a la formación de sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), los dos compuestos pueden reaccionar con el pentóxido de vanadio ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ) para formar los vanadatos.

El contenido de sodio en el crudo es de 40 ppm, contribuye a la corrosión por cenizas y también depende de las reacciones que se dá en la combustión.

Azufre.- La corrosión por cenizas del crudo es acelerada por el contenido de azufre. Casi siempre se presenta como  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  en los depósitos formados. Al aumentar el contenido de azufre produce un incremento de la corrosión.<sup>7</sup>

La temperatura de los gases de escape está entre  $390^\circ\text{C}$  a  $450^\circ\text{C}$ , la cual se involucra el contacto de los materiales metálicos con los gases, que son productos de la combustión que contienen impurezas inorgánicas, cuando estos gases se enfrían algunos vapores se condensan formando películas finas de sales fundidas sobre la superficie metálica, esta circunstancia genera una condición altamente corrosiva. La severidad de este tipo de ataque puede ser catastrófica, debido a que está relacionado con un número de variables que son: la composición del depósito de sales, la atmosfera o ambiente, la temperatura y el ciclo de temperatura, la composición de la aleación del material y la microestructura de la aleación.

El ataque corrosivo se acelera cuando los componentes del sistema alcanzan la temperatura de fusión del depósito de sales; el cuál ejerce una acción fundente sobre la capa de óxido protector, deteriorándola por disolución y favoreciendo el transporte de las especies oxidantes hacia la superficie metálica y de los iones metálicos hacia el depósito salino, desatando así el ataque acelerado.<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> TIWARI, S., & PRAKASH, S. (1988). *Magnesium oxides as inhibitor of hot oil ash corrosion*. Materials Science and Tecnology.

### 2.3.1.2. Corrosión por sales fundidas.

La corrosión por sales fundidas es generada por la degradación acelerada de metales y aleaciones por una película delgada de sal fundida en presencia de un ambiente oxidante a elevada temperatura.

La severidad de este tipo de ataque puede ser catastrófica y está relacionada con un número de variables como son la composición del depósito de sal, la atmosfera o ambiente, temperatura y ciclo de temperatura; composición de aleación o material como también de la microestructura de la aleación. Una característica de la corrosión por sales fundidas es su naturaleza electroquímica, la cual involucra la transferencia de electrones.

La formación de los compuestos de sulfato de sodio y pentóxido de vanadio que originan vanadatos complejos de sodio, cuyos puntos de fusión son cercanos a  $540^{\circ}\text{C}$ <sup>9</sup>, generan depósitos fundidos muy adherentes que permiten una mayor velocidad de difusión de los elementos nocivos, deteriorando el material de forma acelerada.

Es necesaria la condensación del sulfato de sodio para acelerar la corrosión, además la oxidación de los diferentes elementos en la aleación como: aluminio, cromo, molibdeno y vanadio, alteran el carácter ácido básico del depósito de sal, lo cual aumenta o disminuye la disolución de los óxidos.<sup>9</sup>

La corrosión por sales fundidas tiene dos etapas:

Etapa de iniciación.- En esta etapa los productos son semejantes a la reacción obtenidos entre el gas y la aleación en ausencia de depósitos, una formación de todos los óxidos termodinámicos estables y protectores, posteriormente presenta una difusión en fase sólida de los elementos productos de la corrosión.

---

<sup>9</sup> WONG, M. (1989). *Investigación sobre corrosividad a alta temperatura de depósitos de cenizas de aceite residual de petróleo con altos contenidos de V, S, y Na*. X International conference in materials technologic.



El oxígeno disuelto difunde hacia el interior del material y los iones de los elementos reactivos de la aleación lo hacen en sentido inverso.

La reacción tiene lugar en una de las interfaces metal-óxido u óxido-metal, los factores sintéticos desempeñan un papel importante a la hora de determinar que óxidos deben seguir creciendo, los factores son influenciados por el tipo de capa protectora de óxido formada.

El crecimiento de la capa de óxido depende de la clase de material metálico, atmosfera, temperatura. Si la capa formada es continua y el proceso global está controlado por un mecanismo de difusión, la velocidad de corrosión es inversamente proporcional al espesor de la capa y disminuye con el tiempo de modo parabólico, si la capa es porosa y discontinua su cinética de ataque es lineal. Sin embargo al comienzo de la oxidación a altas temperaturas las leyes que rigen este sistema son del tipo logarítmico o asintótico.

El comportamiento de la capa de óxido formada depende, si el volumen del óxido es superior al del metal consumido, la etapa controlante será la difusión, pero si es menor que uno, el óxido no puede recubrir por completo al metal y se producen capas porosas no protectoras y si es mayor que uno, las tensiones generadas durante la formación de la capa pueden agrietarla.

Cuando el material está en servicio la capa de óxido se puede deteriorar por erosión. La corrosión deshace progresivamente la aleación de los elementos que se oxida, siguiendo una degradación térmica.

Etapa de propagación.- Directamente se relaciona con las propiedades de los productos del óxido formado en la etapa anterior, se caracteriza por ataque muy fuerte sobre el material. Pueden presentarse dos procesos diferentes entre los depósitos fundidos y los óxidos, depende de la composición de la sal.<sup>7</sup>

### **2.3.1.3. Corrosión en caliente tipo I<sup>5</sup>**

La corrosión en caliente tipo I ocurre en el rango de temperaturas de 750°C a 950°C, cuando la película de sal condensada esta líquida y una velocidad máxima

de corrosión a 900°C; considerando el punto de fusión del sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) que es 884°C.

#### 2.3.1.4. Corrosión en caliente tipo II

La corrosión en caliente de tipo II se presenta a bajas temperaturas, ocurre por debajo del punto de fusión del sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Esta corrosión demuestra que la morfología de los productos de reacción es caracterizada por un ataque no uniforme en forma de huecos con pequeña formación de sulfatación cerca a la interface metal-óxido y una disminución de Cr o Al en el sustrato de la aleación.

#### 2.3.2. MECANISMOS DE LA CORROSIÓN EN CALIENTE

Los mecanismos propuestos para la etapa de propagación de la corrosión en caliente tipo I son la oxidación-sulfidación y el flujo de la sal.

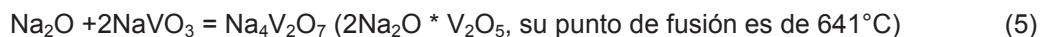
El mecanismo de la corrosión tipo II sigue dos etapas: la primera, en la cual se presenta la formación de un sulfato-vanadio líquido sobre la superficie metálica y la segunda en la cual se presenta la propagación de ataque hacia el exterior a través de la película de sal.<sup>5</sup>

#### 2.3.3. REACCIONES FORMADOS DE LOS VANADATOS DE SODIO

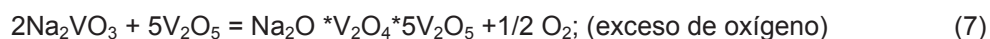
Los depósitos de sal fundida pueden estar constituidos por una mezcla de sulfato y vanadato. La composición del depósito está determinada por la reacción y por la presión parcial del  $\text{SO}_3$ .<sup>7</sup>



( $\text{Na}_2\text{O} * \text{V}_2\text{O}_5$ , su punto de fusión es de 630°C)



El  $\text{NaVO}_3$  da lugar a otros vanadatos más complejos y con menor punto de fusión, cuando reacciona con el pentóxido de vanadio se presentan las siguientes ecuaciones:



$\beta$ - Vanadil vanadato de sodio, con un punto de fusión de  $627^\circ\text{C}$ .



$\gamma$  - Vanadil vanadato de sodio, con un punto de fusión de  $535^\circ\text{C}$ .

Las fases fundidas está en equilibrio con algunos componentes gaseosos como  $\text{SO}_3$  y el  $\text{O}_2$ , estos ocasionan sulfidación y oxidación en el metal base.<sup>7</sup>

#### 2.3.4. SISTEMA SODIO-VANADIO-AZUFRE: (Na-V-S)

El estudio del diagrama de equilibrio de fases para el sistema  $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-V}_2\text{O}_5$ , la figura 2.2 indica los compuestos formados como:  $\text{NaVO}_3 * \text{Na}_2\text{O} * 3\text{V}_2\text{O}_5$  ( $\text{Na}_3 \text{V}_7\text{O}_{19}$ ) y  $\text{Na}_2\text{O} * 6\text{V}_2\text{O}_5$  ( $\text{Na}_2\text{V}_{12}\text{O}_3$ ).

Se tienen tres compuestos como resultado de la figura 2.2, que son los siguientes:



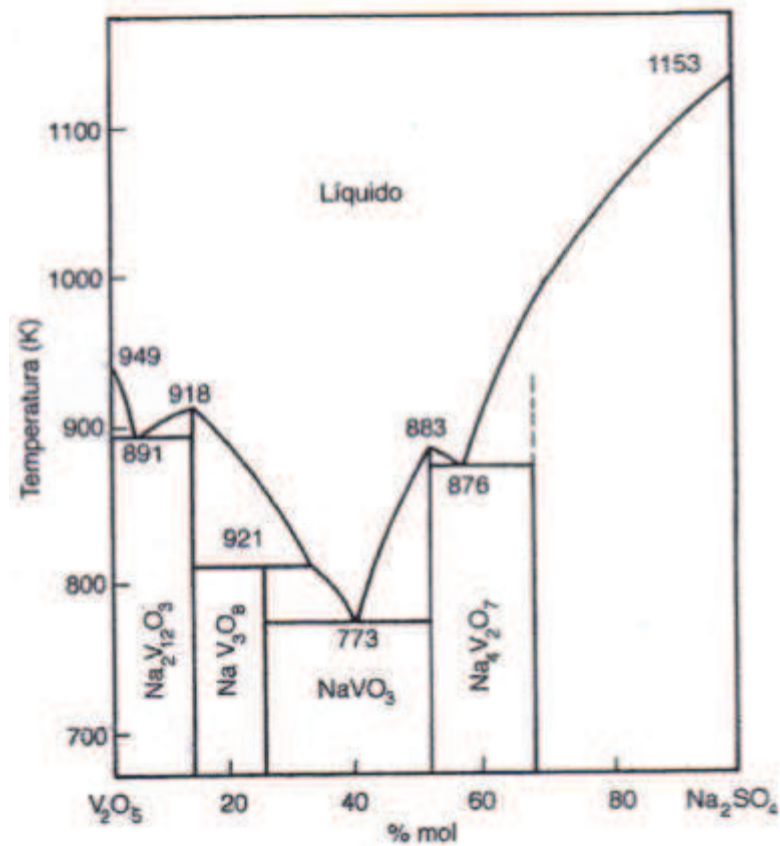
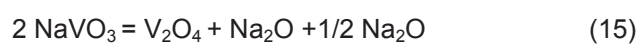


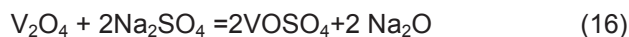
Figura 2. 3. Diagrama de estabilidad de fases para un sistema  $\text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{V}_2\text{O}_5$ .<sup>10</sup>

### 2.3.5. FASES DEL SISTEMA SULFATO-VANADATO<sup>7</sup>

Para la construcción de los diagramas de estabilidad de fase para el sistema Na-V-S-O, se considera los equilibrios químicos:



<sup>10</sup> OTERO, E. (2012). *Corrosión y degradación de materiales*. Madrid. España: Editorial Síntesis S.A.



El sulfato de sodio  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  es la sal más común en los depósitos de sales involucradas en la corrosión en caliente, esta sal proviene de combustibles que contienen azufre (S), el cual durante la combustión con exceso de oxígeno forma el  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y son especies que forman una fase condensada.

En la siguiente tabla 2.2, se presenta los compuestos a diferentes temperaturas identificados en la mezcla corrosiva de  $\text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{V}_2\text{O}_5$ .

Tabla 2. 2. Compuestos de una mezcla de 80%  $\text{V}_2\text{O}_5$  - 20%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a temperaturas de 600 y 1000°C.

| TEMPERATURA °C. | COMPUESTOS IDENTIFICADOS.   |
|-----------------|---|
| 600             | $\text{Na}_2\text{OV}_2\text{O}_4\text{5V}_2\text{O}_5$ , $\text{NaV}_6\text{O}_{15}$   |
| 700             | $\text{Na}_2\text{OV}_2\text{O}_4\text{5V}_2\text{O}_5$ , $\text{NaV}_6\text{O}_{15}$ , $\text{NaV}_3\text{O}_8$ , $\text{Na}_8\text{V}_{24}\text{O}_{63}$  |
| 800             | $\text{Na}_8\text{V}_{24}\text{O}_{63}$ , $\text{NaV}_3\text{O}_8$ , $\text{NaV}_6\text{O}_{15}$ , $\text{Na}_2\text{OV}_2\text{O}_4\text{5V}_2\text{O}_5$  |
| 900             | $\text{Na}_8\text{V}_{24}\text{O}_{63}$ , $\text{NaV}_3\text{O}_8$ , $\text{NaV}_6\text{O}_{15}$ , $\text{Na}_2\text{OV}_2\text{O}_4\text{5V}_2\text{O}_5$ ,<br>$5\text{Na}_2\text{OV}_2\text{O}_4\text{11V}_2\text{O}_5$ |
| 1000            | $\text{Na}_8\text{V}_{24}\text{O}_{63}$ , $\text{NaV}_3\text{O}_8$ , $\text{NaV}_6\text{O}_{15}$ , $\text{Na}_2\text{OV}_2\text{O}_4\text{5V}_2\text{O}_5$ ,<br>$5\text{Na}_2\text{OV}_2\text{O}_4\text{11V}_2\text{O}_5$ |

Fuente: Tomado de NIÑO, C., & DIAZ, W. (2005).

Estos elementos metálicos sufren desgaste por corrosión acelerado a alta temperatura, cuando están en contacto con la película de sal fundida en un ambiente oxidante. Esta corrosión se debe a la formación de las cenizas durante el proceso de la combustión.<sup>5</sup>

Los depósitos fundidos por debajo de 550°C, dependiendo del contenido de pentóxido de vanadio  $\text{V}_2\text{O}_5$ , forman una capa húmeda de electrolito estable sobre la superficie metálica. Para aplicaciones industriales se encontró que los depósitos de sal pueden estar constituidos por una mezcla de sulfato y vanadato.

El vanadio del combustible se presenta en forma de vanadio parafínico, el cual es transformado durante el proceso de combustión entre vanadio y el azufre, donde la ceniza está en forma de sulfatos alcalinos.<sup>11</sup>

Los compuestos formados de vanadio son muy corrosivos y estables bajo condiciones normales de operación de los motores de bombeo.

Las aleaciones y los metales utilizados a elevadas temperaturas se protegen por la formación de una capa de óxido densa, que ligeramente es adherente y crece paulatinamente lento sobre la superficie expuesta al gas caliente oxidante.<sup>5,7</sup>

El vanadio, sodio y el azufre son las impurezas más comunes de los grados bajos del petróleo. Durante la combustión el vanadio pasa de pentóxido de vanadio, el cual forma compuestos de bajo punto de fusión, mientras que el azufre es involucrado con el sodio y da productos de sulfatos de sodio.

El vanadio forma varios óxidos como  $V_2O_2$ ,  $V_2O_3$ ,  $V_2O_4$ , y  $V_2O_5$ . El pentóxido de vanadio ( $V_2O_5$ ) es de mayor carácter corrosivo, debido al aumento de oxidación, por otra parte las condiciones de combustión donde existe gran cantidad de oxígeno y alta temperatura, cualquier forma de vanadio presente en el petróleo tiende a oxidarse a la forma de  $V_2O_5$ , por lo que su presencia será segura en los gases de combustión y en estado líquido, este se funde a  $690^\circ\text{C}$  lo que origina efectos corrosivos como, corrosión por ataque de las superficies metálicas, formando metavanadatos de hierro ( $\text{Fe}(\text{VO}_3)_3$ ). Catálisis de oxidación de  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$ .<sup>10</sup>

En el fuel oil, está presente otros metales y parte del  $V_2O_5$  puede formar sales de vanadatos, preferentemente con metales alcalinos y alcalinos térreos.

Los vanadatos de alcalino térreo poseen un punto de fusión elevado, del orden de  $1100^\circ\text{C}$ - $1200^\circ\text{C}$ , por lo general después de la combustión se encontrarán en estado sólido, en forma de polvo que luego son arrastrados por los gases. Los

---

<sup>11</sup> BORNSTEIN, N., & ROTH, H., & PIKE, R. (1993). *Vanadium corrosion studies*.

vanadatos alcalinos, principalmente los vanadatos de sodio presentan un punto de fusión bajo entre 350°C y 650°C por lo que en una zona del circuito de los gases se encuentran en estado líquido. Dichos vanadatos son muy reactivos con el hierro y óxidos de hierro, disolviéndolos para formar vanadatos o sulfovanadatos, sobre todo en presencia de sulfato sódico.<sup>12</sup>

La temperatura de fusión de los diferentes vanadatos sódicos que se forman, viene dado por la relación de los pesos moleculares  $V_2O_5 / Na_2O$  presente en la tabla 2.3.

Tabla 2. 3. Temperatura de fusión con relación al peso molecular.

| REL. $V_2O_5/Na_2O$ | Tª Fusión °C |
|---------------------|--------------|
| 0                   | 400          |
| 1                   | 550          |
| 2                   | 450          |
| 3                   | 350          |
| 4                   | 530          |
| 6                   | 580          |
| 8                   | 620          |
| 10                  | 640          |
| ∞                   | 690          |

Fuente: Tomada de BERTOMUE, Rb. (1997).

En el circuito de gases, existe gran probabilidad de encontrar vanadato sódico en estado líquido, sobre todo cuando la relación molar  $V_2O_5 / Na_2O$  es del orden de 3.

El desgaste corrosivo se acelera cuando los componentes del sistema alcanza la temperatura de fusión del depósito salino, el cual ejerce un acción fundamental sobre el óxido protector, dañando por disolución y favoreciendo el transporte de especies oxidantes hacia el metal e iones metálicos hacia la sal, propagando de forma acelerada la corrosión.<sup>12</sup>

---

<sup>12</sup> BERTOMUE, Rb. (1997). *El fuelóleo y sus efectos corrosivos en la combustión industrial*. España.

### **2.3.6. CORROSIÓN EN FRÍO**

La corrosión en frío presenta condiciones en la cual el proceso corrosivo se debe a la condensación de humedad, añadiendo la actividad de agentes contaminantes. La condensación se manifiesta debido a los cambios de temperaturas del aire, también teóricamente no es posible la condensación por cambio térmico, pero si puede hacerse por condensación capilar o química.<sup>6</sup>

La condensación capilar se produce en superficies porosas. Mientras que la condensación química se debe a los depósitos contaminantes de algunos productos corrosivos.

Las cantidades de dióxido de azufre que se origina de la combustión del crudo combustible con presencia del oxígeno sumada la humedad del ambiente, puede ser beneficiosa para remover los agentes contaminantes de la superficie, el dióxido de azufre se transforma en ácido sulfúrico, una reacción que es catalizada por el hierro, obteniendo como resultado picaduras en las carcasas de los turbocargadores. Generalmente existen partículas de carbón muy fino que son producto de una combustión incompleta, que tienden a absorber la humedad y provocar el proceso de corrosión.<sup>10</sup>

Las incrustaciones en el extremo frío también pueden tener su origen en un elevado contenido de azufre del petróleo acompañado por unas bajas temperaturas combinadas del extremo frío, al igual que la geometría de los componentes que sirven para almacenar estos depósitos y aumentar el proceso de corrosión en frío. Si se asume que todas las atmósferas están compuestas de una mezcla de oxígeno (20%) y nitrógeno (78%). Son los otros materiales presentes en la atmósfera que pueden variar considerablemente la velocidad de corrosión.<sup>9</sup>

### **2.3.7. CORROSIÓN LOCALIZADA POR PICADURA**

Luego de operar una determinada frecuencia de tiempo, el turbocargador del motor Wartsila de combustión interna se ve afectada por corrosión por picadura,



donde los residuos de la combustión del fuel-oíl se depositan en superficies donde la geometría facilita la degradación del material.

La corrosión por picadura suele ser debido al pH de la solución a bombear y de la cantidad de oxígeno, es decir mientras la cantidad de oxígeno es pobre, facilitará el proceso de corrosión. El pH es de 6.3, que se utiliza del crudo Napo de API 19.4. La alteración del material se obtiene de manera localizada, en las superficies críticas de las carcasas porque es donde se almacenan gran cantidad de los depósitos de los residuos de la combustión. Se cree que las picaduras comienzan en imperfecciones del material que se degradan de manera anódica, hasta que se acumulan en el fondo de la superficie iones metálicos.<sup>13</sup>

### **2.3.8. CORROSIÓN POR EROSIÓN**

La corrosión por erosión se debe al incremento de la velocidad de los gases de combustión que se da cuando las soluciones con un rápido flujo desprenden las capas adheridas y los depósitos, el ataque se dá en el material debido al movimiento relativo entre el fluido corrosivo y la superficie del material. La erosión se caracteriza por la aparición de estrías, canales, ondas, agujeros redondeaos que generalmente reciben un patrón direccional. Las turbulencias de los gases pueden destruir la capa de depósitos y causar grandes procesos corrosivos.<sup>13</sup>

---

<sup>13</sup> <http://blog.utp.edu.co/metalografia/2012/07/24/9-principios-de-corrosion/>

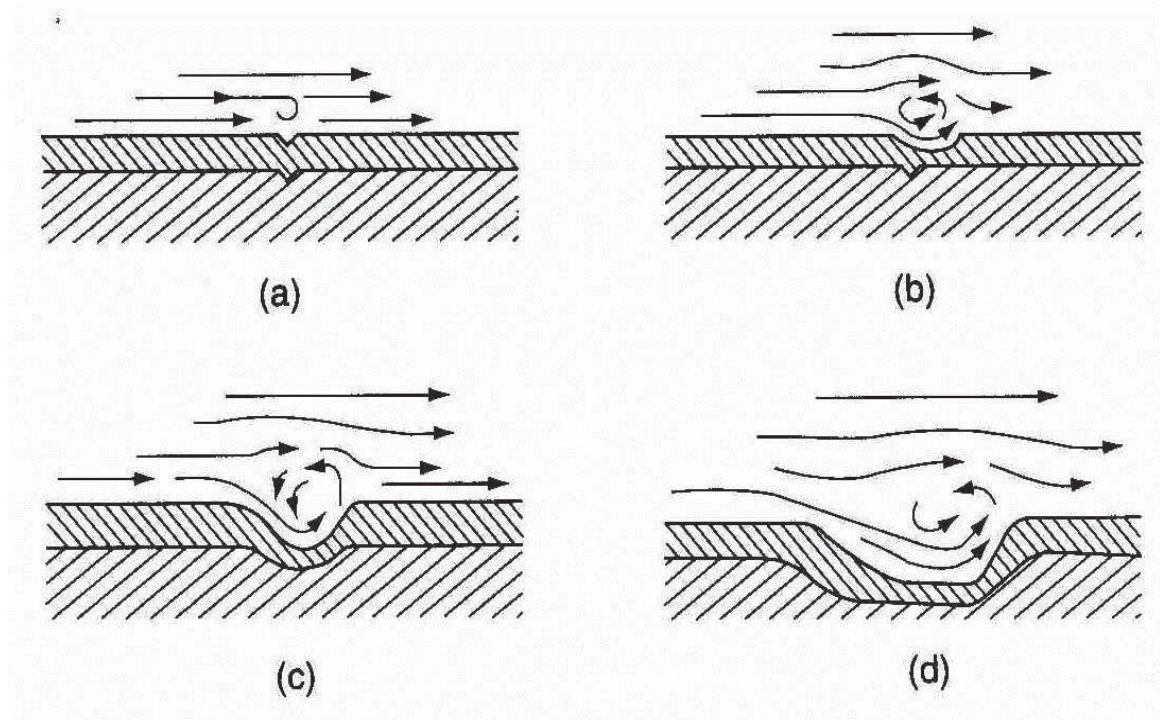


Figura 2. 4. Corrosión por picaduras en un sistema que funciona con crudo combustible.<sup>14</sup>

<sup>14</sup> <http://www.corrosionlab.com/papers/erosion-corrosion/erosion-corrosion.htm>

## 2.4. FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR WARTSILA 12V32 LN

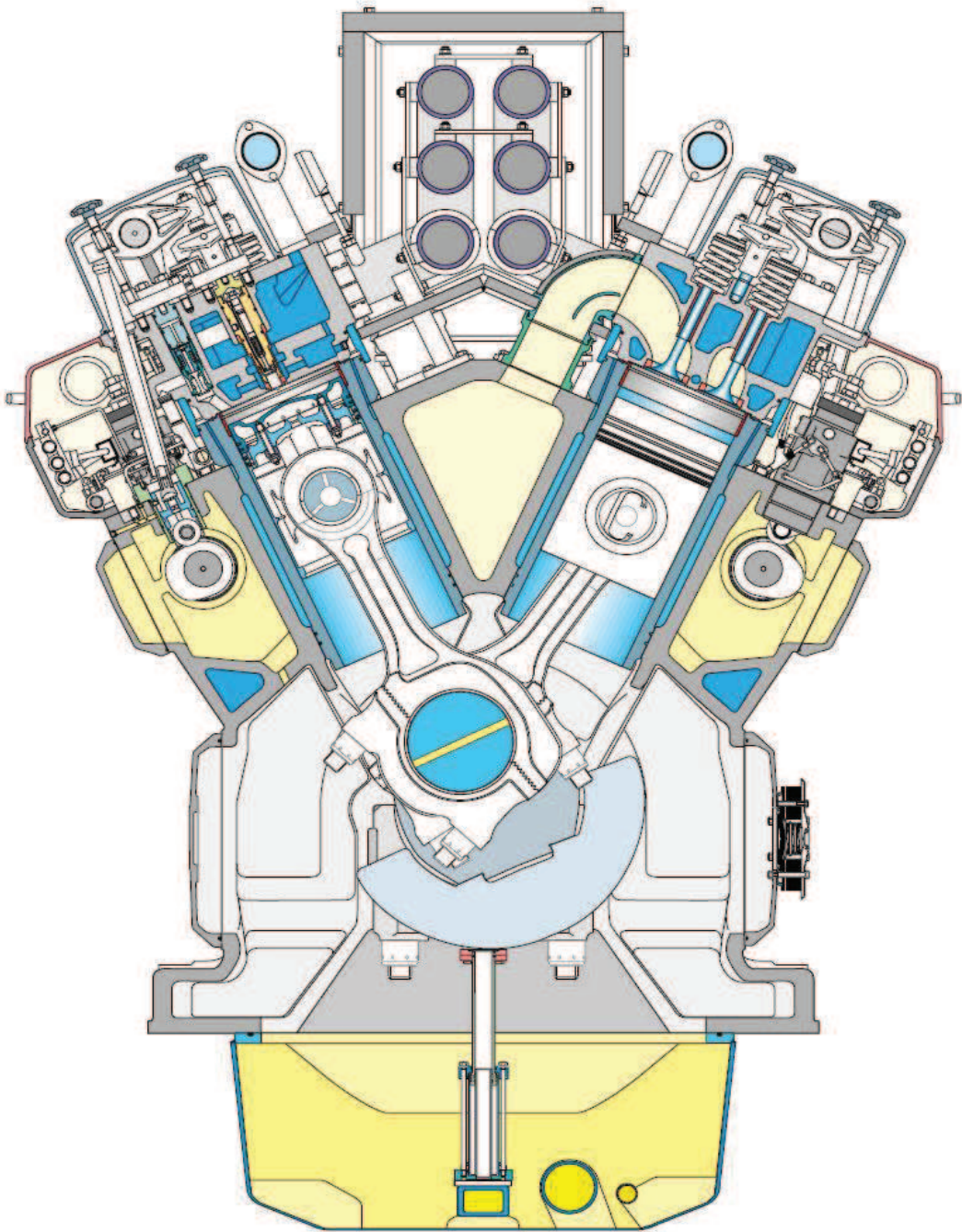


Figura 2. 5. Diseño y descripción del funcionamiento del motor Wartsila 12V32LN.<sup>15</sup>

<sup>15</sup> <http://www.wartsila.com/>

Es un motor diésel de 4 tiempos, que son sobrealimentados, refrigerados y de inyección directa. El motor está constituido de las siguientes partes:

El bloque del motor.- Es de una fundición de una sola pieza, donde los cojinetes principales se encuentran suspendidos. Las tapas de los cojinetes principales están sujetadas por dos tornillos, apretadas hidráulicamente y dos tornillos laterales.

La cámara de aire de carga está conformada en el bloque del motor, así como el colector del agua de refrigeración.

Las tapas del cárter son de metal ligero, se cierran herméticamente contra el bloque del motor por medio de juntas de goma. El colector de aceite llamado cárter está construido con chapa metálica.

Camisas del cilindro.- Son diseñados con una corona alta, taladrada para la refrigeración. Una optimización de la refrigeración proporciona una temperatura correcta en la superficie interior de la misma.

Cojinetes trimetálicos y bimetálicos.- Son totalmente intercambiables que pueden desmontarse descendiendo la tapa del cojinete. Cada cojinete va provisto de su gato hidráulico que facilita el montaje y desmontaje de los mismos.

Cigüeñal.- Es una sola pieza forjada y equilibrado por contrapesos.

Bielas.- Son forjadas por estampación, el extremo mayor esta seccionado y las superficies de unión son estriadas.

Pistones.- Se encuentran equipados con un sistema de lubricación de faldilla, las ranuras para los segmentos superiores están templadas, el aceite refrigerante se introduce en la cámara de refrigeración a través de la biela.

Juego de segmentos.- Están compuestos por tres segmentos de compresión cromados y un rascador también cromado y cargado por resorte.

Culata.- Constituido de acero fundido especial, que se fija por medio de cuatro tornillos apretados hidráulicamente. El diseño de la culata es de doble pared y el

agua de refrigeración es forzada desde la periferia hacia el centro, proporcionando una eficiente refrigeración en áreas importantes.

Válvulas de admisión.- Son recubiertas de estelita y vástagos cromados. Los aros de asiento de las válvulas son de una aleación de hierro fundido especial y recambiable totalmente.

Válvulas de escape.- Son con asientos recubiertos de estelita y vástagos cromados, estos hacen el cierre contra los anillos de asiento directamente refrigerados. Los anillos de asiento son de material resistente a la corrosión y picaduras, también son recambiables.

Árbol de levas.- Formado por piezas que integran las levas para cada cilindro. Los apoyos son piezas separadas y por consiguiente es posible su extracción de la leva del árbol es por el lado del costado.

Bombas de inyección.- Vienen incorporado el rodillo de accionamiento y normalmente pueden ser cambiadas sin ajuste. Las bombas y las tuberías están situadas en un espacio cerrado, aislado térmicamente para el funcionamiento con combustible pesado.

Turbocargadores.- Se encuentran situados en el extremo libre del motor, también pueden situarse en el extremo lado del volante. En el motor en V hay dos turbocargadores, uno para cada línea de cilindros. Los tubos de escape son de fundición nodular de aleación especial con secciones separadas para cada cilindro fijadas con abrazaderas. Compensadores metálicos del tipo de capas múltiples absorben la dilatación térmica.

Enfriadores de aire de carga.- Son fabricados con elementos insertables y desmontables, siendo dos en los motores en V, uno para cada línea de cilindros.

Sistema de aceite lubricante.- Incluye una bomba de engranes, filtro, enfriador con válvula termostática (pero no se presenta en motor con cilindros en V), filtro centrifugo en bypass y electro bomba de pre lubricación. El colector de aceite (cárter) esta dimensionado para el volumen total del aceite necesario, e

independientemente del número de cilindros, todos los motores puede funcionar con colector húmedo o bien seco.

Sistema de aire de arranque.- Es aquel que proporciona aire a los cilindros, la cual es controlada por un distribuidor accionado por el árbol de levas.<sup>16</sup>

## **2.5. CONDICIONES DE OPERACIÓN<sup>7</sup>**

Las condiciones de operación en el sistema de transporte de crudo son de mucha importancia en el estudio de la corrosión. Parámetros como la temperatura superficial externa de los turbocargadores, temperatura de los gases de combustión, presión, exceso de aire utilizado en la cámara de combustión son los que influyen en la rapidez del desgaste por corrosión.

### **2.5.1. TEMPERATURA**

El fenómeno por corrosión de cenizas del crudo, se produce cuando la temperatura de la superficie externa alcanza un nivel en el cual los depósitos de cenizas empiezan a fundirse. El valor de la temperatura no es fijo debido a la variación en la composición del contenido de pentóxido de vanadio en ceniza.

Con el incremento de temperatura en la superficie, aumentan las posibilidades para que los depósitos de las cenizas alcancen su punto de fusión. Una vez la sal fundida, la temperatura de la superficie seguirá aumentando, iniciando otros procesos corrosivos como la oxidación y la sulfidación. La formación de  $\text{SO}_3$  es un subproducto de la formación de los vanadatos de sodio.

---

<sup>16</sup> Manual de operación y mantenimiento del motor Wartsila 12V32.

### 2.5.2. TEMPERATURA DE GASES DE COMBUSTIÓN

La temperatura de los gases de combustión puede variar alrededor de 1650°C en el punto de llama, hasta 120°C o menor en diferentes puntos de la chimenea. Las elevadas temperaturas de los gases incrementa la velocidad de deposición de los vapores de  $V_2O_5$  y  $Na_2SO_4$ .<sup>5</sup>

### 2.5.3. EXCESO DE AIRE EN LA COMBUSTIÓN

El exceso de aire utilizado para la combustión es un factor crítico que ayuda a la corrosión por las cenizas del crudo, la corrosividad de los depósitos depende de la facilidad de absorber el oxígeno de los gases de combustión. Si se trabaja con excesos mínimos de aire, la corrosión por cenizas se haría insignificante, se debe a que la presión parcial del oxígeno previene la formación de vanadatos y favorece la formación de tetraóxido de vanadio  $V_2O_4$ , esta reacción tiene un punto de fusión alto.<sup>7</sup>

## 2.6. CARACTERÍSTICAS DEL COMBUSTIBLE<sup>15</sup>

El motor de gasóleo Wartsila ha sido diseñado y desarrollado para un funcionamiento continuo, sin reducción de potencia nominal. En la tabla 2.4 se presenta las siguientes propiedades del combustible.

La viscosidad.- Determina la complejidad del sistema de calentamiento y manipulación del combustible, dado que el HFO (Heavy Fuel Oil) ha de calentarse para alcanzar una viscosidad de 12.24 cSt en el punto de inyección. A menor viscosidad aumenta el flujo después del embolo en la bomba de inyección produciendo una disminución de la cantidad de combustible inyectado, en algunos casos podría impedir que se alcance la máxima potencia del motor.

La densidad.- Influye principalmente en la separación del combustible. Las separadoras pueden eliminar el agua y hasta cierto punto las partículas sólidas de los combustibles que tienen densidades de hasta  $991\text{kg/m}^3$  medidas a 15°C.

Tabla 2. 4. Características del combustible que se utiliza en el motor Wartsila.

| <b>CARACTERÍSTICAS DEL COMBUSTIBLE, LÍMITES MÁXIMOS</b> |                   |      |
|---|-------------------|------|
| Viscosidad cinemática                                   | cSt/100°C         | 55   |
|   | cSt/50°C          | 730  |
|   | Seg. RI/100°F     | 7200 |
| Viscosidad cinemática en la inyección, min              | cSt               | 2.8  |
| Densidad  | Kg/m <sup>3</sup> | 991  |
| Densidad 1  | Kg/m <sup>3</sup> | 1010 |
| Agua  | % en volumen      | 1    |
| Agua, máx., antes del motor                             | % en volumen      | 0.3  |
| Residuo de carbono                                      | % en masa         | 22   |
| Asfáltenos  | % en masa         | 14   |
| Punto de inflamación, Pensky-Martens, cerrado, min      | °C                | 60   |
| Punto de fluidez  | °C                | 30   |
| Potencial de sedimento                                  | % en masa         | 0.1  |

Fuente: Tomado del manual de operación y mantenimiento del motor Wartsila 12V32.

Baja calidad de encendido.- Cuando se tiene baja carga y al arrancar causará problemas de funcionamiento, especialmente si no se ha precalentado adecuadamente el motor. Además los largos retrasos en la ignición pueden provocar un rápido aumento de las presiones, esto incrementa la carga mecánica e incluso puede dañar gravemente los componentes del motor, como por ejemplo los segmentos del pistón y los cojinetes. También cabe esperar que se formen depósitos en la parte superior del pistón, en las válvulas de escape, en el sistema de escape, en el aro de la tobera y los alabes de la turbina. Las incrustaciones en el turbocompresor provocarán una disminución de la eficiencia del mismo y un aumento en la carga térmica, un mayor consumo de aceite lubricante y una mayor contaminación.

Contenido de agua.- El contenido de agua de los combustibles pesados varía mucho, el agua se procede de diferentes fuentes, la cual puede ser dulce o



salada, muchas veces procede de la condensación en los depósitos de petróleo en la instalación.

Residuos de carbono.- Pueden provocar la formación de depósitos en la cámara de combustión y en el sistema de escape, especialmente a cargas bajas. La formación de depósitos en las boquillas de las toberas altera la atomización del combustible y deformará los pulverizadores de combustible, lo cual disminuirá la eficiencia del proceso, incluso existirán cargas térmicas en algunos puntos.

Los depósitos en los alojamientos de las ranura del segmento y en los segmentos del pistón, impiden el movimiento provocando el paso de mayor cantidad de gases de combustión hacia la caja del cigüeñal, originando incrustaciones del aceite lubricante. Los depósitos en el sistema de escape y en el turbocompresor alteran el intercambio de gases y aumentará la carga térmica.

Contenido de asfáltenos.- Puede contribuir al contenido de depósitos en la cámara de combustión y en el sistema de escape, especialmente en cargas elevadas. Los asfáltenos son compuestos complejos y muy aromáticos con un elevado peso molecular, que suelen contener azufre, nitrógeno y oxígeno, así como vanadio, níquel y hierro.

Punto de inflamación.- Para el petróleo crudo se tiene alta presión de vapor y se aprecia un bajo punto de inflamación. No influirá en la combustión pero puede ser peligroso manipular y almacenar el combustible. Una elevada presión de vapor puede provocar cavitación y bolsas de gas en los tubos de combustible, para evitarlo se puede utilizar una presión elevada en el sistema de manipulación del combustible.

Punto de fluidez.- Indica a que temperatura el combustible deja de ser líquido y determina la facilidad con la que podrá manipularse el combustible.

Azufre.- El azufre en el combustible puede ocasionar corrosión y desgaste corrosivo, especialmente a cargas bajas. El azufre contribuye a la formación de depósitos en el sistema de escape, normalmente junto con el vanadio y/o sodio

en forma de sulfatos. Los depósitos también pueden provocar corrosión de alta temperatura.<sup>15</sup>

### **2.6.1. CONTENIDO DE CENIZA PARA EL MOTOR WARTSILA**

Contenido de ceniza.- El alto contenido de azufre puede ser perjudicial de varias formas:

Los óxidos de aluminio y silicona se originan durante el proceso de refinado y pueden provocar un desgaste abrasivo de las bombas y toberas de inyección, puede también afectar a las camisas y segmentos de pistón.

Los óxidos de vanadio y sodio, principalmente los vanadatos de sodio vanadio, se forman durante la combustión y se mezclan o reaccionan con óxidos y vanadatos de otros componentes de cenizas, ejemplo: níquel, calcio, silicona y el azufre. La temperatura de adherencia de la mezcla puede ser tal que se forman depósitos en una válvula, en el sistema de gases de escape o en el turbocargador. Este depósito es altamente corrosivo en estado fundido y destruye la capa protectora de óxido, por ejemplo en la válvula de escape lo cual provoca una corrosión en caliente. Los depósitos y la corrosión en caliente en el turbocargador, especialmente en el anillo de la tobera y en los álabes de la turbina provocan una disminución de la eficiencia del turbocompresor. Esto impide el intercambio de gas, consecuentemente disminuirá el flujo de aire que pasa por el motor y por tanto aumentará la carga térmica sobre el motor. Dicha formación de depósitos aumenta a mayores temperaturas.<sup>16</sup>

Para el motor Wartsila Vasa 32 se han definido cuatro tipos de combustible que son:

- HFO1: Combustible pesado de calidad normal

---

<sup>15</sup> <http://www.wartsila.com/>

<sup>16</sup> Manual de operación y mantenimiento del motor Wartsila 12V32.

- HFO2: Combustible pesado inferior a la calidad normal.
- DO: Gasóleo
- LFO: Combustible ligero
- GN: Gas natural.

En la tabla 2.4 se presenta las diferencias entre HFO1 y HFO2.

Tabla 2. 5. Diferencia entre HFO1 y HFO2.

| <b>CARACTERÍSTICAS DEL COMBUSTIBLE, LÍMITES MÁXIMOS</b> |           |       |           |
|---|-----------|-------|-----------|
|   |           | HFO 1 | HFO 2     |
| <b>AZUFRE</b>   | % en masa | 2.0   | 2.0-5.0   |
| <b>CENIZA</b>   | % en masa | 0.005 | 0.05-0.20 |
| <b>VANADIO</b>  | % en masa | 100   | 100-600   |
| <b>SODIO</b>  | % en masa | 20    | 20-50     |
| <b>AL+SI</b>  | % en masa | 30    | 30-80     |

Fuente: Tomado del manual de operación y mantenimiento del motor Wartsila 12V32.

## 2.7. ESTADO DEL ARTE

### 2.7.1. PÉRDIDA DEL MATERIAL EN VÁLVULAS DE ESCAPE QUE UTILIZA FUEL-OIL<sup>17</sup>

Se han realizado algunos estudios de corrosión, simulando en motores diésel con combustibles residuales, manejando un aparato de deposición de la corrosión como un aerosol de partículas sintéticas y alimentación de SO<sub>2</sub>. Este aparato simula las condiciones de un motor diésel que opera con combustible crudo pesado con alto contenido de azufre.

---

<sup>17</sup> JUSSI, L., & JORMA, J. (2004). *Corrosion studies with a new laboratory-scale system simulating large-scale diesel engines operating with residual fuels*. Finland: Wartsila & VASSA.

La combustión y la formación de partículas de cenizas, se han simulado con partículas sintéticas que se generaron con un aerosol. Cuando realizaron el ensayo se han encontrado áreas deterioradas con depósitos de corrosión que varía de 0  $\mu\text{m}$  con una temperatura de 700°C sin alimentación de cenizas sintéticas; y a 135  $\mu\text{m}$  con 750°C atacadas con partículas de cenizas sintéticas y con una alimentación de  $\text{SO}_2$  (g). En estas condiciones se encuentran unas islas negras con espesor alrededor de 3  $\mu\text{m}$ , con una precipitación rica en S, Cr y Ti, la cual indica sulfatación interna del material.

Se tiene una muestra de Nimonic 80A (válvula de escape), donde las temperaturas en la superficie del asiento de la válvula de escape del motor diésel son aproximadamente 500 °C, en cambio que en los motores que utilizan crudo combustible las temperaturas son alrededor de 700 °C a 800 °C. Los elementos de las cenizas principalmente contienen vanadio, sodio, níquel, magnesio, calcio, aluminio y silicio. El contenido de azufre en el combustible que está alrededor del 3% en peso. Estos elementos pueden formar depósitos de bajo punto de fusión que principalmente son de vanadylvanadato de sodio y sulfatos de sodio.

Los depósitos consisten principalmente en vanadatos de sodio fundido y no se encuentra sulfato de sodio por encima de una temperatura de 650 °C. Se propone un mecanismo en el que la capa de oxidación preformada comienza a disolverse en el depósito fundido o cerca de la superficie exterior del depósito, seguido por la precipitación de óxidos de vanadatos.

La corrosión en caliente a altas temperaturas, se han concentrado principalmente en sulfato de sodio, la cual afirma que se produce en diferentes metales o aleaciones, suponen que una fase fundida de protección se forma en la parte superior del óxido metálico. Los mecanismos de la corrosión en caliente implican el efecto simultáneo de compuestos de sodio y vanadio en condiciones del motor diésel, es decir alto en oxígeno y contenido de dióxido de azufre.

La corrosión de la aleación de Nimonic 80A presentó grietas en caliente, la cual se estudió con querosene dopado con 2.5 a 5% en peso de azufre, 10 a 40 ppm de sodio y vanadio. Concluyendo que a 600 °C, el querosene dopado con azufre reacciona con el cromo en la aleación para formar sulfuro de cromo y agotándose

el cromo. Sin embargo a temperaturas más altas de 700 °C, una función eutéctica se forma con el querosene dopado con azufre y el azufre no puede escapar a la atmósfera. Por lo tanto el mecanismo se convierte en autosuficiente.

En el querosene dopado con vanadio se han encontrado óxidos de nitrógeno (NiO), óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ),  $\text{Ni}(\text{VO}_3)_2$  y  $\text{NiO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ . La escala esponjosa fue causada por un ternario ( $\text{V}_2\text{O}_5$ - $\text{Cr}_2\text{O}_3$ -NiO), líquido eutéctico formado por la fusión local en la superficie de la aleación alrededor de 600 y 700 °C, también se encuentra que la concentración de vanadio en cierto nivel no aumento proporcionalmente a la cantidad de ataque del vanadio.

Como el  $\text{V}_2\text{O}_5$  puede disminuir a  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , se habla de corrosión en caliente debido a la formación de níquel  $\text{Ni}_3(\text{V}_4)_2$  y se argumenta con el aumento del nivel de azufre en el crudo combustible. Mientras se incrementa la actividad de  $\text{V}_2\text{O}_5$  en depósito de sal, la propagación de la corrosión en la interfase metal no implica necesariamente una fase líquida (sulfatos o sulfuros), pero el transporte de sólidos o de gases, hace que mejore la incorporación de trazas de vanadio en los granos de óxido.<sup>17</sup>(Anexo A).

### 2.7.2. TECNOLOGÍA DE LOS ADITIVOS PARA DIÉSEL Y FUEL OÍL

Los aditivos se basan en técnicas cuyo campo de acción se enfoca en el área química y de medio ambiente. Los aditivos para combustibles corresponden a formulaciones propias, fruto de una duradera investigación y desarrollo de varios años, los cuales se ajustan a los requerimientos de combustibles con características propias de viscosidad, %azufre, % vanadio, agua y otros.

Los aditivos se basan en una formulación química compleja que lo han definido como “Aditivos Organometálicos Integrales”, llevan este nombre porque pueden trabajar durante todo el proceso de combustión.

---

<sup>17</sup> JUSSI, L., & JORMA, J. (2004). *Corrosion studies with a new laboratory-scale system simulating large-scale diesel engines operating with residual fuels*. Finland: Wartsila & VASSA.

### 2.7.2.1. El efecto del aditivo en base de magnesio<sup>18</sup>

Para evitar la corrosión usando aditivos con base de magnesio, es posible utilizarlo en forma de sal orgánica soluble en los hidrocarburos, porque antes de la combustión, en el motor no aparece óxido de magnesio sólido, ni otro tipo de sólido derivado del aditivo que puedan producir daños a los componentes internos.

En el momento de la combustión la sal soluble de magnesio reacciona con los óxidos de vanadio formando sólidos de vanadatos de magnesio de alto punto de fusión superior a los 1000°C que no son corrosivos a las temperaturas internas de los gases del motor, el magnesio se integra en las moléculas de vanadatos que salen del motor junto con otros residuos sólidos productos de la combustión por ejemplo:  $MgV_2O_6$  o  $Mg_3V_2O_8$ . El resto de los componentes del aditivo se queman durante la combustión en el motor, generando gases residuales de  $CO_2$  y  $H_2O$ .

El efecto del MgO sobre la ceniza, es estabilizar el vanadio por reacción con los aniones ortovanadato  $(VO_4)_3$  para formar el  $NaMg_4(VO_4)_3$ , el cual disminuye fuertemente el efecto corrosivo; sin embargo, la sulfatación de una fracción de MgO promueve la compactación de las cenizas sobre el metal, lo que significa, que se requiere una frecuente limpieza del equipo.<sup>18</sup> (Anexo A)

### 2.7.2.2. Magnesio como solución a problemas de corrosión derivados de la combustión del fuel – oil

Una explicación es que el Mg como aditivo, en forma de MgO puede disminuir la formación de  $SO_3$  (g). En algunos casos es posible la formación de ácido sulfúrico cuando los gases de escape se enfrían por debajo de 150 °C. El ácido sulfúrico se puede condensar en pequeñas partículas primarias que crecen más y

---

<sup>18</sup> JUSSI, L., & JORMA, J. (2002). *The effect of Mg-based additive on aerosol characteristics in medium-speed diesel engines operating with residual fuel oils*. Finland: VTT.

eventualmente se vuelven más pegajosas. Las partículas se hacen menos adhesivas, disminuyendo así la aglomeración en los materiales; el Mg aumenta el punto de fusión de la ceniza y por lo tanto disminuye la sinterización.

En el caso del fuel-oíl con aditivo, las partículas parecen más de forma esferoidal aumentando el punto de fusión en los depósitos y hace que el arrastre de partículas sea más fácil y disminuye el tamaño de las partículas contaminantes. El Mg también puede mejorar los aromáticos pesados, hollín, carbono, en las partículas que actúan como un acelerador de la oxidación de carbono (catalizador), por tanto, permite que las partículas sólo puedan aglomerarse, pero no sinterizarse. Los aditivos de fuel-oíl ionizan en la llama y los iones que forman, disminuirán la tasa de nucleación y la coagulación, esto ayuda a la disminución del hollín. Los aditivos reaccionan de forma homogénea con los gases de la llama para producir radicales hidroxilo. Estos radicales pueden actuar como limpiadores de hollín e incrementar las reacciones de oxidación durante el proceso de combustión y para disminuir las partículas grandes sin quemar.<sup>18</sup>

### **2.7.2.3. Elementos constitutivos de los aditivos para fuel- oíl y diésel<sup>19</sup>**

Los elementos que deben incluir en el aditivo son los siguientes:

Homogeneizadores.- Son aquellos que ayudan a homogenizar el combustible y minimizar la sedimentación y estratificación, solubilizando los lodos orgánicos, además ayuda a dar mejor fluidez al combustible y menor viscosidad.

Promotores de combustión.- Estos compuestos ayudan a facilitar la combustión, incluyen compuestos que donan oxígeno, la misma que ayuda a la reacción entre el carbono del combustible y el oxígeno del aire.

---

<sup>19</sup> URPI, J. (2008). *Tecnología y margen de refine del petróleo*. Madrid. España.

Catalizadores de combustión.- Incluyen compuestos organometálicos que actúan como catalizadores de combustión, ayudan a incrementar el contacto de oxígeno del aire y el carbón del combustible, mejorando el proceso de combustión.

Inhibidores de corrosión.- Se incluyen compuestos organometálicos que disminuyen los compuestos de bajo punto de fusión tales como los vanadatos que cuando están fundidas causan corrosión en caliente luego de la combustión. La formación de  $\text{SO}_3$  a  $\text{SO}_2$ , es catalizada por compuestos tales como las sales de vanadio, la acción de los inhibidores de corrosión disminuirá la formación de ácido sulfúrico, estos son aplicados para fuel oíl y crudo especialmente con alta presencia de azufre y vanadio.

Emulsificante.- Incluye la acción de un encapsulador de agua presente en el combustible para disminuir los efectos de abrasión y corrosión.



## **CAPÍTULO 3**

### **PARTE EXPERIMENTAL**

#### **3.1. INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se desarrolla un análisis de los problemas de corrosión que se presentan en los motores Wartsila 12V32 de los equipos de la organización.

Para el estudio se realiza los siguientes ensayos: difracción de rayos X, espectrometría de chispa, análisis semicuantitativo en sólidos y análisis metalográficos; estos análisis fueron realizados en los laboratorios de metalografía, laboratorio químico y mineralogía de la Escuela Politécnica Nacional Del Ecuador.

#### **3.2. SECUENCIAS DE FASE**

Los equipos principales de las estaciones de bombeo funcionan aproximadamente 2000 horas al año.

Se extrae muestras de diferentes estaciones de bombeo de la organización, empezando desde: PS1 Amazonas, pasando PS2 Cayagama, PS3 Sardinias y por último PS4 Páramo.

Con todas las muestras suministradas para el estudio, se utiliza los laboratorios de metalografía, para determinar las estructuras y la matriz que posee cada material que ha fallado.

Las muestras llegan primeramente al departamento de metalografía para realizar la recepción de probetas, las cuales se receptan en el siguiente orden:

De la estación Amazonas (PS1) se obtiene los depósitos de la salida de los gases de escape del turbocargador del generador de energía eléctrica Wartsila D-0101. También una válvula de escape de la unidad principal D-0101D.

Durante el mantenimiento de 24000 horas en la estación de Cayagama (PS2) se adquiere las siguientes muestras:

Once toberas de inyección de combustible con refrigeración del motor D-0201C con 180 horas de funcionamiento. Del motor D-0201D, se extrae las toberas de inyección de combustible sin refrigeración, con 5000 horas de funcionamiento aproximadamente.

De la estación Sardinias (PS3), se envía toberas sin refrigeración de los inyectores de combustible que tenían alrededor de 4000 horas de funcionamiento. Estas toberas son del motor D-0301F.

De la estación Páramo (PS4) se obtiene un anillo de seguridad de los álabes de los turbocargadores o llamado dumping wire del motor D-0401C.

También se encuentra una válvula de escape del equipo principal D-0401F que presentaba carbonilla en sus asientos.

En los equipos principales y generadores de energía de las estaciones de bombeo, las carcasas de los turbocargadores presentan desgaste interno y corrosión, lo cual por su elevado costo de reemplazo, se realizó un previo estudio de una carcasa que presenta un orificio.

### **3.3. TRABAJO DE CAMPO**

En el laboratorio de metalografía se utiliza las siguientes probetas para análisis, las cuales se describe en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1. Componentes del motor Wartsila 12V32LN.

| ESTACIÓN | EQUIPO  | DESCRIPCIÓN                       | CANTIDAD | OBSERVACIONES                                 |
|----------|---------|-----------------------------------|----------|---|
| PS1      | D-0101D | VÁVULA NO PICADA                  | 1        | 30000 HORAS DE FUNCIONAMIENTO                 |
| PS2      | D-0201B | TOBERAS REFRIGERADAS              | 11       | 2000 A 3000 HORAS DE FUNCIONAMIENTO           |
| PS2      | D-0201B | DEPÓSITOS DEL TURBO BANCO B       | 1        | ALMACENADAS EN LAS CHIMENEAS                  |
| PS2      | D-0201D | TOBERAS SIN REFRIGERACIÓN         | 5        | 4000 HORAS DE FUNCIONAMIENTO                  |
| PS4      | D-0401C | ANILLO DE LOS ÁLABES DE SEGURIDAD | 1        | 20000 HORAS DE FUNCIONAMIENTO APROXIMADAMENTE |
| PS4      | D-0401F | VÁVULA PICADA EN EL ASIENTO       | 1        | 21000 HORAS DE FUNCIONAMIENTO                 |

Elaboración Propia.



Figura 3. 1. Recepción de las válvulas de las estaciones de Amazonas (PS1) y Páramo (PS4).



Figura 3. 2. Recepción de toberas refrigeradas del equipo D-0201B de Cayagama (PS2).



Figura 3. 3. Recepción de las toberas sin refrigerar del equipo D-0201D de la estación Cayagama (PS2).



Figura 3. 4. Recepción del Dumping Wire de la estación de Paramo (PS4).

### 3.3.1. CARACTERÍSTICAS DEL COMBUSTIBLE CRUDO- NAPO

En la tabla 3.2, indica la cantidad de elementos que contiene el crudo combustible, que trabaja los motores Wartsila en las instalaciones de bombeo de OCP. (Anexo B)

Tabla 3. 2. Sustancias del combustible Crudo – Napo.

| <b>PRUEBAS</b>          | <b>UNIDAD</b> | <b>RESULTADOS</b> |
|-------------------------|---------------|-------------------|
| Contenido de sales      | Lbs./100bbbls | 20                |
| Contenido de nitrógeno  | ppm Wt.       | 4434              |
| Nitrógeno básico        | Ppm           | 1010              |
| Contenido de calcio     | Ppm           | 4.8               |
| Contenido de cobre      | ppm Wt.       | < 0.1             |
| Contenido de hierro     | Ppm           | 4.2               |
| Contenido de magnesio   | Ppm           | 0.2               |
| Contenido de níquel     | ppm Wt.       | 128               |
| Contenido de sodio      | Ppm           | 30                |
| Contenido de vanadio    | Ppm           | 375               |
| Contenido de asfaltenos | Wt.           | 9.6               |
| Número total de ácido   | mg KOH/g      | < 0.05            |
| Contenido de aluminio   | mg/kg         | 7                 |
| Contenido de silicio    | mg/kg         | 1                 |

Elaboración Propia.

### **3.4. MÉTODOS Y TÉCNICAS DE ANÁLISIS**

#### **3.4.1. ENSAYOS METALOGRAFICOS**

La preparación de las muestras fué realizado de acuerdo a la norma ASTM E407-07. El ensayo metalográfico se direcciona en el estudio por microscopia óptica, con el objetivo de encontrar las características estructurales de los materiales metálicos o aleaciones, continuamente relacionando sus propiedades mecánicas y físicas con la interpretación de la microestructura.

#### **3.4.2. ANÁLISIS METALOGRAFICOS**

El análisis metalográfico es una técnica óptica, realizados en superficies transversales para observar en todas la probetas las características microestructurales, previamente realizada la preparación metalográfica. En este análisis se encuentra imperfecciones tales como: grietas, poros y en la mayoría de los casos imperfecciones en el material.

#### **3.4.3. MICROSCOPIA ÓPTICA**

En la microscopia óptica indica información básica de la estructura del material, estructura atómica y por tanto sus propiedades. Un material que refleje la luz con un brillo apagado, indica el carácter metálico del mismo. Si sobre un material plano se levanta flejes o laminas delgadas con facilidad, se tiene una estructura diferente. En la inspección con microscopio, las discontinuidades que presentan son, desgaste por corrosión con pérdida de material, grietas, inclusiones, poros y precipitados en el material.

Mediante el análisis de microestructura se puede ver si los elementos mecánicos sufrieron algún tipo de desgaste por lo cual llega a la falla, previamente relacionada con las especificaciones de calidad.

#### **3.4.4. PROBETAS ANALIZADAS**

Para el estudio metalográfico se realiza cortes transversales y longitudinales a las válvulas de escape, metalografía transversal a las toberas inyectoras refrigeradas y sin refrigerar y un análisis metalográfico en la zona de fractura del anillo de seguridad.

#### **3.4.5. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS METALGRÁFICAS**

##### **3.4.5.1. Extracción de las muestras**

Se extrae las muestras que resalten los problemas estructurales del material como pueden ser bordes o esquinas agudas que es donde se presenta el desgaste, teniendo en cuenta las dimensiones que faciliten la fotografía de la microestructura en el microscopio óptico.

Seleccionada la sección de la probeta, se procede al corte con las dimensiones preestablecidas con un disco de corte de diamante. El proceso de corte se debe realizar de manera uniforme y refrigerada continuamente con agua, debido a que las probetas son de materiales muy duros y resistentes a altas temperaturas. El corte efectuado es de forma transversal y en casos necesarios se realiza de forma longitudinal.

##### **3.4.5.2. Desbaste grueso**

Después del corte efectuado con las dimensiones correspondientes a la válvula de escape y a las toberas de inyección de combustible, se continúa con el desbaste grueso que tiene el objetivo de tener superficies planas y en algunos casos superficies paralelas, también eliminar las imperfecciones que se produjo por el proceso de corte. Para el desbaste grueso se utiliza la lija número 80 y 100 granos/pulgada, donde se ubica en un disco giratorio y que éste a su vez se encuentra acoplado a la máquina de desbaste. Durante el proceso de desbaste se refrigera con agua.



#### **3.4.5.3. Desbaste fino**

Para este proceso se utiliza varias lijas de diferentes números como: 240, 320, 400, 600 granos/pulgada, este proceso se reduce las imperfecciones producidas por el desbaste grueso. El desbaste fino tiene una secuencia, la cual permite desbastar la misma superficie para análisis, girando en 90°, 180°, 270° y finalizando en 360°.

#### **3.4.5.4. Pulido fino**

En este proceso final, la muestra se hace girar en sentido contrario de la pulidora con paño y con carga reducida constante, aplicando alúmina de 0.3 micrón como abrasivo y en suspensión de agua, con este proceso se elimina las llamadas colas de cometa y obtener una muestra con superficie brillante y libre de marcas. Una vez terminado el proceso de pulido fino, se puede observar la microestructura.

#### **3.4.5.5. Montaje de la muestras**

Para el análisis de la microestructura del anillo de los álabes de seguridad se procede al montaje en un material o encapsulamiento de resina de poliéster en la cual se utiliza un catalizador y un endurecedor, metil cetona y octoato de cobalto, que es endurecida en frío, por lo general sus dimensiones son de 25 a 35 mm de diámetro, con una altura de 15 mm, estas dimensiones hacen que facilite los procesos de desbaste y pulidos.

#### **3.4.5.6. Ataque del material**

Antes de hacer la metalografía a las muestras, se realiza un ataque al material, el mismo que consiste en utilizar un agente químico que reaccione con la superficie a examinar, este proceso es importante en el análisis ya que si se aplica el agente adecuado para observar las características del material, este agente varía según el material y sus características. En el macro ataque se utiliza Nital al 10%, donde el Nital es igual a Ácido Nítrico + Alcohol al 99.5 % de pureza, en el mercado se lo conoce como alcohol industrial.

### 3.5. EQUIPOS UTILIZADOS EN LA PREPARACIÓN DE MUESTRAS METALGRÁFICAS<sup>20</sup>

#### 3.5.1. DESBASTE GRUESO

Para el proceso de desbaste grueso, se utilizó un equipo que se describe con las especificaciones técnicas en la tabla 3.3.

Tabla 3. 3. Especificaciones técnicas de la desbastadora de disco.

|  |                                   |                         |
|--|-----------------------------------|-------------------------|
|  | EQUIPO                            | DESBASTADORA DE DISCO   |
|  | MARCA                             | BUEHELER                |
|  | MODELO                            | 121-OM-84               |
|  | MOTOR ELECTRICO (HP)              | 1                       |
|  | VOLTAJE (V)                       | 110                     |
|  | MATERIAL ABRASIVO (grano/pulgada) | Lija # 80<br>Lija # 100 |
|  | SISTEMA DE ENFRIAMIENTO           | AGUA                    |

#### 3.5.2. DESBASTE FINO

La tabla 3.4, indica sus especificaciones técnicas del equipo, para el proceso de desbaste fino.

Tabla 3. 4. Especificaciones técnicas de la devastadora fina.

|   |                                   |  |
|---|-----------------------------------|--|
|  | EQUIPO                            | BANCOS DE PULIDA                                     |
|   | MARCA                             | BUEHELER   |
|   | MODELO                            | 39-1470-AB   |
|   | SISTEMA                           | MANUAL   |
|   | MATERIAL ABRASIVO (grano/pulgada) | Lija # 240<br>Lija # 320<br>Lija # 400<br>Lija # 600 |
|   | SISTEMA DE ENFRIAMIENTO           | AGUA   |

<sup>20</sup> CUBILLOS, L. & MERA, J. (2012). *Desarrollo de estándares de calidad en producción de recubrimiento por termorociado de acero eléctrico y HVOF en la empresa IMETCA*. Quito Ecuador.

### 3.5.3. PULIDO FINO

El equipo de pulido fino, tiene las siguientes especificaciones técnicas descrito en la tabla 3.5.

Tabla 3. 5. Especificaciones técnicas de la pulidora de paño.

|  |                                   |  |
|--|-----------------------------------|--|
|  | EQUIPO                            | PULIDORA DE PAÑO   |
|  | MARCA                             | BUEHELER   |
|  | MODELO                            | 115-RM-1850  |
|  | MOTOR ELECTRICO (HP)              | 1  |
|  | VOLTAJE (V)                       | 110  |
|  | SISTEMA                           | MANUAL   |
|  | MATERIAL ABRASIVO (grano/pulgada) | Pulido Grueso:<br>Alumina de 1 micrón<br>Pulido Fino:<br>Alumina de 0,3 micrón |
|  | SISTEMA DE ENFRIAMIENTO           | AGUA   |

Fuente: Tomado de CUBILLOS, L. & MERA, J. (2012).

### 3.5.4. EQUIPO DE ENSAYO METALOGRAFICO

Tabla 3. 6. Especificaciones técnicas del microscopio metalográfico.

|   |                        |                                      |
|---|------------------------|--------------------------------------|
|  | EQUIPO:                | Microscopio Metalográfico Invertido  |
|   | MARCA:                 | MEIJI                                |
|   | MODELO:                | IM 7200                              |
|   | CABEZAL:               | Trinocular                           |
|   | TIPO:                  | Brightfield                          |
|   | LENTE:                 | SWH 10x FN22                         |
|   | OBJETIVO:              | Cromáticos                           |
|   | LENTE:                 | E50x, E100x, E200x<br>E500x          |
|   | CAMPO:                 | Fijo plano de 18mmx245mm             |
|   | ILUMUNCACION:          | Vertical KOEHLER 6V,<br>30W halógena |
|   | SOFTWARE METALOGRAFICO | Pax-it                               |

Fuente: Tomado de CUBILLOS, L. & MERA, J. (2012).

### 3.6. ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL

La dureza es la propiedad de la capa superficial de un material de resistir la deformación elástica plástica en presencia de esfuerzos de contacto locales inferidos por otro material más duro, el cual no sufre deformaciones como el indentador o penetrador, de determinada forma y dimensiones. El método Rockwell define como un número arbitrario, que es inversamente proporcional a la penetración del indentador.

El estándar ASTM E18-03, define el número de dureza Rockwell como un número derivado del incremento neto de la profundidad del indentador, cuando la fuerza en el indentador es incrementada desde una fuerza previa hasta una fuerza total y luego retorna al valor de fuerza previa.<sup>21</sup>

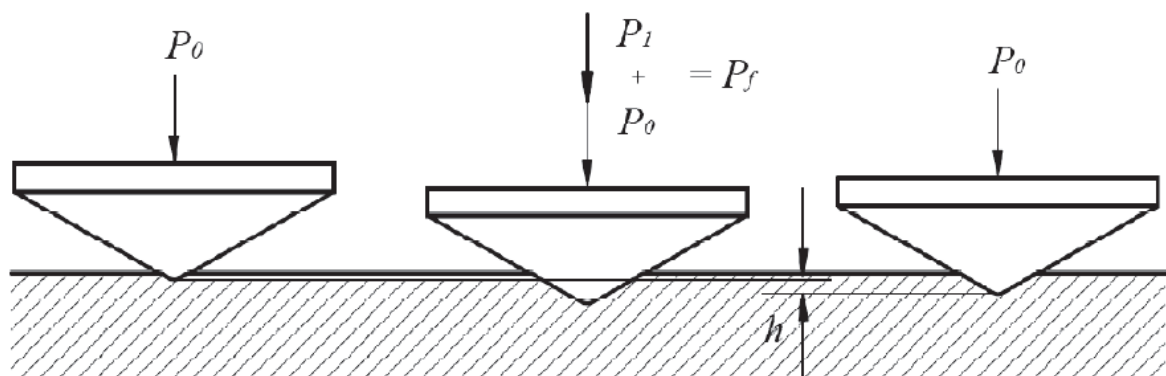


Figura 3. 5. Incremento de la fuerza previa hasta la fuerza total.<sup>21</sup>

Cuando se aplica una carga principal, el aumento de la carga hasta un valor límite debe ser lento y de forma uniforme. El objetivo es determinar la dureza del elemento mecánico con una carga. La carga total se mantiene hasta que la aguja del dial indicador se estabilice.

<sup>21</sup> <http://www.utp.edu.co/~gcalles/Contenidos/DurezaHR.htm>

Para leer el valor de dureza en la escala B, se ve directamente en la escala roja del dial que se encuentra en la parte superior interna del equipo.

### 3.6.1. EQUIPO UTILIZADO EN EL ENSAYO DE DUREZA

Equipo de ensayo de dureza del laboratorio de metalografía, con sus especificaciones técnicas descritas en la tabla 3.7.

Tabla 3. 7. Especificaciones técnicas del durómetro.

|  |                      |                        |
|--|----------------------|------------------------|
|  | EQUIPO               | DURÓMETRO              |
|  | MARCA                | HARDROCKER             |
|  | CARGA MÍNIMA         | 10 kgf                 |
|  | CARGA MÁXIMA         | 150 kgf                |
|  | DISPLAY              | ANÁLOGO                |
|  | ESCALA               | B                      |
|  | APLICACIÓN DE FUERZA | AMORTIGUADO HIDRÁULICO |
|  | INDENTADOR           | ACERO TEMPLADO         |
|  | CAPACIDAD VERTICAL   | 6,7 plg                |

Elaboración Propia.

#### 3.6.1.1. Procedimiento de utilización del durómetro

- a. Se debe seleccionar la escala deseada girando la perilla del lado derecho del durómetro en sentido horario. (Rockwell A, B o C). Para este estudio, se utiliza la escala C para medir durezas en las toberas refrigeradas y sin refrigerar, porque sus microestructuras son martensíticas, igual que en las válvulas de escape; la escala B utilizamos para medir dureza en las carcasas de los turbocargadores.
- b. Se coloca el indentador adecuado, dependiendo de la escala, en el durómetro.

- c. La probeta debe ser desbastada de tal manera que presente dos superficies planas paralelas; se coloca la probeta bajo el indentador en el soporte.



Figura 3. 6. Posicionamiento del indentador sobre la superficie a medir.

- d. Se gira la perilla horizontal, en sentido horario, para que la probeta ascienda lentamente hasta que tope la punta del indentador.
- e. Se gira el marcador para que la aguja marque cero en la escala.



Figura 3. 7. Lectura de dureza en la escala Rockwell B, Rockwell C.

- f. Se gira nuevamente la perilla horizontal, por lo general la aguja de color negro realiza tres vueltas completas en el marcador, hasta llegar al numeral cero.
- g. Se gira la manilla lateral derecha, para poder cargar la muestra.
- h. Se espera hasta que la aguja del marcador quede fija.
- i. Se regresa la manilla lateral lentamente a la marca de descarga.
- j. Se toma el valor de la lectura de dureza en la escala del marcador.

### **3.7. ANÁLISIS QUÍMICO**

#### **3.7.1. ENSAYO DE COMPOSICIÓN QUÍMICA**

El ensayo químico tiene como finalidad estudiar la composición química de un material o muestra, mediante diferentes métodos como: química analítica cuantitativa y química analítica cualitativa. Estas técnicas se emplean para determinar la composición química de un material, es decir, es conocer qué sustancias y en qué cantidad componen un determinado material. El análisis químico cualitativo, trata del reconocimiento de las especies: compuestos, moléculas, iones o átomos, que se encuentran en una muestra. El análisis cuantitativo determina en forma numérica la cantidad relativa de las especies que componen la muestra.

#### **3.7.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)**

El MEB utiliza las señales que emergen de la superficie de la muestra cuando el haz eléctrico impacta e interacciona con ella. Estas señales se producen cuando el haz electrónico es enfocado sobre un área muy pequeña de la muestra por medio de lentes condensadores.

Una de las señales de gran importancia para el MEB son los electrones secundarios y retrodispersados, ya que proporcionan información sobre un punto en particular. La composición química de la muestra que se obtiene por medio de rayos X característicos de cada elemento y también pueden realizar análisis como

el mapeo y el barrido en línea. Se puede determinar la cantidad y el tipo de elementos que se encuentran presente en la muestra.

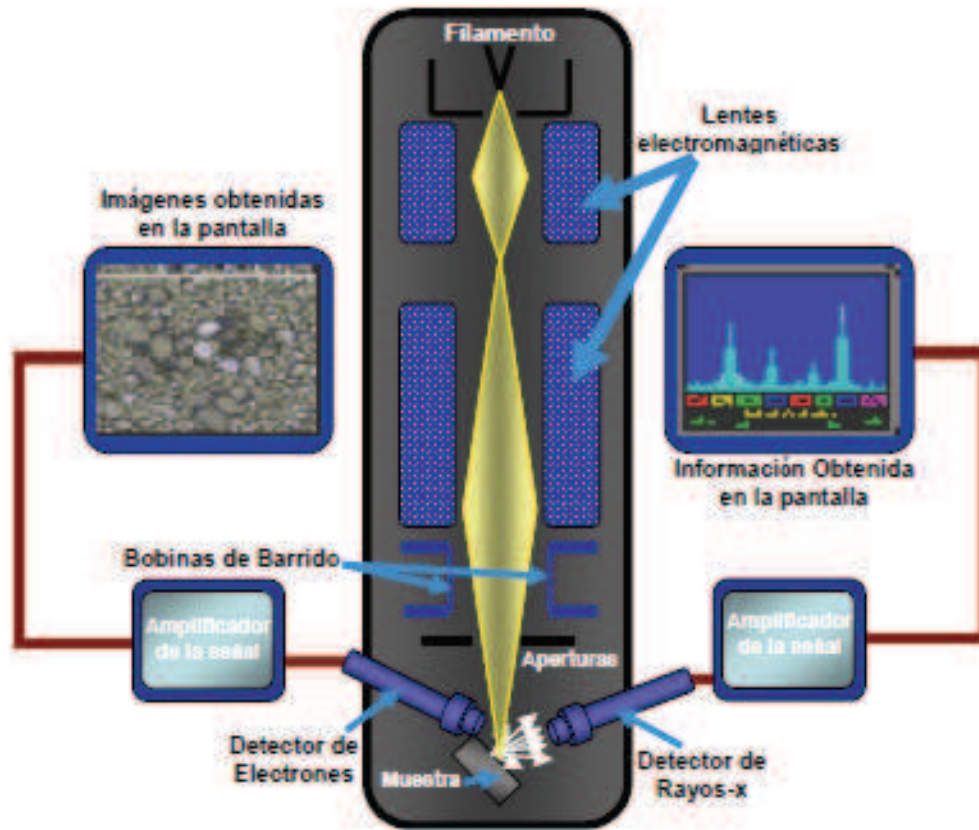


Figura 3. 8. Esquema de funcionamiento de MEB.<sup>22</sup>

**Detector de electrones secundarios (SE).**- Es el que ofrece la típica imagen en blanco y negro de la topografía de la superficie examinada. Es la señal más adecuada para la observación de la muestra por ser la de mayor resolución.

**Detector de rayos X (EDS).**- Es el que recibe los rayos X procedentes de cada uno de los puntos de la superficie sobre los que pasa el haz de electrones. Como la energía de cada rayo X es característica de cada elemento.

<sup>22</sup> ESTRADA, J. (2008). *Caracterización estructural y morfología de películas delgadas de TiO<sub>2</sub> depositadas por RF-SPURTTING sobre acero inoxidable 304*. Altamira Tamaulipas.



Esta técnica es muy versátil por su capacidad de amplificación, en muchos de los casos es superior a los 10000 de aumento, con la facilidad de producir imágenes tridimensionales.<sup>22</sup>

### 3.7.2.1. Equipo utilizado en la microscopia electrónica de barrido (MEB)

La tabla 3.8, indica las especificaciones técnicas del equipo de microscopia electrónica de barrido, utilizada en el laboratorio del departamento DEMEX, de la Escuela Politécnica Nacional.

Tabla 3. 8. Especificaciones técnicas del equipo de MEB.

|  |                        |                                    |
|--|------------------------|------------------------------------|
|  | <b>EQUIPO</b>          | Microscopio Electrónico de Barrido |
|  | <b>MARCA</b>           | TESCAN                             |
|  | <b>MODELO</b>          | VEGA                               |
|  | <b>MAGNIFICACIÓN</b>   | 100X 200X 500X                     |
|  | <b>MICROANALIZADOR</b> | Rayos X BRUKER                     |
|  | <b>SOFTWARE</b>        | ESPIRIT 1.8.                       |
|  | <b>COMPUERTA</b>       | Neumática                          |
|  | <b>PROBETAS</b>        | 2cm *2cm                           |
|  | <b>PORTA MUESTRAS</b>  | Aluminio                           |
|  | <b>HV</b>              | 15.0KV- 20.0 KV                    |

Elaboración Propia.

### 3.7.2.2. Procedimiento de la microscopia electrónica de barrido

Después de concluir con los pulidos gruesos y finos en corte transversal, se hace una limpieza con ultrasonido para tratar de desprender todo tipo de partícula aledaña que pueda afectar al equipo de MEB y los análisis que se obtenga del mismo.

La muestra debe tener una medida de 2cm por 2cm para luego colocar en un portamuestras de aluminio, lo cual favorece la conducción eléctrica y evita el exceso de carga a la muestra producido por el bombardeo de los electrones. Luego se introduce la muestra al interior de una cámara de vacío y es asegurada con una compuerta a presión para garantizar el 100% la conductividad, además el

equipo cuenta con un sistema de análisis elemental que permite identificar y cuantificar los elementos presentes en las muestras.

### **3.7.3. ANÁLISIS QUÍMICO POR ESPECTROMETRÍA DE EMISIÓN ÓPTICA O DE CHISPA**

El espectroscopio es un instrumento que sirve para identificar las propiedades de la luz en una determinada porción del espectro electromagnético. La variable que se mide es la intensidad luminosa, se puede medir el estado de polarización electromagnética. Los espectrómetros se utilizan para producir líneas espectrales y medir sus longitudes de onda e intensidades.


El análisis determina la cantidad y concentración de los elementos que contiene el material ensayado. El equipo que se utiliza para tomar las medidas es un espectroscopio o espectrógrafo. Este tipo de análisis determina los porcentajes de cada elemento presente en una muestra. La característica de este método es detectar las longitudes de onda de cada elemento, cuando sus electrones son excitados mediante una chispa.

Para obtener los porcentajes de composición en el material se utiliza las muestras de corte transversal alrededor de 2 cm de longitud. Es importante que las superficies no tengan irregularidades, para que la chispa a ser lanzada tenga contacto con gran superficie y así obtener una lectura garantizada.

#### **3.7.3.1. Equipo utilizado en el análisis químico de emisión óptica por chispa**

En la tabla 3.9, se presenta las especificaciones técnicas del equipó de emisión óptica por chispa, que se utilizó en las toberas de inyección de combustible y en la válvula de escape que presenta pérdida de material. Este equipo se encuentra en el departamento del DEMEX de la Escuela Politécnica Nacional.

Tabla 3. 9. Especificaciones técnicas del Espectrómetro de emisión por chispa.

|   |                     |  |
|---|---------------------|--|
|  | EQUIPO              | Espectrometro De Emisión Óptica Por Chispa |
|   | MARCA               | Bruker                                     |
|   | MODELO              | Q4T4ZMAN                                   |
|   | FUENTE              | 110 V                                      |
|   | PROBETAS            | 4cm*4cm                                    |
|   | ESPESOR DE PROBETAS | 2cm  |

Elaboración Propia.

### 3.7.3.2. Procedimiento del análisis químico de emisión óptica por chispa

Se utiliza el método de espectrometría de chispa, para el análisis de elementos metálicos en muestras sólidas. El arco eléctrico o chispa pasa por la muestra, calentándola a alta temperatura para excitar los átomos. Los átomos excitados emiten luz en varias longitudes de onda que pueden ser detectados con el espectroscopio.

Las condiciones que producen la emisión por chispa no son controladas cuantitativamente, por lo tanto el análisis es cualitativo. Entonces se presentan valores porcentuales de los elementos detectados en las muestras de ensayo.

Para el análisis se utiliza muestras de la válvula con pérdida de material, las toberas refrigeradas y sin refrigerar, de 8cm de longitud con espesores de 5mm hasta de 10mm.

### 3.7.4. ENSAYO DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X<sup>20</sup>

La difracción es una técnica que consiste en hacer pasar un haz de rayos X a través de un cristal de la sustancia sujeta a estudio. El haz se incide en varias direcciones debido a la simetría de la agrupación de los átomos, mediante la cual

<sup>20</sup> CUBILLOS, L. & MERA, J. (2012). *Desarrollo de estándares de calidad en producción de recubrimiento por termorociado de acero eléctrico y HVOF en la empresa IMETCA*. Quito Ecuador.

dé lugar a un patrón de intensidades que pueden interpretarse según la ubicación de los átomos en el elemento cristalino. La información que proporciona el difractograma de rayos X obtenidos de la muestra en estudio, es la estructura cristalográfica, tal como el parámetro de red, celda unitaria y grupo cristalográfico, siempre que sea cristalina.

Si se irradia un material con rayos X, los rayos dispersados tienen relaciones de fases definidas, como consecuencia de la correlación de las posiciones atómicas a lo largo del volumen de un cristal. Esto produce interferencia en la mayoría de direcciones, lo que se obtiene son curvas de intensidad de radiación difractada con presencia de picos agudos para ciertos ángulos.

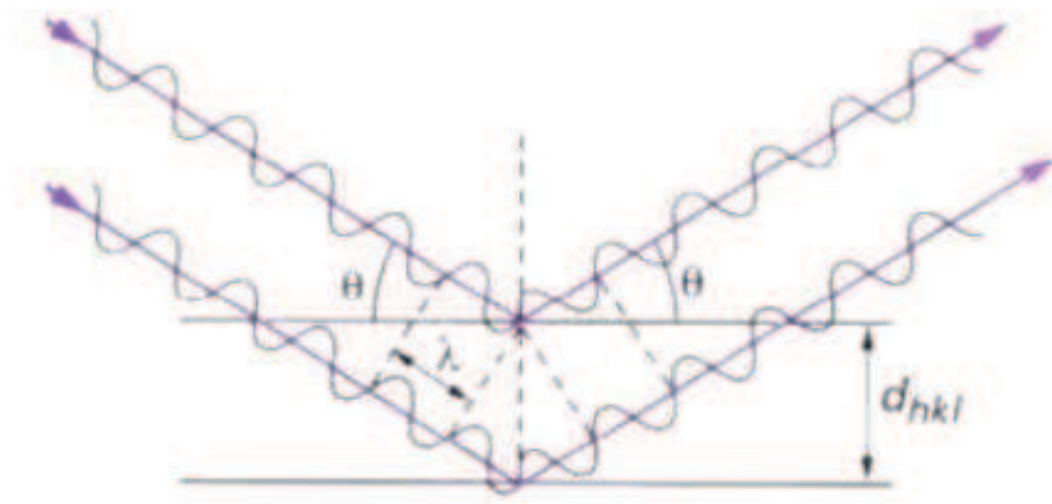



Figura 3. 9. Difracción de los Rayos X.<sup>20</sup>

#### 3.7.4.1. Equipo utilizado en el ensayo de difracción de rayos X

En la tabla 3.10, se presenta las especificaciones técnicas del equipo que se utilizó en los depósitos de las válvulas de escape y en el hollín que se obtiene de los motores de combustión interna.

Tabla 3. 10. Especificaciones técnicas del difractor de rayos X.

|   |                       |                          |
|---|-----------------------|--------------------------|
|  | EQUIPO                | Difractometro de Rayos X |
|   | MARCA                 | BRUKER                   |
|   | MODELO                | D8 ADVANCE               |
|   | ANÁLISIS CUALITATIVO  | Programa EVA             |
|   | ANÁLISIS CUANTITATIVO | Programa TOPAS           |
|   | MUESTRAS              | Cristalinas              |

Elaboración Propia.

### 3.7.4.2. Procedimiento del análisis químico de difracción de rayos X

La técnica de difracción de rayos X se aplica en las siguientes muestras:

Depósito del asiento de la válvula de escape que presenta pérdida de material.  
En los depósito del asiento de la válvula de escape sin presencia de pérdida de material y de los depósitos de Hollín.

Esta técnica es aplicable a los depósitos que incluye el estudio de identificación cualitativa y cuantitativa de fases, la determinación de las fases cristalinas o amorfas, los parámetros de red, estudios estructurales de altas temperaturas y el análisis de su estructura cristalina.

Para aplicar esta técnica es necesario que la muestra a estudiarse se encuentre en forma de polvo cristalino o monocristales, porque al aplicar los rayos X los átomos se dividen y se dispersan en varias direcciones, debido a que en un inicio el haz sugiere un patrón de intensidades que se interpreta según la ubicación de los átomos. Estos ensayos y análisis se realizan en el departamento de metalurgia extractiva de la Escuela Politécnica Nacional, DEMEX.

## **CAPÍTULO 4**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **4.1. INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se comenta los resultados de los análisis que se realizaron a los componentes que proporcionó la empresa OCP para la realización de la presente tesis.

Mediante los análisis a las distintas muestras se busca mitigar el desgaste del material y evaluar los costos suministrados por los mantenimientos. Los resultados obtenidos en los ensayos de composición química, difracción de rayos X, metalografía, dureza; indican con claridad los elementos que están afectando a los materiales, lo cual se describe respectivamente en cada análisis.

#### **4.2. RESULTADOS**

##### **4.2.1. IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS**

Es necesario identificar a las probetas, antes de iniciar los distintos ensayos. Se toma la siguiente nomenclatura para lo cual ayude a obtener resultados con claridad y así evitar obtener datos erróneos.

Se analiza a un total de 2 toberas, 2 válvulas de escape, un anillo de seguridad de los álabes de un turbocargador y una funda de depósitos, descritos en la siguiente tabla 4.1. (Anexo C).

Tabla 4. 1. Identificación de las muestras.

| MUESTRA | OBSERVACIONES   |
|---------|---|
| 1       | Inyector de combustible sin refrigeración de (PS2):<br><br>Longitud del inyector: L=63.3mm<br><br>Diámetro inferior: d=27mm. (Anexo C, ver figura C1).  |
| 2       | Inyector de combustible con refrigeración de (PS2):<br><br>Longitud del inyector: L=63.3mm.<br><br>Diámetro inferior: d=27mm. (Anexo C, ver figura C2). |
| 3       | Válvula de escape con pérdida de material (PS4):<br><br>Longitud, L=470mm<br><br>Diámetro, d=105mm. (Anexo C, ver figura C3).                           |
| 4       | Válvula de escape sin pérdida de material (PS1):<br><br>Longitud, L=470mm<br><br>Diámetro, d=105mm. . (Anexo C, ver figura C4).                         |
| 5       | Anillo de seguridad de los álabes del turbocargador (PS4):<br><br>Longitud L=160mm<br><br>Diámetro, d= 4mm. (Anexo C, ver figura C5).                   |
| 6       | Depósitos del motor principal de la estación (PS2)  |
| 7       | Depósitos de la válvula con pérdida de material (PS4)   |
| 8       | Depósitos de la válvula sin pérdida de material (PS1)   |
| 9       | Carcasa de turbocargador:<br><br>Largo, l=200mm.<br><br>Ancho, a= 150mm.<br><br>Espesor, e ≈10mm. (Anexo C, ver figura C6).                             |

Elaboración Propia.

#### 4.2.2. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS

MUESTRA 1: El inyector con refrigeración de la unidad principal D-0201B motor Wartsila presenta desgaste con pérdida de material y ciertos daños en diferentes zonas, especialmente en todo el cuerpo del inyector. (Anexo D, ver figura D1).

MUESTRA 2: El inyector sin refrigeración de la unidad principal D-0201D motor Wartsila presenta similares daños de desgaste con mínima pérdida del material en un sector del contorno, observada ligeramente en la cabeza del inyector. (Anexo D, ver figura D2).

MUESTRA 3: La válvula que presenta pérdida de material, fue obtenida de la unidad principal D-0401F, presenta una picadura de gran magnitud en el asiento del elemento y abundante acumulación de depósitos de residuos de la combustión.

MUESTRA 4: La válvula sin pérdida del material es sustraída de la unidad principal D-0101D, presenta acumulación de depósitos en el asiento productos de la combustión.

MUESTRA 5: El anillo de seguridad de los álabes de un turbocargador del equipo D-0401C, presenta deformaciones a lo largo del alambre, con tres fracturas transversales. Esta muestra tiene zonas de impacto en la superficie, la cual deforma al material disminuyendo su área transversal, la zona de fractura presenta una propagación rápida de falla. (Anexo D, ver figura D3).

MUESTRA 9: La carcasa de un turbocargador tiene presencia de desgaste con corrosión y pérdida de material en la superficie interna, además un agujero con un diámetro alrededor de 5mm que perfora completamente al material. La carcasa presenta corrosión con pérdida de material y picaduras de un tamaño aproximado de 3mm, donde presenta una disminución en el espesor de la pared lateral de la carcasa. Se observa el proceso de corrosión erosión. (Anexo D, ver figura D4).

Las muestra 6, son depósitos que se obtiene de las chimeneas de los motores Wartsila de la estación de Cayagama. Las muestras 7 y 8 son los depósitos que

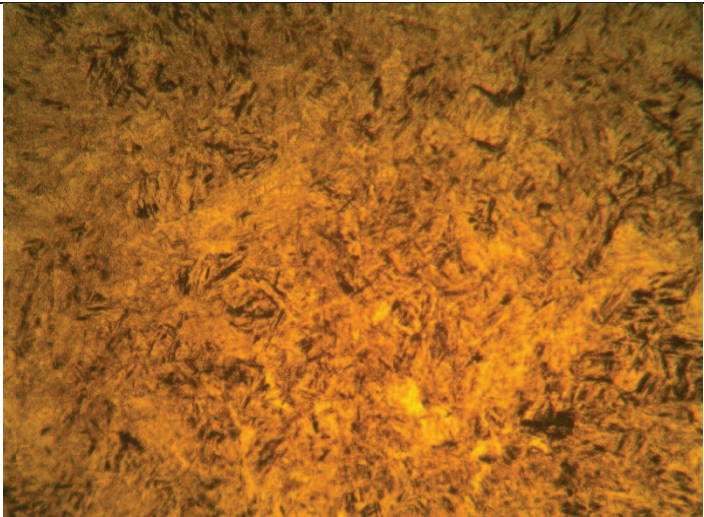


se extrae de los asientos de las válvulas de escape, en forma cuidadosa para no alterar la información que se obtienen por microscopía óptica.

#### 4.2.3. RESULTADOS METALGRÁFICOS

En los resultados metalográficos, define las microestructuras que tiene cada elemento analizado.

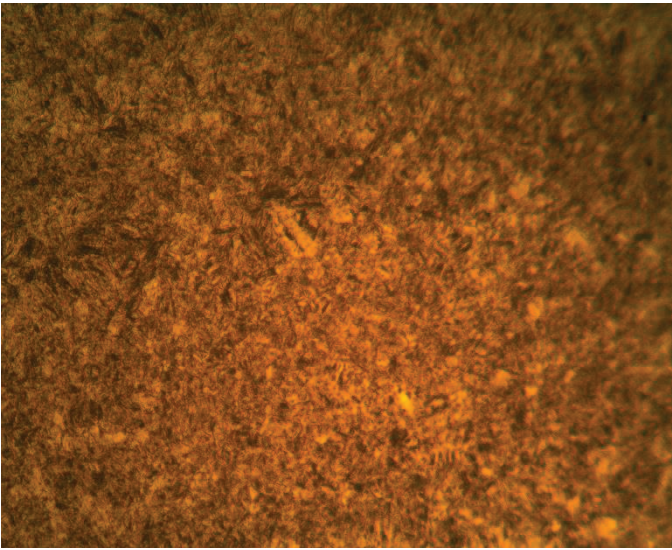
Tabla 4. 2. Resultado metalográfico de la probeta 1.

| PROBETA  | OBSERVACIONES  |
|--|--|
| 1  | El inyector con refrigeración corresponde a un acero aleado de cromo-níquel, que contiene una estructura de tipo martensítica, la fotografía fue a 500X tomada a la muestra 1. |
| <b>Fotografía 4.0.</b><br><br>Microestructura de un acero aleado Cromo-Níquel, con estructura de tipo martensita, a 500X |   |

Elaboración Propia.


Tabla 4. 3. Resultado metalográfico de la probeta 2.

| PROBETA | OBSERVACIONES  |
|---------|--|
| 2       | El inyector sin refrigeración corresponde a un acero aleado de cromo-níquel, que contiene una estructura de tipo martensítica, la fotografía fue a 500X tomada a la muestra 2. |

|   |  |
|---|--|
| <p><b>Fotografía 4.1.</b></p> <p>Microestructura de acero aleado Cromo-Níquel con estructura martensita, a 500X</p> |  |
|---|--|

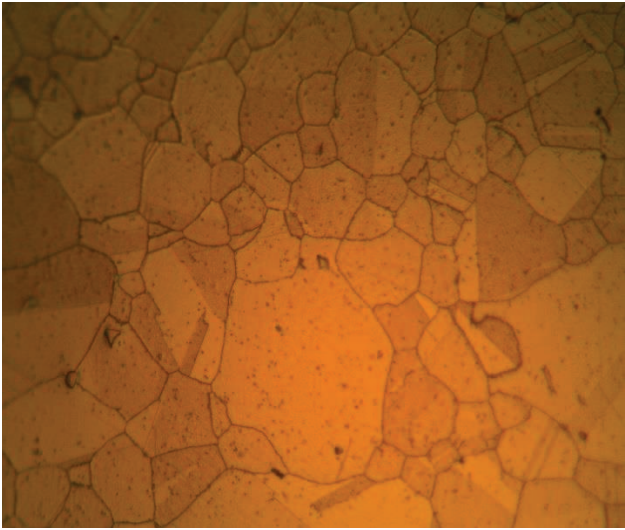
Elaboración Propia.

Tabla 4. 4. Resultado metalográfico de la probeta 3.

| PROBETA   | OBSERVACIONES   |
|---|---|
| 3   | <p>La válvula que presenta picadura, tiene una microestructura de estelite en el asiento. La imagen presenta precipitados de carburo, con una grieta en dirección transversal, producto de la corrosión en caliente debido a la acumulación de los depósitos en el asiento. Fotografía tomada a 100X de la muestra 3.</p> |
| <p><b>Fotografía 4.2.</b></p> <p>Microestructura de Estelite en el asiento de la válvula de escape.</p> |   |

Elaboración Propia.

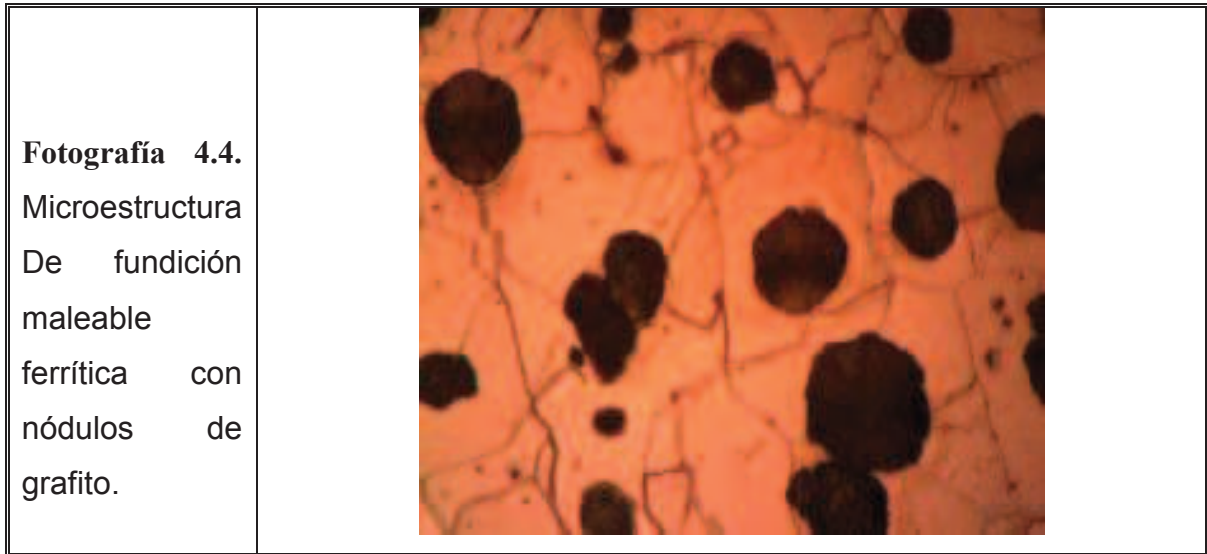
Tabla 4. 5. Resultado metalográfico de la probeta 5.

| PROBETA   | OBSERVACIONES   |
|---|---|
| 5   | La microestructura es de acero al cromo- níquel-vanadio, que tiene una matriz austenítica con presencia de carburos de titanio precipitado e inclusiones de tipo silicato, la fotografía fue tomado en la sección transversal a 500X de la muestra 5. |
| <b>Fotografía 4.3.</b><br><br>Microestructura de acero al cromo níquel con matriz austenítica |    |

Elaboración Propia.

Tabla 4. 6. Resultado metalográfico de la probeta 9.

| PROBETA | OBSERVACIONES  |
|---------|--|
| 9       | La microestructura corresponde a una fundición maleable ferrítica con presencia de nódulos de grafito de tamaño 6 y tipo I, la fotografía fue tomado en la sección transversal a 500X de la muestra 9. |



Elaboración Propia.

#### 4.2.4. RESULTADOS DE DUREZA

Para el análisis de dureza, se utilizan escalas de Rockwell B y C, debido a que los materiales son de diferentes microestructuras.

Tabla 4. 7. Dureza del inyector con refrigeración.

| PROBETA | DUREZA (HRC) |    |    |    |    | PROMEDIO |
|---------|--------------|----|----|----|----|----------|
| 1       | 33           | 34 | 38 | 34 | 34 | 35       |

Tabla 4. 8. Dureza del inyector sin refrigeración.

| PROBETA | DUREZA (HRC) |    |    |    |    | PROMEDIO |
|---------|--------------|----|----|----|----|----------|
| 2       | 36           | 39 | 39 | 37 | 37 | 38       |

Tabla 4. 9. Dureza de la válvula picada.

| PROBETA | DUREZA (HRC) |    |    |    |    | PROMEDIO |
|---------|--------------|----|----|----|----|----------|
| 3       | 37           | 35 | 35 | 33 | 34 | 35       |

Tabla 4. 10. Dureza de la carcasa del turbocargador.

| PROBETA | DUREZA (HRB) |    |    |    |    | PROMEDIO |
|---------|--------------|----|----|----|----|----------|
| 9       | 65           | 70 | 70 | 70 | 70 | 69       |

Elaboración Propia.

#### 4.2.5. RESULTADOS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA

##### 4.2.5.1. Resultados de microscopía electrónica del inyector con refrigeración

Para el análisis de microscopía electrónica, se prepara la probeta del inyector con refrigeración, en sección transversal, debido a que presenta desgaste de material internamente del inyector, este desgaste se debe a la corrosión en caliente y la presencia de elementos dañinos en el combustible.

En la parte externa de la cabeza de la tobera de inyección presenta desgaste debido a que existen puntos fríos en la zona por la cual internamente es refrigerado con lubricante, donde los contaminantes se depositan por condensación por la diferencia de temperatura entre el punto refrigerado de la tobera y la temperatura dentro de la cámara de combustión, produciendo la pérdida del material. Ver en la figura 4.1.

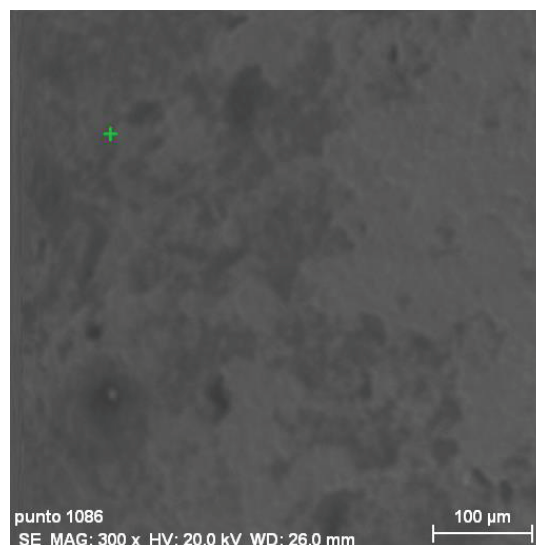


Figura 4. 1. Microscopía electrónica de la zona de corrosión.

En la figura 4.2. Se presenta la espectrografía de los elementos químicos existentes en la zona donde se encuentra el desgaste del material.

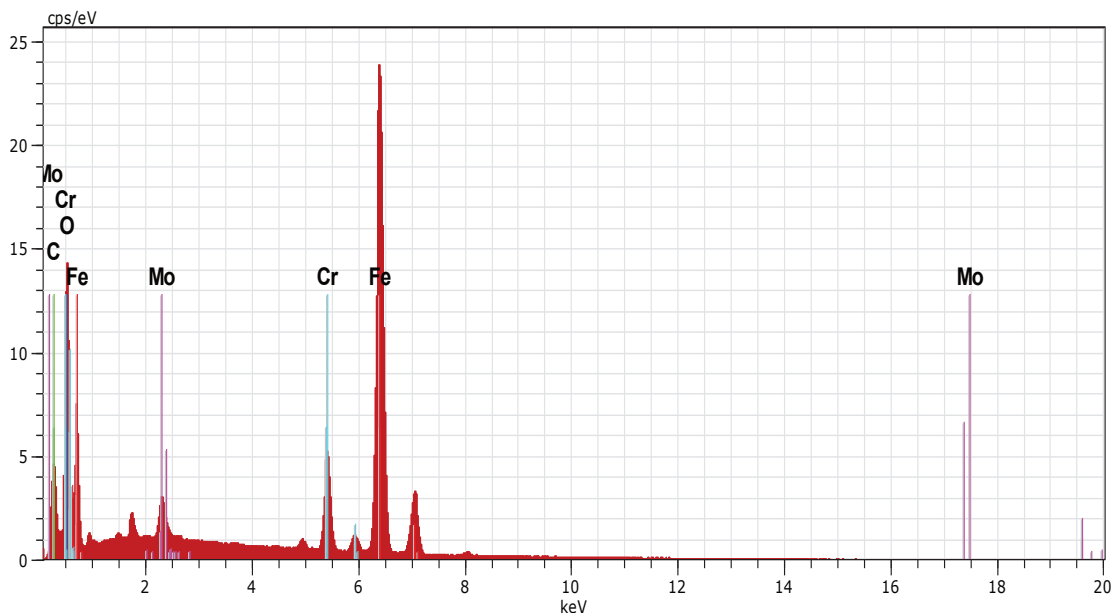


Figura 4. 2. Espectrografía de elementos químicos presentes en la zona de corrosión.

La tabla 4.11, indica el porcentaje en peso de los elementos. Los elementos presentes son: el hierro (Fe), carbono (C), cromo (Cr), molibdeno (Mo) y oxígeno (O). Estos elementos son los que tienen más porcentaje en peso, muchos elementos se descartaron debido a que no alcanzaban el 1% en peso.

Tabla 4. 11. Cuantificación del espectro tomando como referencia al elemento de hierro (Fe) de la tobera refrigerada.

| Tobera refrigerada |    |          |         |         |         |         |
|--------------------|----|----------|---------|---------|---------|---------|
| El                 | AN | Series   | Unn.    | C norm  | C Atom. | C Error |
|                    |    |          | [wt. %] | [wt. %] | [at. %] | [wt. %] |
| Fe                 | 26 | K-series | 55,96   | 56,51   | 27,24   | 1,5     |
| O                  | 8  | K-series | 18,6    | 18,79   | 31,61   | 2,2     |
| C                  | 6  | K-series | 16,56   | 16,73   | 37,49   | 2,1     |
| Cr                 | 24 | K-series | 5,93    | 5,99    | 3,1     | 0,2     |
| Mo                 | 42 | K-series | 1,97    | 1,99    | 0,56    | 0,1     |
| TOTAL:             |    |          | 99,03   | 100     | 100     |         |

Elaboración Propia.

#### 4.2.5.2. Resultados de microscopia electrónica del inyector sin refrigeración

Se indica la microscopia electrónica del inyector sin refrigeración, de manera similar a la probeta anterior, se realiza un corte transversal para saber qué elementos existen en la zona donde presenta pérdida el material o desgaste. El análisis se tomó en un punto referencial, observando que el desgaste es mínimo en comparación a la tobera refrigerada, tanto en la parte interna, como en la superficie externa. En la figura 4.3, se indica el punto referencial con presencia de un diminuto desgaste en la superficie interna.

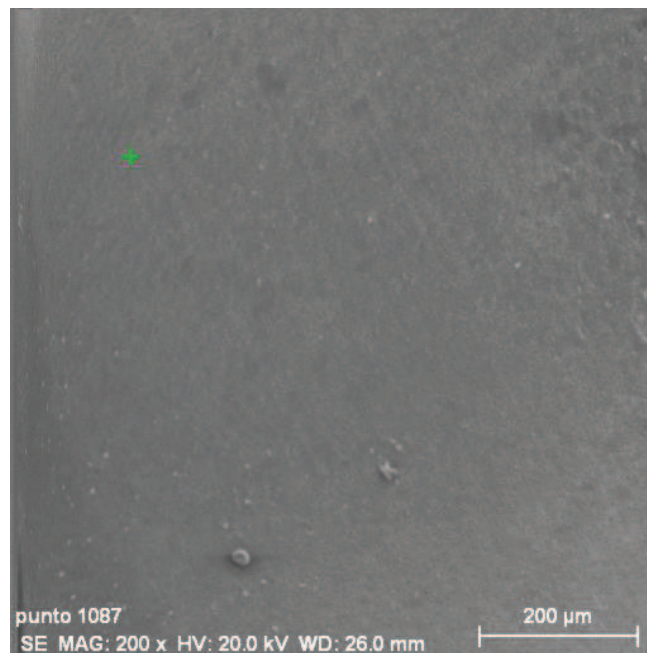


Figura 4. 3. Zona de desgaste analizado mediante un punto de referencia.

En la figura 4.4. Se muestra la espectrografía de los elementos químicos que están presentes en la zona del desgaste. Se considera la tabla 4.12, donde existen elementos con gran porcentaje en peso y en algunos elementos con bajo porcentaje, estos elementos no se considera en el análisis. Los elementos que se encuentran presentes son los siguientes: hierro (Fe), oxígeno (O), carbono (C), aluminio (Al), cromo (Cr), azufre (S), vanadio (V), molibdeno (Mo); los tres últimos elementos tienen un porcentaje de peso igual a cero.

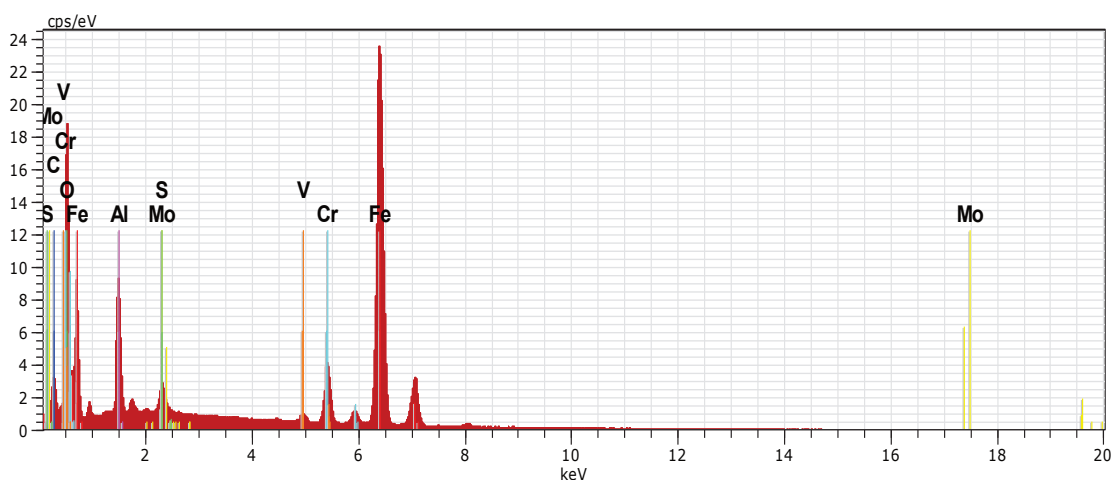


Figura 4. 4. Espectrografía de la composición química tomado de referencia en un punto cerca la zona de desgaste.

Tabla 4. 12. Cuantificación del espectro tomando como referencia al elemento de hierro (Fe), analizada a la tobera sin refrigeración.

| Tobera no refrigerada |    |          |         |         |         |         |
|-----------------------|----|----------|---------|---------|---------|---------|
| El                    | AN | Series   | Unn.    | C norm  | C Atom. | C Error |
|                       |    |          | [wt. %] | [wt. %] | [at. %] | [wt. %] |
| Fe                    | 26 | K-series | 51,89   | 55,1    | 26,81   | 1,4     |
| O                     | 8  | K-series | 20,14   | 21,38   | 36,32   | 2,3     |
| C                     | 6  | K-series | 12,02   | 12,76   | 28,87   | 1,6     |
| Al                    | 13 | K-series | 4,41    | 4,69    | 4,72    | 0,2     |
| Cr                    | 24 | K-series | 4,25    | 4,52    | 2,36    | 0,1     |
| S                     | 16 | K-series | 0,6     | 0,64    | 0,54    | 0       |
| V                     | 23 | K-series | 0,46    | 0,49    | 0,26    | 0       |
| Mo                    | 42 | L-series | 0,4     | 0,43    | 0,12    | 0       |
| TOTAL:                |    |          | 94,17   | 100     | 100     |         |

Elaboración Propia.

#### 4.2.5.3. Resultados de microscopia electrónica de la válvula con pérdida de material

Se presenta una válvula con gran pérdida de material en el asiento, se evidencia crecimiento en el tamaño de grano, debido a la corrosión en caliente. ( Anexo E, ver figura E1 y E2). Mediante microscopia electrónica se puede observar los



elementos que están compuestos en los granos del material, las cuales son causas de la falla del elemento mecánico. La figura 4.5, indica el tamaño de grano del material y la corrosión presente en ella.

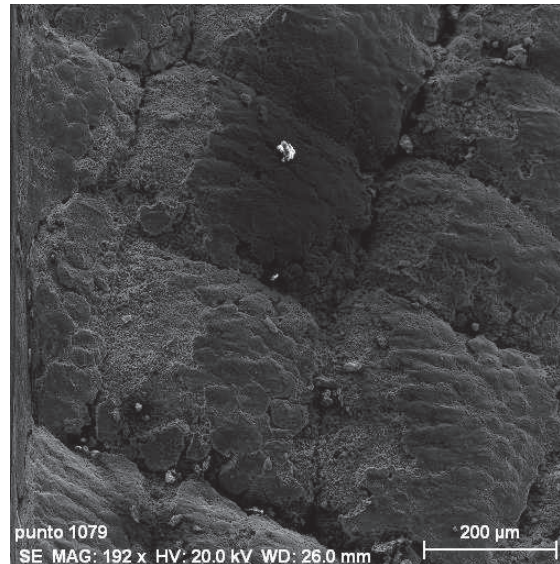


Figura 4. 5. Microscopía electrónica de la zona donde se presenta el crecimiento del grano por elevadas temperaturas.

En la figura 4.6, se aprecia los elementos presentes en la zona de desgaste. El microanálisis con EDS son correspondientes a la zona donde presenta pérdida de material provocada por las elevadas temperaturas y depósitos de una mala combustión, junto a estas anomalías se tiene gran exceso de aire.

Existe gran presencia de calcio, sodio y vanadio, la interacción de estos elementos son los principales causantes de la corrosión en caliente especialmente en el asiento de la válvula de escape, a pesar que el material es resistente a las elevadas temperaturas, las condiciones de operación y el uso del combustible con altos contaminantes, facilita este proceso de corrosión.

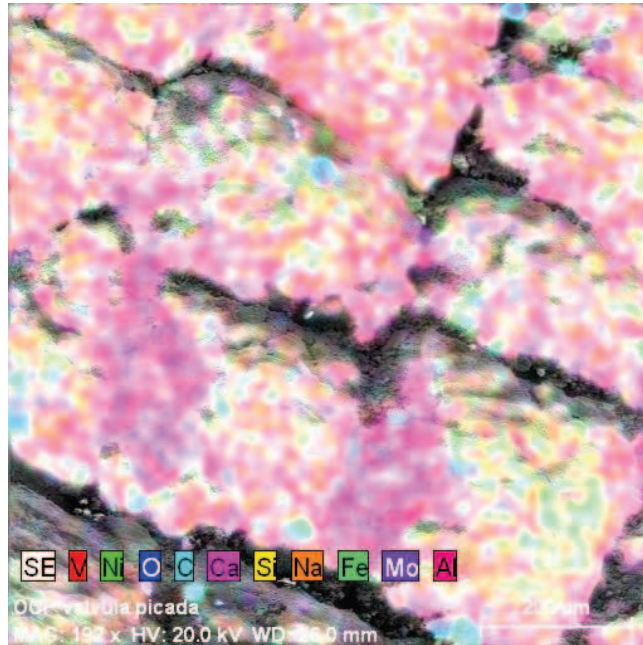


Figura 4. 6. Microanálisis con el proceso de EDS.

Figura 4.7, define con claridad los elementos químicos presentes en la zona afectada, se especifica los elementos que están en gran cantidad. El vanadio y sodio son los elementos que están atacando drásticamente a la válvula de escape, debido a que estos contaminantes y la mala combustión, hacen que los residuos se acumulen en el asiento de la válvula, perdiendo ciertas propiedades mecánicas, y con las altas temperaturas produce el crecimiento de grano, lo cual está induciendo a la falla.

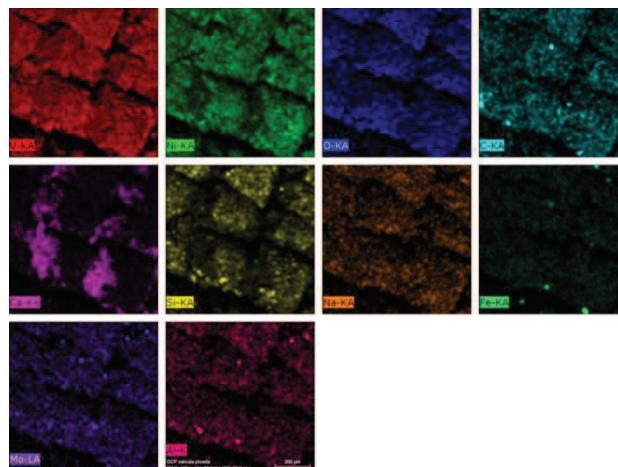


Figura 4. 7. Composición química en la zona afectada.

Para cuantificar los elementos químicos que facilitan la corrosión, se exporta una espectrografía; la figura 4.8 indica los porcentajes en peso.

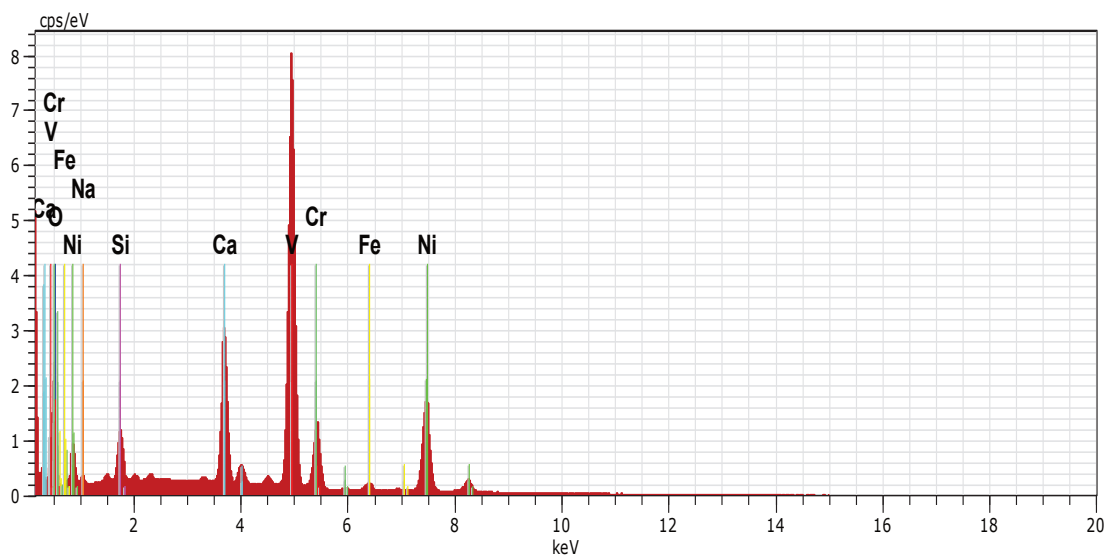


Figura 4. 8. Espectrografía de los elementos presentes en la superficie afectada por elevadas temperaturas.

Tabla 4. 13. Cuantificación de los valores en peso de los elementos de la válvula de escape.

| Perdida de material en el asiento de la válvula |    |          |         |         |         |                  |         |         |         |
|---|----|----------|---------|---------|---------|------------------|---------|---------|---------|
| El  | AN | Series   | Unn.    | C norm  | C Atom. | C Compound       | Comp.   | Comp    | C Error |
|   |    |          | [wt. %] | [wt. %] | [at. %] |                  | [wt. %] | [wt. %] | [wt. %] |
| V   | 23 | K-series | 40,04   | 52,91   | 49,15   |                  | 52,91   | 40,04   | 1,1     |
| Ni  | 28 | K-series | 20,84   | 27,53   | 22,2    |                  | 27,53   | 20,84   | 0,6     |
| Ca  | 20 | K-series | 8,54    | 11,29   | 13,33   |                  | 11,29   | 8,54    | 0,3     |
| O   | 8  | K-series | 1,78    | 2,35    | 6,94    |                  | 0       | 0       | 0,1     |
| Si  | 14 | K-series | 1,56    | 2,06    | 3,47    | SiO <sub>2</sub> | 4,41    | 3,34    | 0,1     |
| Fe  | 26 | K-series | 1,13    | 1,49    | 1,27    |                  | 1,49    | 1,13    | 0,1     |
| Na  | 11 | K-series | 0,97    | 1,28    | 2,64    |                  | 1,28    | 0,97    | 0,1     |
| Cr  | 24 | K-series | 0,83    | 1,09    | 0,99    |                  | 1,09    | 0,83    | 0,1     |
|   |    | TOTAL:   | 75,69   | 100     | 100     |                  |         |         |         |

Elaboración Propia.

#### 4.2.5.4. Resultados de microscopia electrónica de válvula sin deterioros

La válvula sin daños visibles, presenta desgaste en el asiento de la válvula, debido a la presencia de vanadio, azufre, sodio. Las líneas de desgaste están direccionadas en diferentes formas, en un punto se evidencia el levantamiento del material y con más horas de funcionamiento se tiene la válvula ya con deterioro. Ver figura 4.9.

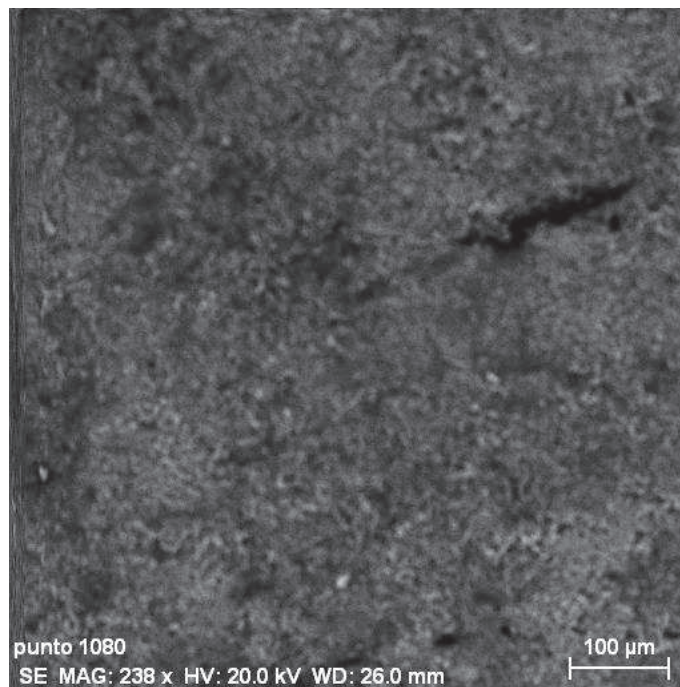


Figura 4. 9. Microscopia electrónica de una válvula sin defectos visibles.

Se realiza un microanálisis con EDS, para observar los elementos presentes en la zona donde se encuentra grandes depósitos. La figura 4.10, indica cómo está distribuidos los elementos en el asiento de la válvula. Esta válvula tiene adherida los depósitos en toda la superficie.

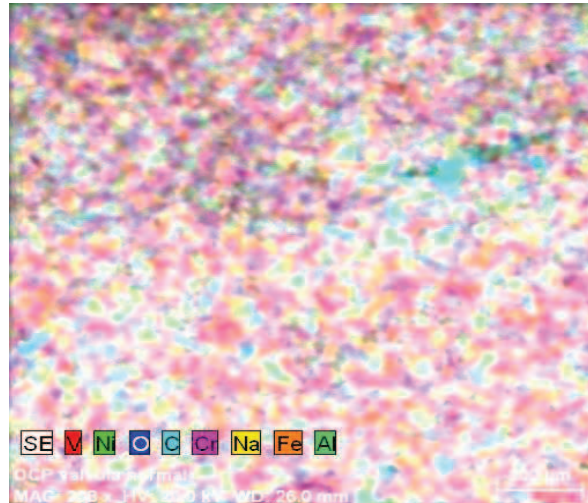


Figura 4. 10. Distribución de diferentes elementos químicos que se encuentran en el asiento de la válvula.

En la figura 4.11, se puede verificar que existe gran cantidad de vanadio, níquel, oxígeno y otros compuestos que a la vez son productos de un combustible con altos contaminantes y dañinos a ciertos elementos mecánicos, que está directamente en contacto, con la presencia de altas temperaturas, estos elementos químicos tienden a formar las sales corrosivas, se observa que el vanadio es el elemento primordial para la presencia del desgaste.

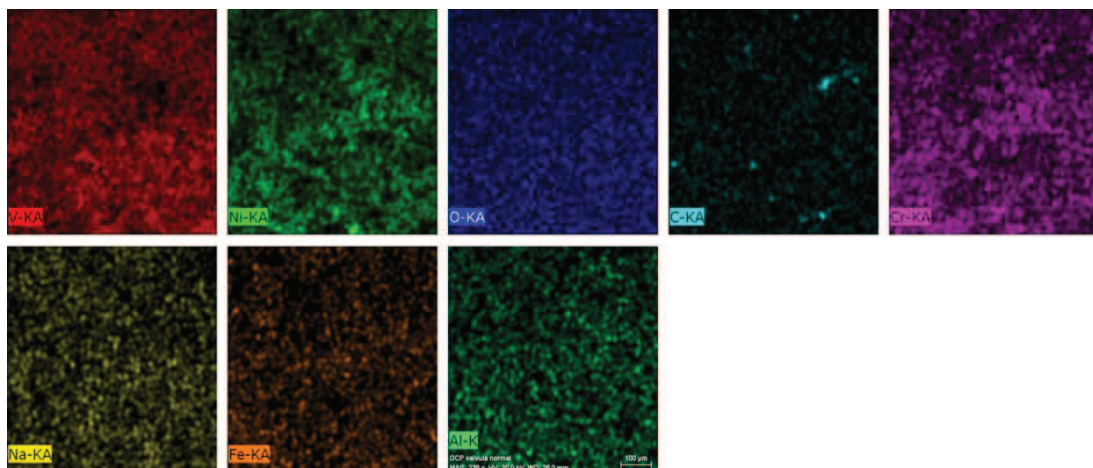


Figura 4. 11. Elementos contaminantes depositados en la válvula de escape, sin presencia de pérdida de material.

Una espectrografía de los elementos químicos se realiza en el asiento de la válvula, como indica la figura 4.12.

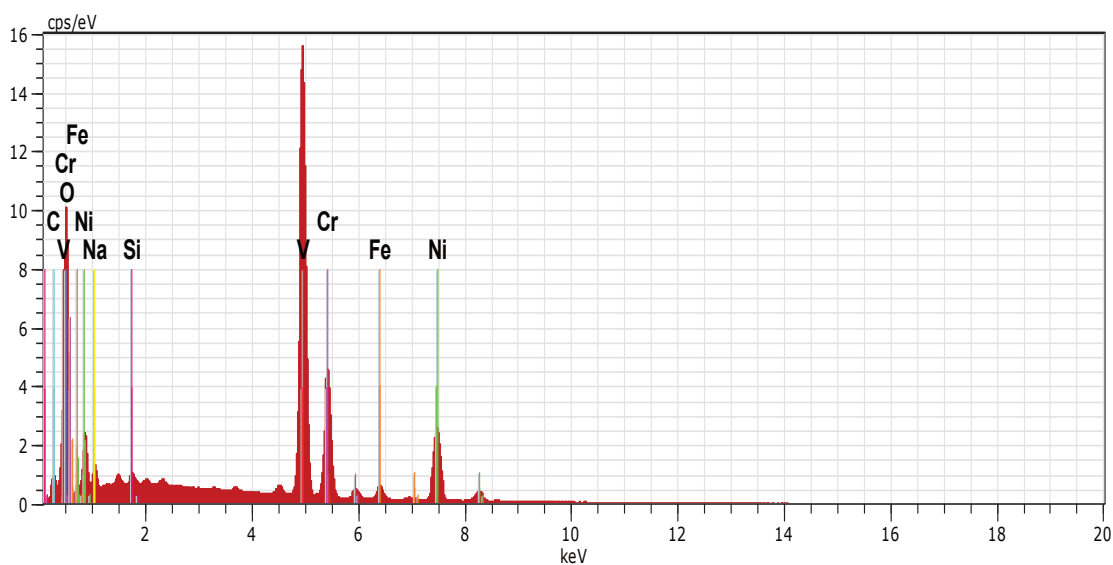


Figura 4. 12. Espectrografía de los elementos químicos presentes en la válvula de escape.

Los valores de porcentajes en peso se cuantifican en la tabla 4.14.

Tabla 4. 14. Valores obtenidos en forma de porcentajes en peso de cada elemento químico presente en el asiento de la válvula.

| Depósitos en el asiento de la válvula sin defecto |    |          |         |         |         |                  |         |         |         |
|---|----|----------|---------|---------|---------|------------------|---------|---------|---------|
| El  | AN | Series   | Unn.    | C norm  | C Atom. | C Compound       | Comp.   | Comp    | C Error |
|   |    |          | [wt. %] | [wt. %] | [at. %] |                  | [wt. %] | [wt. %] | [wt. %] |
| V   | 23 | K-series | 39,68   | 51,79   | 39,34   |                  | 51,79   | 39,68   | 1,1     |
| Ni  | 28 | K-series | 17,12   | 22,34   | 14,73   |                  | 22,34   | 17,12   | 0,5     |
| Cr  | 24 | K-series | 7,26    | 9,48    | 7,06    |                  | 9,48    | 7,26    | 0,2     |
| C   | 6  | K-series | 6,88    | 8,98    | 28,92   |                  | 8,98    | 6,88    | 1       |
| Na  | 11 | K-series | 2,56    | 3,35    | 5,63    |                  | 3,35    | 2,56    | 0,2     |
| Fe  | 26 | K-series | 2,18    | 2,85    | 1,98    |                  | 2,85    | 2,18    | 0,1     |
| O   | 8  | K-series | 0,5     | 0,65    | 1,57    |                  | 0       | 0       | 0       |
| Si  | 14 | K-series | 0,44    | 0,57    | 0,78    | SiO <sub>2</sub> | 1,21    | 0,93    | 0       |
|   |    | TOTAL:   | 76,62   | 100     | 100     |                  |         |         |         |

Elaboración Propia.

#### 4.2.5.5. Resultados de microscopía electrónica de la carcasa de un turbocargador

La figura 4.13, indica la superficie corroída con presencia de partículas oscuras correspondientes a los nódulos de grafito, los cuales se encuentra distribuido en toda la superficie.

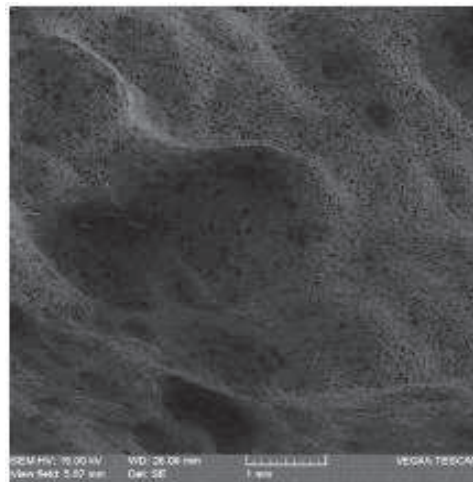


Figura 4. 13. Superficie corroída con nódulos de grafito.

El mapeo de composición química se realiza mediante la microscopía electrónica, indica la presencia de elementos químicos como carbono, hierro, silicio y oxígeno, observar la figura 4.14 y figura 4.15.

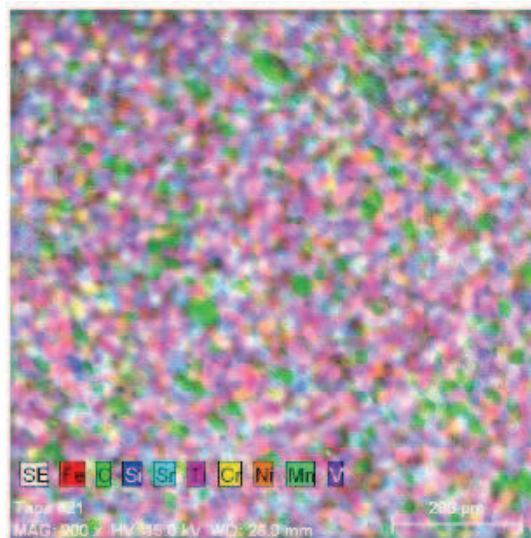


Figura 4. 14. Microanálisis con EDS correspondientes a la superficie corroída de la carcasa del turbocargador.

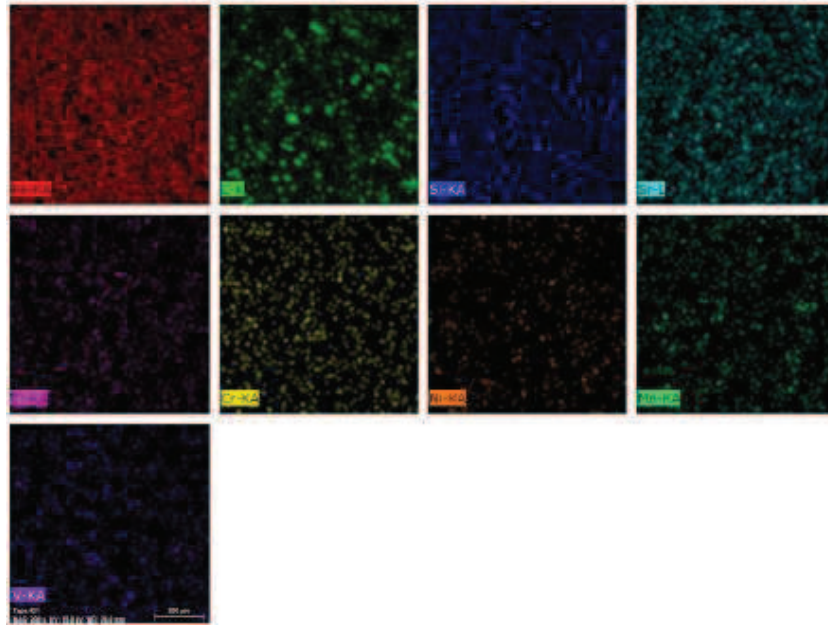


Figura 4. 15. Elemento químicos presentes en la superficie de desgaste por corrosión.

La cuantificación del espectro permite apreciar de forma concisa la existencia de hierro, carbono en altas concentraciones, lo contrario del silicio y el oxígeno que se encuentra en cantidades bajas. El oxígeno puede hallarse formando óxidos de hierro en la superficie de la carcasa del turbocargador. Ver figura 4.16 y la tabla 4.15.

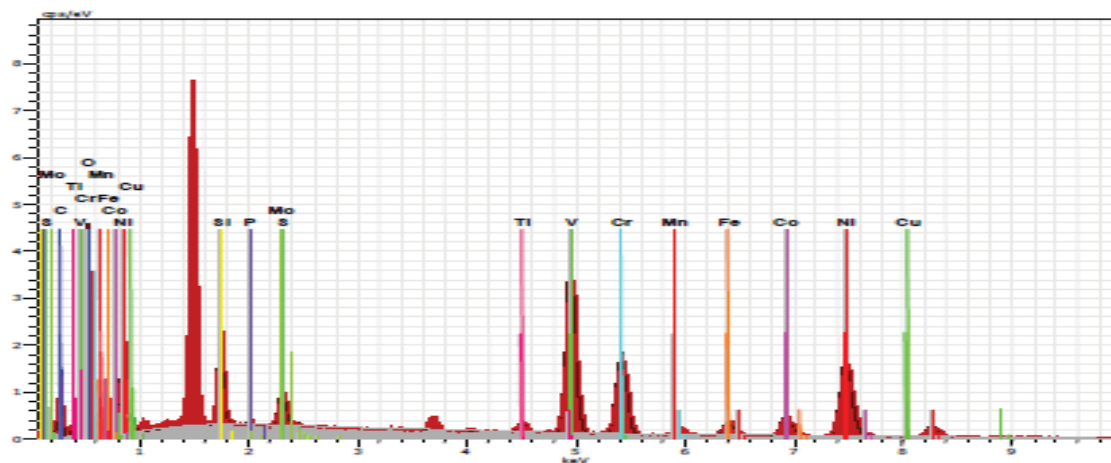


Figura 4. 16. Espectrografía de elementos químicos presentes en la superficie de corrosión.



Tabla 4. 15. Cuantificación porcentual del espectro de la carcasa del turbocargador.

| Carcasa Del Turbocargador |          |         |         |         |         |
|---------------------------|----------|---------|---------|---------|---------|
| Elemento                  | Series   | Unn.    | C norm. | C Atom  | C Error |
|                           | [wt. %]  | [wt. %] | [at. %] | [wt. %] | [wt. %] |
| Fe                        | K-series | 76.76   | 61.87   | 26.63   | 2.3     |
| C                         | K-series | 43.23   | 34.84   | 69.74   | 5.4     |
| Si                        | K-series | 1.66    | 1.34    | 1.15    | 0.1     |
| Sr                        | K-series | 0.02    | 0.01    | 0       | 0       |
| Ti                        | K-series | 0.06    | 0.05    | 0.02    | 0       |
| V                         | K-series | 0.01    | 0.01    | 0       | 0       |
| Cr                        | K-series | 0.03    | 0.02    | 0.01    | 0       |
| Mn                        | K-series | 0.26    | 0.21    | 0.09    | 0       |
| Ni                        | K-series | 0.15    | 0.12    | 0.05    | 0       |
| O                         | K-series | 1.9     | 1.53    | 2.3     | 0.1     |
| Total:                    |          | 124.08  | 100     | 100     |         |

Elaboración Propia.

Para la zona más amplia de la figura 4.17, se observa la corrosión con pérdida de nódulos de grafito. Se encuentran valores elevados de carbono, oxígeno y hierro como se presenta en la figura 4.18 y los valores cuantificados en la tabla 4.16.

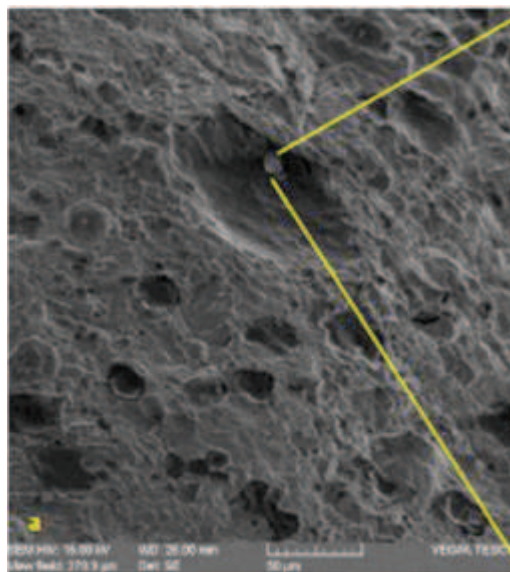


Figura 4. 17. a) Microscopía electrónica ampliada a 100 X de la zona de corrosión, presenta pérdida de nódulos de grafito de la superficie.

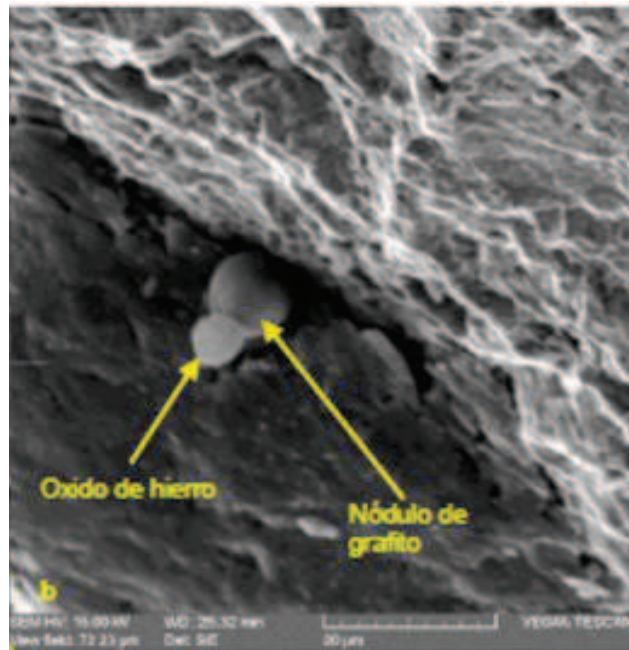


Figura 4. 18. b) Se observa un nódulo de grafito y la presencia de óxido de hierro adherido.

En la figura 4.19, se presenta la espectrografía de los elementos químicos que se encuentran en la carcasa de un turbocargador, después de ser atacado por la corrosión.

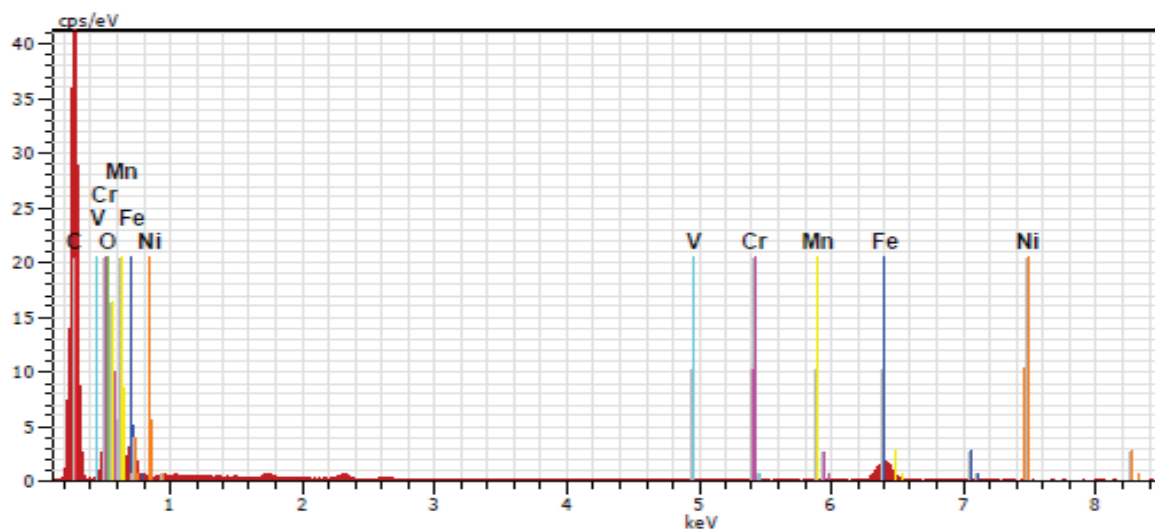


Figura 4. 19. Espectrografía de elementos químicos presentes en la superficie de corrosión, observadas a 100 X.

Tabla 4. 16. Cuantificación porcentual del espectro tomado a 100 X de la carcasa.

| Carcasa del turbocargador a 100 X |    |          |         |         |         |         |
|-----------------------------------|----|----------|---------|---------|---------|---------|
| El                                | An | Series   | Unn.    | C norm. | C Atom  | C Error |
|                                   |    | [wt. %]  | [wt. %] | [at. %] | [wt. %] |         |
| C                                 | 6  | K-series | 110.04  | 67.01   | 79.36   | 12.3    |
| O                                 | 8  | K-series | 31.69   | 19.29   | 17.15   | 4.1     |
| Fe                                | 26 | K-series | 22.46   | 13.68   | 3.48    | 0.7     |
| Ni                                | 28 | K-series | 0.03    | 0.02    | 0       | 0       |
| V                                 | 23 | K-series | 0       | 0       | 0       | 0       |
| Cr                                | 24 | K-series | 0       | 0       | 0       | 0       |
| Mn                                | 25 | K-series | 0       | 0       | 0       | 0       |
| Total:                            |    |          | 164.22  | 100     | 100     |         |

Elaboración Propia.

#### 4.2.5.6. Resultados de microscopia electrónica del anillo de seguridad de los alabes del turbocargador (dumping wire)

La figura 4.19, indica la superficie del anillo con procesos de fractura frágil. Estas superficies tienen marcas de río que apuntan al inicio de la fractura. En la zona de fractura se observa granos gruesos, característicos del efecto de la temperatura.

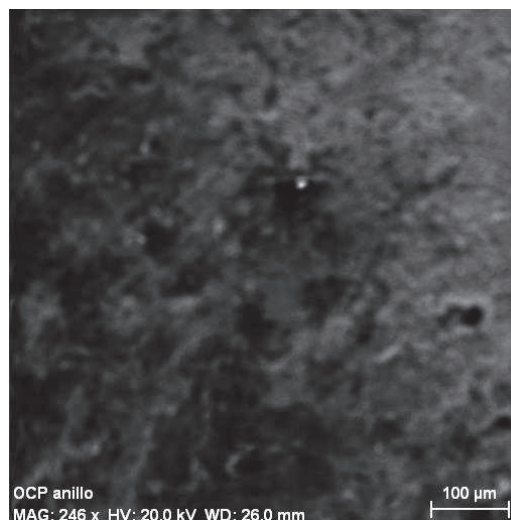


Figura 4. 20. Microscopia electrónica, ampliación de la zona de fractura del anillo.

El mapeo de composición química realizado mediante la microscopía indica la presencia de zonas segregadas como el cromo, níquel, vanadio, tal como indica la figura 4.20 y figura 4.21. Es importante el contenido de vanadio que se encuentra en toda la superficie.

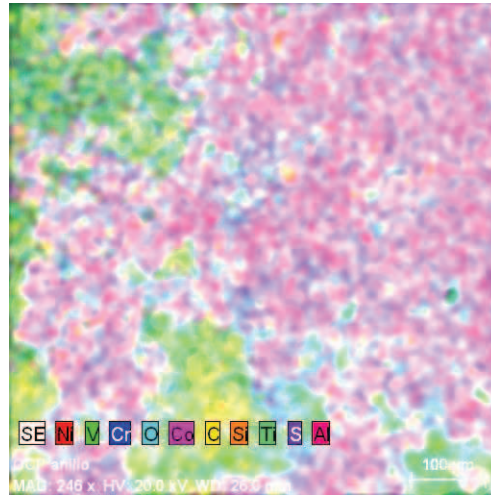


Figura 4. 21. Mapeo de la composición química en la superficie de fractura.

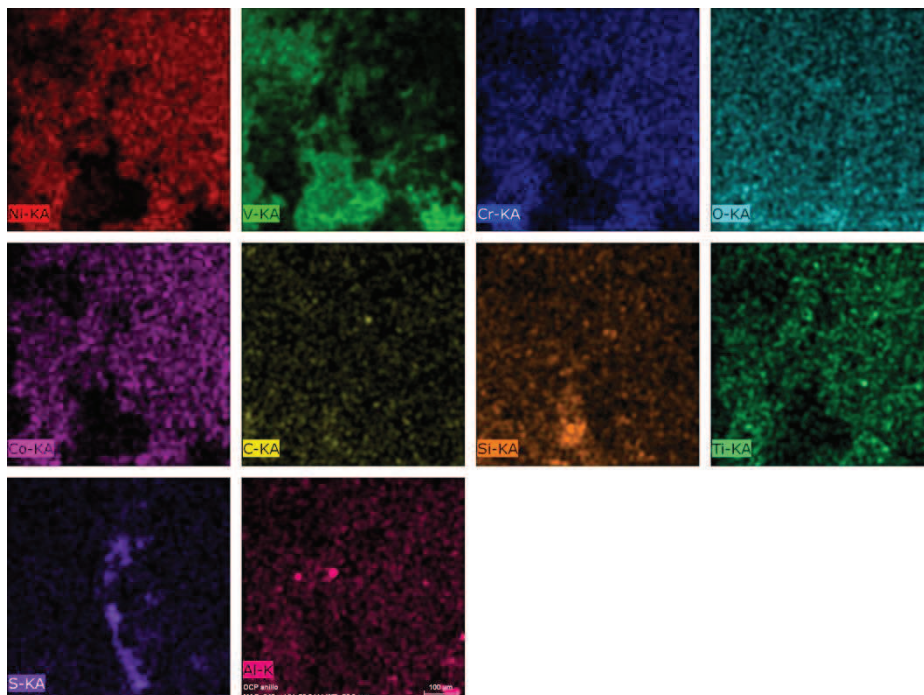


Figura 4. 22. . Elementos químicos con gran porcentaje, presentes en toda la superficie de fractura.

La cuantificación del espectro, permite observar de manera clara la presencia de vanadio, níquel, cromo y carbono en valores altos, sobre todo cuando se forma

carburos, en la superficie de falla, estos carburos son de cromo y níquel, es importante destacar que el carbono en la mayor aleación no debe sobrepasar del 1.4% en las composiciones, ver figura 4.22 y la tabla 4.17.

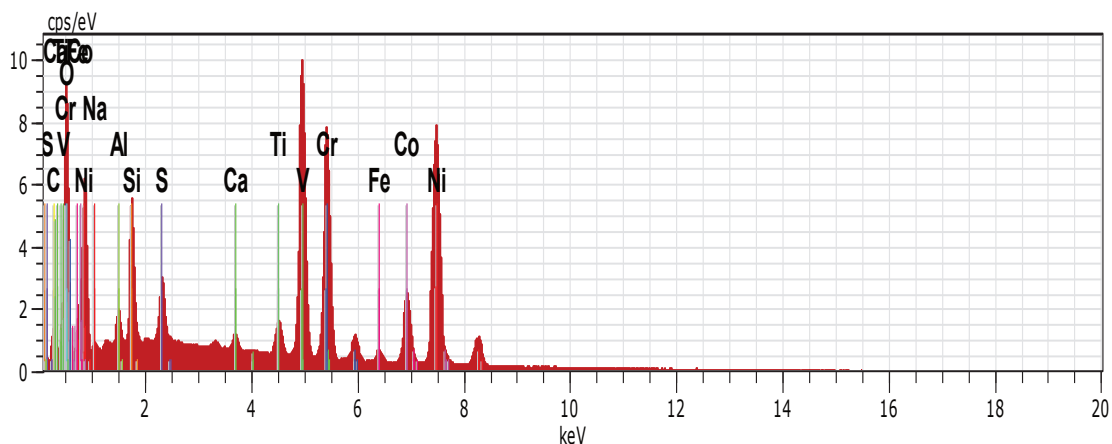


Figura 4. 23. . Espectrografía de elementos químicos de la zona de fractura del anillo.

Tabla 4. 17. Cuantificación de los valores porcentuales del espectro, teniendo como referencia al elemento de hierro (Fe) del anillo de seguridad.

| Anillo de seguridad de los alabes del turbocargador o dumping wire |    |          |         |         |         |                  |         |         |         |
|--|----|----------|---------|---------|---------|------------------|---------|---------|---------|
| El   | AN | Series   | Unn.    | C norm  | C Atom. | C Compound       | Comp.   | Comp    | C Error |
|  |    |          | [wt. %] | [wt. %] | [at. %] |                  | [wt. %] | [wt. %] | [wt. %] |
| Ni   | 28 | K-series | 32.48   | 37.56   | 24.55   |                  | 37.56   | 32.48   | 0.9     |
| V  | 23 | K-series | 15.12   | 17.49   | 13.17   |                  | 17.49   | 15.12   | 0.4     |
| Cr   | 24 | K-series | 11.52   | 13.31   | 9.82    |                  | 13.31   | 11.52   | 0.3     |
| Co   | 27 | K-series | 8.45    | 9.77    | 6.36    |                  | 9.77    | 8.45    | 1       |
| C  | 6  | K-series | 6.73    | 7.78    | 24.86   |                  | 7.78    | 6.73    | 0.2     |
| O  | 8  | K-series | 3.29    | 3.8     | 9.12    |                  | 0       | 0       | 0.1     |
| Si   | 14 | K-series | 2.89    | 3.34    | 4.56    | SiO <sub>2</sub> | 7.14    | 6.17    | 0.1     |
| Ti   | 22 | K-series | 1.52    | 1.76    | 1.41    |                  | 1.76    | 1.52    | 0.1     |
| Si   | 16 | K-series | 1.4     | 1.62    | 1.94    |                  | 1.62    | 1.4     | 0.1     |
| Fe   | 26 | K-series | 0.97    | 1.12    | 0.77    |                  | 1.12    | 0.97    | 0.1     |
| Al   | 13 | K-series | 0.92    | 1.06    | 1.51    |                  | 1.06    | 0.92    | 0.1     |
| Na   | 11 | K-series | 0.73    | 0.84    | 1.4     |                  | 0.84    | 0.73    | 0.1     |
| Ca   | 20 | K-series | 0.47    | 0.54    | 0.52    |                  | 0.54    | 0.47    | 0       |
| TOTAL:   |    |          | 86.49   | 100     | 100     |                  |         |         |         |

Elaboración Propia.

#### 4.2.6. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL ENSAYO DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

En la figura 4.23, el alto contenido de vanadio asegura la pérdida del material, debido a la gran adherencia del contaminante, sumado a las altas temperaturas se produce el crecimiento del tamaño de grano, reduciendo la dureza del material que lo vuelve menos resistentes a la corrosión.

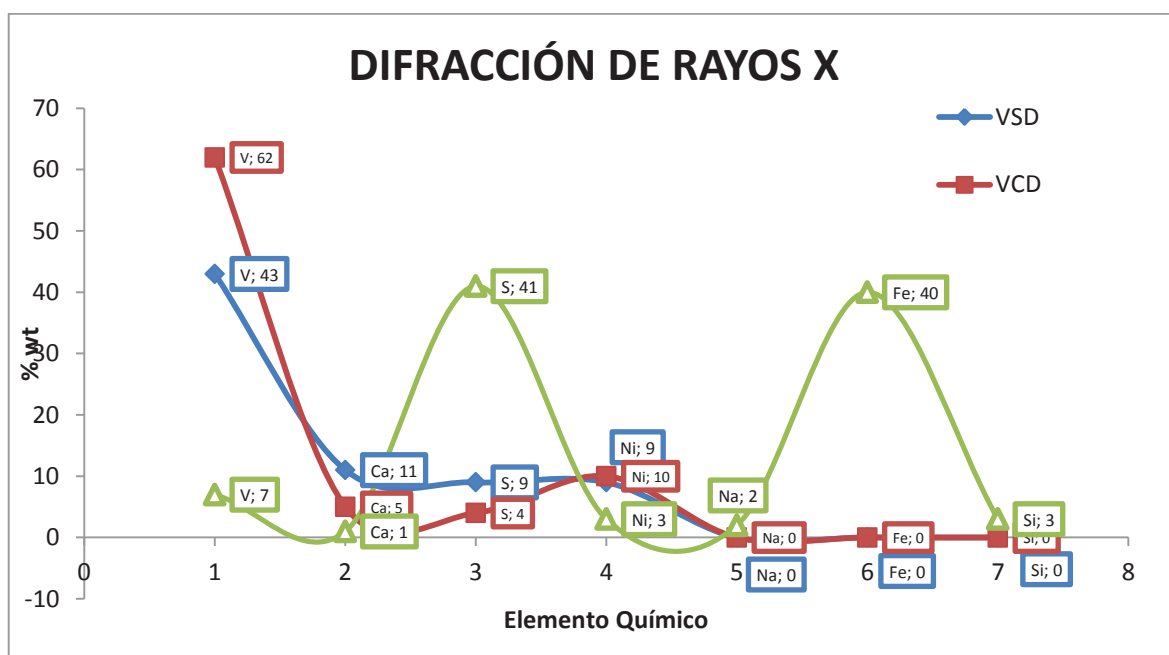


Figura 4. 24. Elementos contaminantes presentes en los depósitos de las válvulas de escape y del hollín.

En los resultados de la figura 4.24, presenta dos picos, el primero de azufre y el segundo de hierro. El azufre es proveniente del crudo combustible, el hierro proviene de las pérdidas de las partículas de materiales en contacto con las sales contaminantes.

La relación sodio-calcio es de 2 a 1, lo que puede establecer que el aditivo en base de magnesio disminuirá el porcentaje de estos elementos contaminantes.

### 4.3. DISCUSIÓN DE LOS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

#### 4.3.1. TOBERAS REFRIGERADAS Y SIN REFRIGERACIÓN

En los análisis metalográficos se evidencia que las toberas de aleación (cromo-níquel) refrigeradas y sin refrigerar presentan la misma estructura martensítica, la diferencia radica en la distribución de las láminas de martensita. La tobera refrigerada tiene una distribución de láminas de martensita bien dispersas, se localizan en diferentes direcciones y desordenadas. Mientras que la tobera sin refrigeración a pesar de que son de igual estructura martensita, su distribución de láminas es muy compacta y ordenada con relación a la tobera refrigerada. Estas imágenes se obtienen a 500X. (Anexo F, ver figura F1 y figura F2).

Es evidente que el combustible que utiliza OCP tiene elementos muy corrosivos, los principales contaminantes encontrados son S, Na, K, V. En base al análisis químico se observa que en la sección del cuerpo y la cabeza interna del inyector presentan pérdida de material, en muy poca escala, pero los componentes con mayor porcentaje en peso son el hierro, cromo, oxígeno, carbono; la tobera sin refrigeración presenta pocos porcentajes de vanadio y molibdeno. Con el oxígeno presente en gran magnitud, se confirma que tiene una mezcla pobre y una mala combustión. Estos datos se consiguen de un punto de referencia como indica la figura 4.3.

En la figura 4.25 es evidente que en la tobera sin refrigerar no presenta azufre ni vanadio, pero tiene un porcentaje en peso de 1.99 de molibdeno, lo que resuelve que el material es más resistente a los efectos de corrosión.

Mientras que la presencia de azufre, vanadio en la tobera refrigerada, aparece de los contaminantes presentes en el crudo combustible y el porcentaje de molibdeno no llegan al 1% en peso, esto se debe en parte por la circulación de un refrigerante por el inyector, provocando puntos de rocío, donde se depositan las sales contaminantes, que se adhieren al material y con la velocidad del fluido van desgastando y debilitando al material, provocando fracturas y mala

pulverización, este daño causa la desviación de los gases de escape entre los cilindros del motor y provoca el apagado del motor.

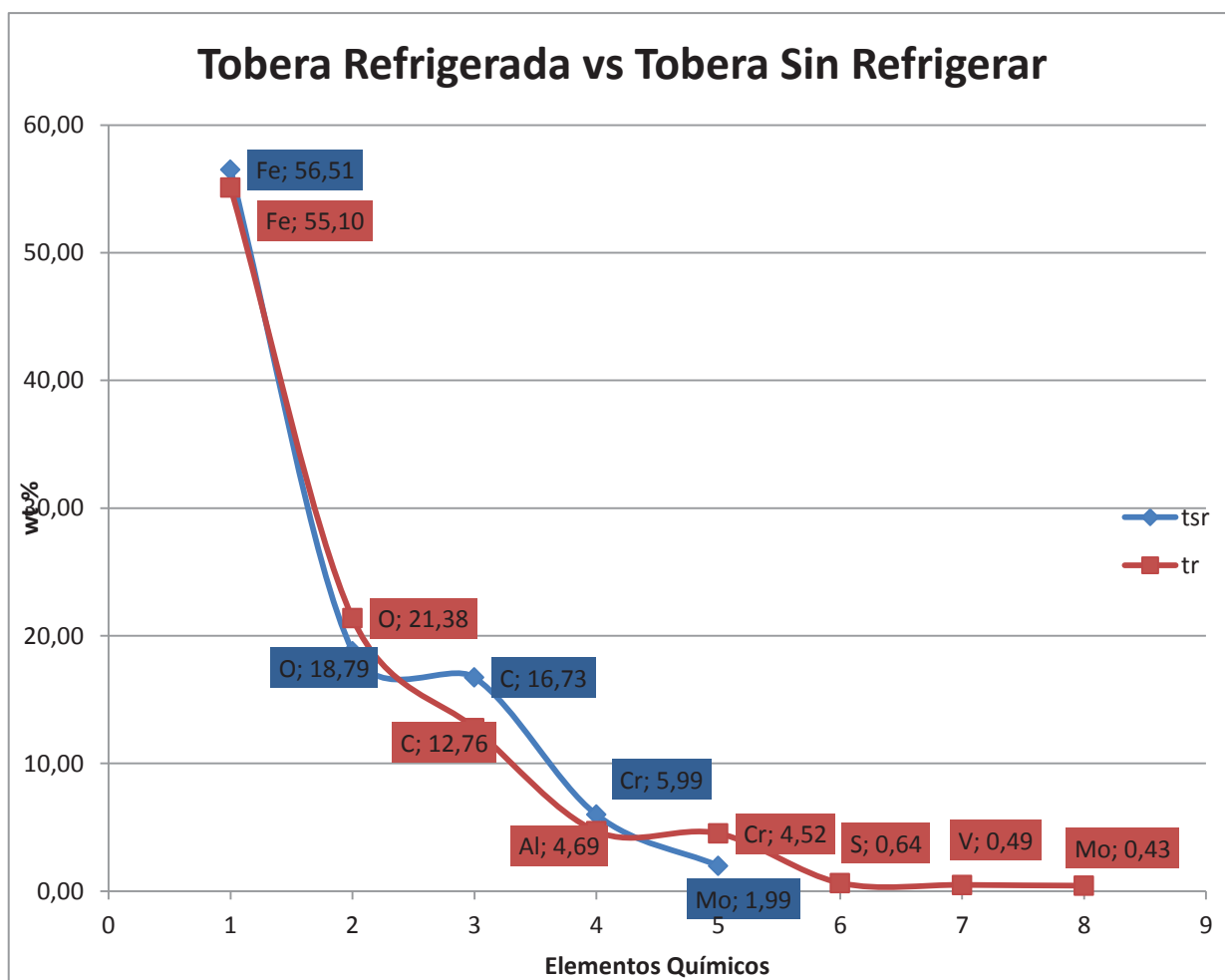


Figura 4. 25. Comparación de los elementos presentes en las toberas.

#### 4.3.2. VÁLVULAS DE ESCPAE CON PÉRDIDA DE MATERIAL Y SIN PÉRDIDA DE MATERIAL

Las sales fundidas formadas, tienen puntos de fusión a bajas temperaturas, estos depósitos son muy evidentes en el asiento de la válvula, la presencia del vanadio facilita que se debilite el material y sea susceptible a cualquier ataque de corrosión.



La microestructura en el asiento de la válvula es de estelite<sup>23</sup> debido a que aumenta la resistencia al desgaste. (Anexo G, figura G1), indica la microestructura con precipitados de carburo y una grieta en dirección transversal, producto de la corrosión en caliente debido a la acumulación de los depósitos en el asiento.

En el análisis químico se observa que el crecimiento de grano se demuestra por la elevada temperatura, producto de una corrosión a altas temperaturas (Anexo G, ver figura G2); esto provoca que las propiedades mecánicas disminuyan y mediante su funcionamiento repetitivo se presente la falla; con respecto a la válvula de escape sin presencia de pérdida de material, exhibe depósitos, pero sin llegar a la fractura, es significativo por sus horas de funcionamiento en el motor y las condiciones operativas de la misma, lo que presenta es un mal montaje y mala calibración.

En la figura 4.26, se tiene muy poco porcentaje en peso de cromo, resultado de la precipitación de los carburos, el contenido de vanadio en los dos casos son muy altos, este elemento debilita a ciertos materiales del motor Wartsila 12V32, disminuye las propiedades mecánicas; la presencia del sodio, oxígeno, significa que en el circuito de gases existe gran probabilidad de encontrar vanadato sódico en estado líquido, lo cual se propaga de forma acelerada la corrosión.

Con respecto a las horas de funcionamiento las toberas sin refrigerar tiene un horómetro de 5000 horas, mientras que las toberas refrigeradas tiene un horómetro de 1008 horas, en las mismas condiciones operativas de presión, temperatura y humedad, simplemente varia la ubicación de estos elementos mecánicos en diferentes unidades principales de la estación Cayagama (PS2).

---

<sup>23</sup> Ruiz, L. & Díaz, M. & Camero, S. (1994). *Influencia del procedimiento de aportación del Stellite-6 en la microestructura de un acero WCB y CA-15.*

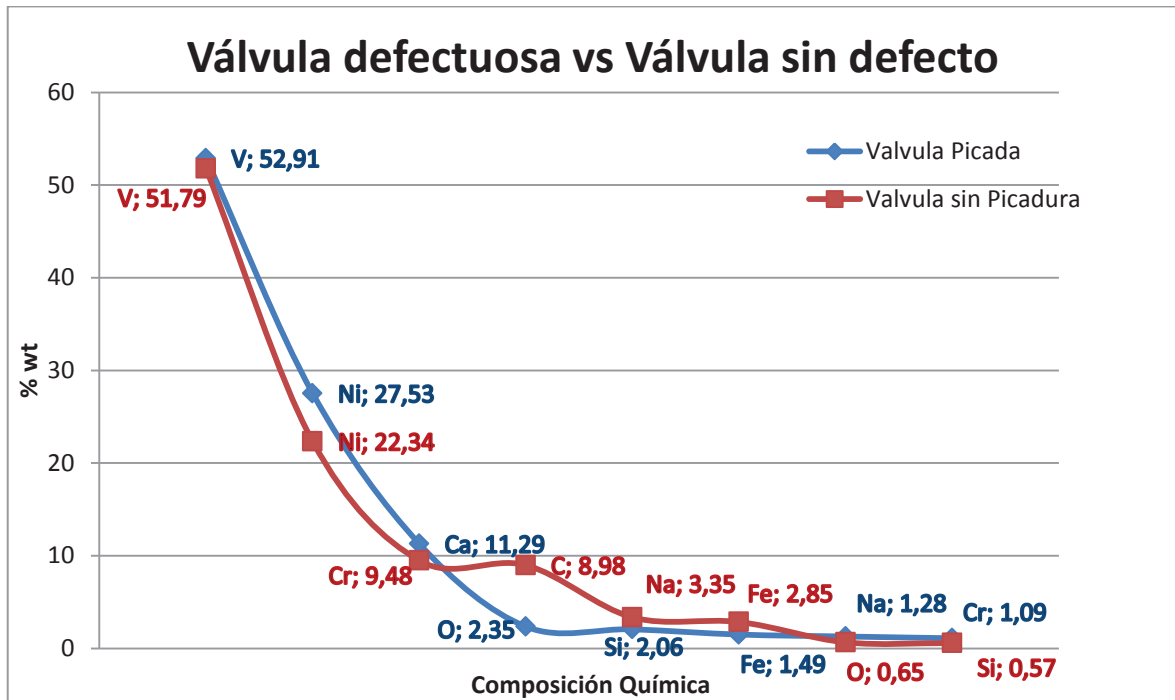


Figura 4. 26. Comparación de las válvulas de escape.

#### 4.3.3. ANILLO DE SEGURIDAD DE LOS ÁLABES DEL TURBOCARGADOR

Con el análisis metalográfico se tiene una estructura de acero al cromo- níquel- vanadio, que tiene una matriz austenítica con presencia de carburos de titanio precipitado e inclusiones de tipo silicato. (Anexo H, ver figura H1 y figura H2).

En la figura 4.27, se evidencia alto contenido de vanadio, después de una combustión, los gases de escape son reutilizados para generar más potencia, estos gases con vanadio impactan sobre la superficie del anillo, que es el fusible de los turbocargadores, implicando que el anillo sea el primero en fallar, de igual manera el vanadio fragiliza el material y la deposición de las sustancias contaminantes hace que el anillo en primera instancia tiende a flexionarse, después de un periodo de tiempo en funcionamiento se forma un esfuerzo cortante, generando fracturas en los puntos donde el material se ha perdido y disminuido sus propiedades de diseño. El anillo fracturado es posible que pueda funcionar un periodo muy pequeño de tiempo y posteriormente provocará la destrucción de los álabes y daño de los componentes del turbocargador.

En la microscopia indica el crecimiento de grano producto de la temperatura, con el análisis químico, existe marcas de río que afirma el inicio de la fractura frágil, al igual con el mapeo se presenta segregaciones de níquel, cromo y vanadio.

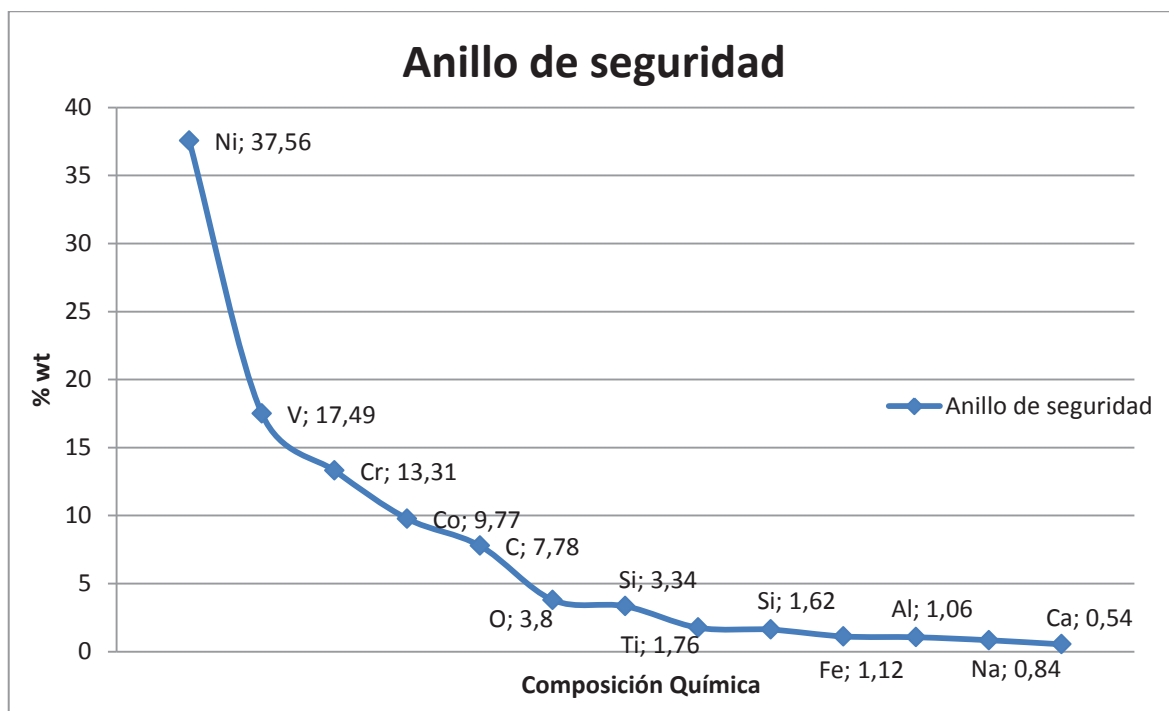


Figura 4. 27. . Porcentajes de los compuestos de un anillo de seguridad.

#### 4.3.4. CARACASA DE LOS TURBOCARGADORES DE LAS BOMBAS PRINCIPALES DE LAS ESTACIONES DE BOMBEO

La corrosión ocurre cuando el combustible está contaminado con una combinación de S, Na y V que forma sales de bajo punto de fusión que disuelve los óxidos de las superficies metálicas, favoreciendo el transporte de oxígeno y catalizando la corrosión por oxidación del metal.

La microestructura corresponde a una fundición maleable ferrítica con presencia de nódulos de grafito, con una morfología de corrosión – erosión, debido a los gases acelerados que son productos de la combustión, estos se mueven a elevadas temperaturas dentro del turbocargador.

Estas pequeñas partículas de sales fundidas suelen ser la causa de corrosión en caliente, las mismas que promueve el desprendimiento de las pequeñas partículas de grafito de la superficie del metal base.

Con el análisis de microscopía electrónica en la superficie corroída no muestra alteraciones en la composición química, sin embargo presenta el desprendimiento del grafito y la presencia de cavidades, ocasionando pérdida de las propiedades mecánicas en carcasa.

En la figura 4.28, indica los elementos después de que la carcasa llega a la falla por corrosión.

El cromo tiene un porcentaje en peso de cero, lo que significa que el diseño de la carcasa del turbocargador es menos resistente a los ataques de corrosión, el exceso de hierro, carbono y la microestructura se comprueba que la fundición es maleable. (Anexo I, ver figura I1).

El vanadio es cero, significado que ha reaccionado en su totalidad formando la sal corrosiva y el exceso de oxígeno para asegurar la formación del óxido de hierro.

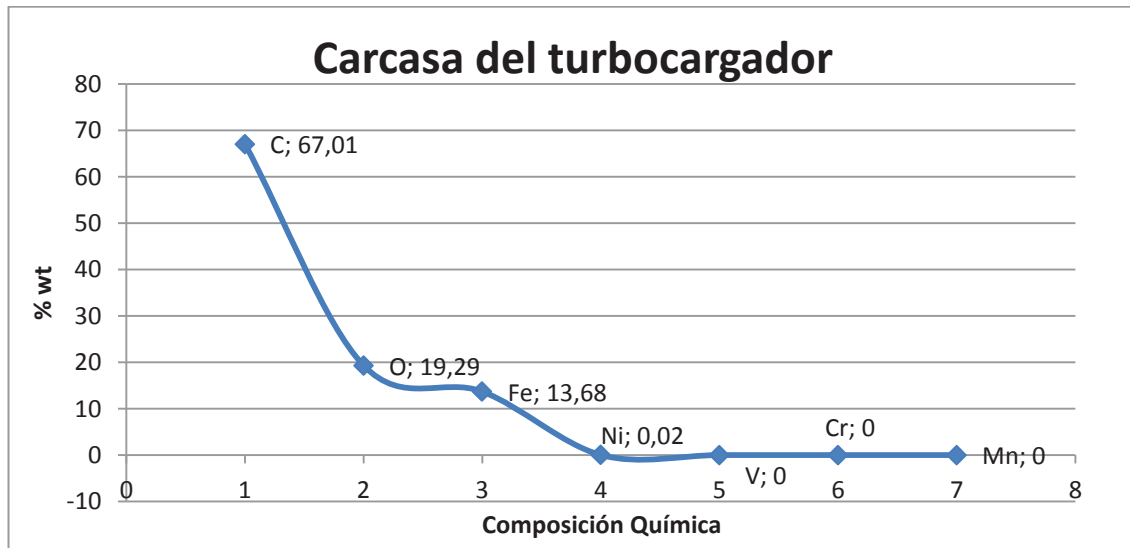


Figura 4. 28. Porcentajes de los compuestos de la carcasa del turbocargador.

#### 4.3.5. ANÁLISIS POR CHISPA A LA VÁLVULA CON PÉRDIDA DE MATERIAL Y TOBERAS REFRIGERADAS Y SIN REFRIGERAR

En la figura 4.29 se tiene un análisis por chispa donde las toberas refrigeradas y sin refrigerar contienen alto porcentaje de vanadio, la válvula que presenta una pérdida de material, tiene bajo contenido de hierro, debido a que se presenta una picadura en el asiento de la válvula, inducido por las sales corrosivas y las altas temperaturas que extiende la corrosión.

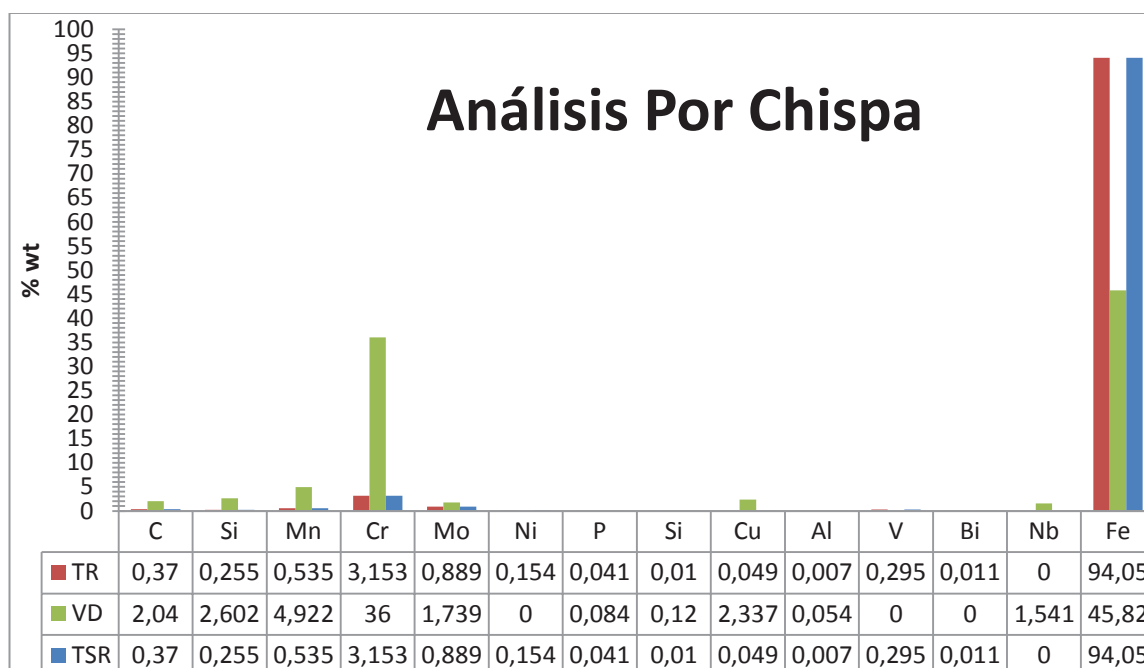


Figura 4. 29. Porcentajes de los compuestos presentes en las toberas y en la válvula con pérdida de material.

Los demás elementos químicos de las toberas tienen el mismo porcentaje, lo cual se puede decir que en las dos toberas, si presenta los precipitados de carburos de cromo. Pero el material base de la tobera refrigerada es atacada por las sales fundidas y parte de material tipo níquel (láminas blancas) queda libre de este ataque. (Anexo I, ver figura I2).

#### 4.3.6. ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X A LOS DÉPOSITOS

La figura 4.30, determina que el hollín extraído de un motor de la unida principal tiene alto contenido de vanadio, por lo tanto se está formando las sales corrosivas, también existe el contenido de sodio, con una relación de 1 a 3, lo cual se demuestra la existencia de la corrosión por sales fundidas.

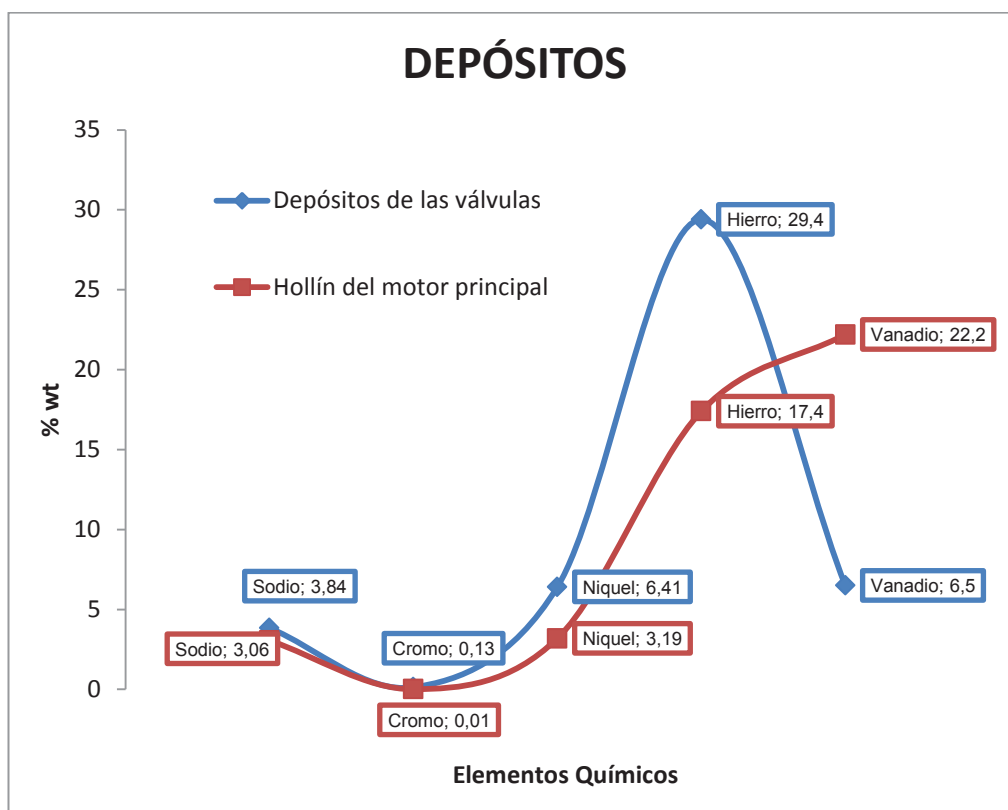


Figura 4. 30. Porcentajes de los compuestos de los depósitos.

#### 4.3.7. ANÁLISIS DE COSTOS

Para el análisis de costos se considera que el caudal actual es 150 MBPD y el caudal a futuro se estima en 230 MBPD para el año 2018 y un consumo de crudo combustible de 245.280 BBL/ año. En lo cual el estudio del aditivo determina que la relación de combustible/aditivo más efectiva es 3000 a 1, es decir por cada 3000 barriles de crudo se debe colocar 1 barril de aditivo, por ende la cantidad de aditivo es igual 81.76 BBL, el costo aproximado sería 406.392,00 USD/anales.

Hay que destacar que el uso del aditivo en los motores de combustión interna no eliminara los efectos de la corrosión, pero protegerá las válvulas de escape, toberas, anillos de seguridad de los álabes de los turbocargadores y la carcasa.

#### 4.3.7.1. Mantenimiento actual

Para un mantenimiento sin aditivo, el costo de las toberas refrigeradas son 285,00 USD, anillo de los álabes de seguridad 350,00 USD, carcasa 45.000,00 USD y válvula de escape 714,00 USD.

Las toberas refrigeradas tienen un costo total de 20.520,00 USD/año en todos los motores del oleoducto, considerando que se cambia una vez al año a las 2000 horas. La carcasa tiene un costo de mantenimiento de 198.000,00 USD/año; se cambia cada 10 años. El anillo de los álabes de seguridad cuesta 1.400,00 USD/año y se cambia cada 6 años solo en la estación de Páramo. El costo de las válvulas es 12.852,00 USD/año de todo el oleoducto y se cambia cada 8 años.

Entonces el costo total de reparación de componentes más la mano de obra es 279.326,40 USD/año.

Tabla 4. 18. Costo de mantenimiento actual.

|                                     |          |              | Mantenimiento actual     |                          |                    |         |               |
|-------------------------------------|----------|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|---------|---------------|
| Item                                | Unidades | Costo        | Cambios Mtto sin aditivo | Periodo de cambio (años) | Cantidad a cambiar | Motores | Costo anual   |
| Toberas                             | EA       | \$ 285.00    | 1                        | 0.5                      | 12                 | 6       | \$ 41,040.00  |
| Alambre de álabes                   | EA       | \$ 350.00    | 1                        | 6                        | 4                  | 6       | \$ 1,400.00   |
| Válvulas de escape                  | EA       | \$ 714.00    | 1                        | 8                        | 24                 | 6       | \$ 12,852.00  |
| Carcasa de turbo                    | EA       | \$ 45,000.00 | 1                        | 10                       | 2                  | 22      | \$ 198,000.00 |
| Factor de mano de obra              | NA       | 1.2          | -                        | -                        | -                  | -       | -             |
| Aditivo                             | Gal      | \$ 118.00    | -                        | -                        | -                  | -       | -             |
| <b>Costo total de repuestos</b>     |          |              |                          |                          |                    |         | \$ 253,292.00 |
| <b>Costo total de mantenimiento</b> |          |              |                          |                          |                    |         | \$ 303,950.40 |

Elaboración Propia.

#### 4.3.7.2. Mantenimiento con aditivo en el combustible

Para un mantenimiento con aditivo, se asume, que alargaría la vida de los componentes tres veces más que la vida actual, en base a esta premisa los costos son los siguientes: en toberas refrigeradas son 6.840,00 USD/año, considerando que se cambia a las 6000 horas, el costo de la carcasa sería de 1'980.000,00 USD/30 años, entonces se obtiene un costo de 66.000,00 USD/año, el anillo de seguridad de los álabes cuesta 8.400,00 USD/18años, dando un valor de 466,66 USD/ año, el costo de la válvula de escape es de 4.284,00 USD/año.

Entonces un costo de mantenimiento de repuestos, más la mano de obra de 93.108,8 USD/año y el mantenimiento más el aditivo es 499.500,80 USD/año.

Tabla 4. 19. Costo de mantenimiento con aditivo.

| Item                                | Unidades | Costo        | Mantenimiento con aditivo |                          |                    |         |               |
|-------------------------------------|----------|--------------|---------------------------|--------------------------|--------------------|---------|---------------|
|                                     |          |              | Cambios Mto con aditivo   | Periodo de cambio (años) | Cantidad a cambiar | Motores | Costo anual   |
| Toberas                             | EA       | \$ 285.00    | 1                         | 3                        | 12                 | 6       | \$ 6,840.00   |
| Alambre de álabes                   | EA       | \$ 350.00    | 1                         | 18                       | 4                  | 6       | \$ 466.67     |
| Válvulas de escape                  | EA       | \$ 714.00    | 1                         | 24                       | 24                 | 6       | \$ 4,284.00   |
| Carcasa de turbo                    | EA       | \$ 45,000.00 | 1                         | 30                       | 2                  | 22      | \$ 66,000.00  |
| Factor de mano de obra              | NA       | 1.2          | -                         | -                        | -                  | -       | -             |
| Aditivo                             | Gal      | \$ 118.00    | 1                         | 1                        | 3654               | -       | \$ 431,172.00 |
| <b>Costo total de repuestos</b>     |          |              |                           |                          |                    |         | \$ 508,762.67 |
| <b>Costo total de mantenimiento</b> |          |              |                           |                          |                    |         | \$ 610,515.20 |

Elaboración Propia.



#### 4.3.7.3. Mantenimiento con recomendaciones de cambio de frecuencia y componentes

Se propone un nuevo mantenimiento donde los costos de los componentes son los mismos y se considera que las toberas son sin refrigeración.

El costo de las toberas sin refrigeración son 6.848,00 USD/año y se cambiaría a las 6000 horas; la carcasa tienen un costo de 132.000,00 USD/año y se cambiaría cada 15 años, considerando que se añade una limpieza con un costo de 4.386,00 USD, el costo del anillo de seguridad de los álabes es 840,00 USD/año, se reemplazaría cada de 10 años y el costo de las válvulas de escape es 12.852,00 USD/año, su reemplazo se realizará cada 8 años.

El costo total de reparación de los componentes y la mano de obra son 185.678,00 USD/año.

Tabla 4. 20. Costo de mantenimiento con cambios de frecuencia y componentes.

|                                     |          |              | Mantenimiento con cambios de frecuencia y componentes |                          |                    |         |               |
|-------------------------------------|----------|--------------|---|--------------------------|--------------------|---------|---------------|
| Item                                | Unidades | Costo        | Cambios Mtto con aditivo                              | Periodo de cambio (años) | Cantidad a cambiar | Motores | Costo anual   |
| Toberas                             | EA       | \$ 285.00    | 1   | 3                        | 12                 | 6       | \$ 6,840.00   |
| Alambre de álabes                   | EA       | \$ 350.00    | 1   | 10                       | 4                  | 6       | \$ 840.00     |
| Válvulas de escape                  | EA       | \$ 714.00    | 1   | 8                        | 24                 | 6       | \$ 12,852.00  |
| Carcasa de turbo                    | EA       | \$ 45,000.00 | 1   | 15                       | 2                  | 22      | \$ 132,000.00 |
| Factor de mano de obra              | NA       | 1.2          | -   | -                        | -                  | -       | -             |
| Aditivo                             | Gal      | \$ 118.00    | -   | -                        | -                  | -       | -             |
| <b>Costo total de repuestos</b>     |          |              | \$ 152,532.00   |                          |                    |         |               |
| <b>Costo total de mantenimiento</b> |          |              | <b>\$ 183,038.40</b>                                  |                          |                    |         |               |

Elaboración Propia.

#### 4.4. ANÁLISIS FINAL DE RESULTADOS

La corrosión a altas temperaturas es un mecanismo de corrosión que se produce en las turbinas de gas, motores diésel u otras maquinarias que entra en contacto con el gas caliente que contiene ciertos contaminantes. La corrosión de altas temperaturas incluye la oxidación a alta temperatura, la sulfatación y carbonización.

El combustible contiene compuestos de vanadio o sulfatos que pueden formar compuestos durante la combustión, que tiene un punto de fusión bajo. Estas sales fundidas líquidas son fuertemente corrosivas para el acero inoxidable y otras aleaciones.

La velocidad de la corrosión bajo sales fundidas se incrementa con el aumento de la temperatura, debido a la fusión de los vanadatos de sodio que tienen puntos de fusión bajos.

Los aceros martensíticos, cuando están sometidos a unas temperaturas entre 450°C a 850°C sufren precipitaciones de carburos de cromo en los contornos de grano. La abundante precipitación de carburos en las válvulas de escape, toberas refrigeradas y sin refrigerar, anillo de los álabes de seguridad y carcasa del turbocargador produce una disminución del contenido de cromo alrededor de los bordes, provocando disminución en la resistencia a la corrosión.

La presencia de sodio en una proporción de 1:3 da el punto de fusión más bajo y debe ser evitado. Este punto de fusión 535 °C puede causar problemas en los puntos calientes del motor como cabezas de los pistones, asientos de válvulas y turbocompresores.

La falla de las toberas refrigeradas y sin refrigerar, se debe a que microestructuralmente no son homogéneas, es decir tienen diferentes tipos de microestructuras. En una zona corroída de la tobera refrigerada presenta una microestructura de martensita con material de tipo níquel alargado, la cual es atacado por la corrosión en caliente, otra zona que no está afectada tiene una microestructura tipo martensítica con carburos de cromo precipitados.

Mediante las horas de funcionamiento de las toberas refrigeradas y sin refrigerar en las condiciones operativas de la estación de bombeo de PS2, se tiene que las toberas refrigeradas se cambian a las 1081 horas de funcionamiento, presentado un grave deterioro por corrosión en caliente, tanto en la parte superficial y en la parte interna con pérdida de material, debido a la precipitación de los carburos y la influencia de los contaminantes en el combustible; presenta una variación de dureza significativa, mientras que en las toberas sin refrigeración, se cambiaron a las 5016 horas de funcionamiento; en su microestructura presentaba un ligero desgaste con pérdida de material interna y superficialmente, su dureza no variaba con respecto a las toberas refrigeradas y presentaba los contaminantes de las sales de corrosión que se formaron a bajos puntos de función.

En los anillos de seguridad de los álabes del turbocargador presentan fracturas en diferentes partes, inicialmente son causadas por los impactos del vanadio hacia el anillo, provocado por la mala combustión y el proceso de corrosión en caliente. La acumulación de vanadio en la superficie del anillo, hace que se debilite el material, originando en ciertos puntos del anillo los concentradores de esfuerzos que sumado a la disminución en la sección transversal del elemento provoca la falla del mismo.

La falla de la carcasa es producida por la alta temperatura y por el movimiento acelerado de las partículas suspendidas en los gases de combustión, causando el proceso de corrosión erosión, las partículas corrosivas presentes en los gases de combustión golpean el material y arrastran gran parte del mismo, ocasiona pérdida de espesor y debilitando el material de la carcasa del turbocargador.

Los depósitos se analizaron mediante difracción de rayos X, encontrándose altos contenidos de compuestos cristalinos aluminosilicatos, sulfato de calcio, óxido de hierro, finalizando con sales de sodio y vanadio.

Mediante análisis químico se determina altos contenidos de vanadio, hierro, níquel y sodio en los depósitos de las muestras, es evidente que en el hollín del motor se encuentran contenidos de vanadio, los mismos que unidos al sodio, forman las sales causantes de la corrosión en caliente.

Las partes metálicas de los motores en la sección de la cámara de combustión como: las válvulas de escape, toberas o inyectores, pistones están sufriendo corrosión en caliente, de igual manera los elementos del turbocargador y la carcasa de la misma.

Debido a la baja presión de succión y la baja carga en PS1 y PS2, los daños son evidentes en las toberas y las válvulas de escape. Mientras que en PS3 se tiene carga y presión ideal, por lo tanto los daños se presentan en los múltiplos de escape. Como en PS4 se tiene una presión operativa ideal, pero trabaja a baja carga, los daños se presentan en los turbocargadores.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

La corrosión en caliente es la causante del daño de los componentes de post-combustión del motor Wartsila 12V32 de las estaciones de bombeo de OCP, atacando radicalmente a válvulas de escape, toberas de inyección de combustible. Los contaminantes del crudo combustible y las elevadas temperaturas en la cámara de combustión, hace que los materiales pierdan sus propiedades mecánicas y provoque la falla, en los álabes de seguridad y carcasa de los turbocargadores, consiguiendo paradas de bombeo inesperadas.

Cambiar las condiciones operativas de las unidades principales, con ello se evitará la presencia de la corrosión en frío, debido a las prolongadas paradas de los motores, mejorara la combustión y se reducirá la acumulación de los depósitos contaminantes, evadiendo el desgaste por corrosión – erosión.

Modificar la geometría del turbocargador, ayudara a que no exista puntos donde se generen turbulencias de gases y evitará el desprendimiento de material. La variación en la temperatura de la cabeza de las toberas refrigeradas, acumula depósitos por efecto de una mala combustión, obteniendo la pérdida del material por corrosión en caliente y en tiempos muy cortos. Por lo tanto las toberas sin refrigeración, presenta temperaturas uniformes, con menos desgaste y con más horas de funcionamiento.

Cambiar la frecuencia de mantenimiento como, la limpieza de los depósitos de las sales que se encuentran acumulados en el interior de la carcasa, el cambio del anillo de los álabes, se logrará evitar costos operativos mayores y prolongar la vida útil de los motores Wartsila.

Buscar el método físico – químico (aditivo) que reaccione con el crudo combustible, neutralizando a los agentes corrosivos que se encuentran en el

crudo, antes de ingresar a los motores de las unidades principales, con la finalidad de evitar la formación de sales contaminantes con bajo punto de fusión y que se acumulen en el interior del motor y reducir la corrosión en caliente.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

Mediante la investigación que se realizó a diferentes elementos mecánicos de las unidades principales de bombeo, se define que el problema principal de desgaste con pérdida de material, son los contaminantes corrosivos que contiene el combustible, para lo cual se recomienda que el combustible tenga un tratamiento antes de ingresar a los motores principales, como la adición de un aditivo en base de magnesio, lo cual resguarde a los elementos que entran en contacto con las sales corrosivas, de la corrosión a elevadas temperaturas y corrosión en frío.

Por los análisis obtenidos y sus horas de funcionamiento, es mejor cambiar en las estaciones de PS1 y PS2, las toberas refrigeras por las toberas sin refrigeramiento, porque tienen más horas de funcionamiento y presentan poco daño en pérdida del material internamente como externamente. Recomiendo que se utilicen las toberas sin refrigerar hasta las 6000 horas, debido a que en 5000 horas no hay pérdida significativa de material ocasionado por la corrosión y tampoco pérdida de material de los orificios de atomización del combustible.

Como en la carcasa se almacenan los depósitos de las sales corrosivas, se debe programar una limpieza de los turbocargadores, antes de iniciar la operación y después que el motor entre a estado de stand-by, para evitar diferentes tipos de corrosión que se producen cuando el equipo permanece sin operar por largo tiempo.

Con respecto al anillo de seguridad de los álabes, se advierte que puede funcionar por un corto tiempo después de estar fracturado, pero es preferible que en el mantenimiento de 20000 horas se realice el cambio del anillo y también sugiero un tiempo de limpieza cada 4000 horas.

## BIBLIOGRAFÍA

### LIBROS:

- [1] ASKELAND, D. (1998). *Ciencia e Ingeniería de Materiales*. Tercera Edición. México.
- [2] OTERO, E. (2012). *Corrosión y degradación de materiales*. Madrid. España: Editorial Síntesis S.A.
- [3] SHACKLFORD, J. (2006). *Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros*. Sexta Edición. Madrid. España: Autor.
- [4] SHIGLEY, J. & MISCHKE, C. (2002). *Diseño de Ingeniería Mecánica*. Sexta Edición. México: McGraw-Hill.
- [5] SYDNEY, A. (1998). *Introducción a la Metalurgia física*. Segunda Edición. México: McGraw-Hill.

### PUBLICACIONES:

- [1] ALONSO, J. (1995). *Estudio y comparado de la estabilización de ocho objetos del yacimiento medieval de Medina Elvira*. Granada: Autor.
- [2] BERTOMUE, Rb. (1997). *El fuelóleo y sus efectos corrosivos en la combustión industrial*. España: Autor.
- [3] BORNSTEIN, N., & ROTH, H., & PIKE, R. (1993). *Vanadium corrosion studies*. Autor.
- [4] CEVALLOS, C. & CARRILLO, C. (2010). *Estudio Mediante Un Modelo Matemático De Las Deformaciones Generados Por El Colado En Gel Metálico De Piezas Protéticas*. Tesis de grado (Ingeniero Mecánico). Quito Ecuador: Autor.
- [5] CUBILLOS, L. & MERA, J. (2012). *Desarrollo de estándares de calidad en producción de recubrimiento por termorociado de acero eléctrico y HVOF*

- en la empresa IMETCA. Tesis de grado (Ingeniero Mecánico). Quito Ecuador: Autor.*
- [6] CUESTA, F. (2009). *Análisis del fenómeno de corrosión en materiales de uso técnico.* Autor.
- [7] CUEVAS, C. & URUCHURTU, J. & PORCADO, J. (2004). *Study of molten SALT corrosion of HK-40m alloy applying linear polarization resistance and conventional weight loss techniques.* Corrosion Science. Autor.
- [8] ESTRADA, J. (2008). *Caracterización estructural y morfología de películas delgadas de TiO<sub>2</sub> depositadas por RF-SPURTTTERING sobre acero inoxidable 304.* Altamira Tamaulipas. Autor.
- [9] ESTUPIÑAN, P., & MAFLA, D. (2010). *Proyecto de optimización del proceso de combustión de las unidades principales de OCP.* Quito, Ecuador: Autor.
- [10] ESTUPIÑAN, P., & PAZMIÑO, M. (2010). *Informe técnico análisis de falla.* Quito, Ecuador: Autor.
- [11] JUSSI, L., & JORMA, J. (2004). *Corrosion studies with a new laboratory-scale system simulating large- scale diesel engines operating with residual fuels.* Finland: Wartsila & VASSA. Autor.
- [12] JUSSI, L., & JORMA, J. (2002). *The effect of Mg-based additive on aerosol characteristics in medium-speed diesel engines operating with residual fuel oils.* Finland: VTT. Autor.
- [13] NIÑO, C., & DIAZ, W. (2005). *Evaluación de la corrosión en caliente por método electroquímico de un acero AISI 304 H en presencia del óxido de níquel como inhibidor.* Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Autor.
- [14] OCP, ECUADOR S.A. (2003). *Manual de operación del Oleoducto de Crudos Pesados.* Quito, Ecuador: Autor.



- [15] POSADA, B., & BETANCOURTH, D. (2007). *Protección contra la corrosión en sales fundidas de un acero por rociado térmico con una aleación níquel-cromo en el rango de temperatura de 500°C-650°C*. Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.
- [16] Ruiz, L. & Díaz, M. & Camero, S. (1994). *Influencia del procedimiento de aportación del Stellite-6 en la microestructura de un acero WCB y CA-15*. Autor.
- [17] TIWARI, S., & PRAKASH, S. (1988). *Magnesium oxides as inhibitor of hot oil ash corrosion*. Materials Science and Technology. Autor.
- [18] URPI, J. (2008). *Tecnología y margen de refine del petróleo*. Madrid. España: Autor.
- [19] Wartsila, Ecuador. (2003). *Manual de operación y mantenimiento del motor Wartsila 12V32*. Quito, Ecuador: Autor.
- [20] WONG, M. (1989). *Investigación sobre corrosividad a lata temperatura de depósitos de cenizas de aceite residual de petróleo con altos contenidos de V, S, y Na*. X International conference in materials technologic. Autor.

#### INTERNET:

- [1] Sánchez, S. (2012). Principios de corrosión. Obtenido de: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/2012/07/24/9-principios-de-corrosion/>
- [2] Pruebas de corrosión. (2010). Obtenido de: <http://www.corrosionlab.com/papers/erosion-corrosion/erosion-corrosion.htm>
- [3] Funcionamiento del motor Wartsila 12V32 LN. (2006). Obtenido de: <http://www.wartsila.com/en/oil-gas-references/ocp-reference>
- [4] Calle, G. & Henao. (2009). *Laboratorio de resistencia de materiales, guía práctica*. Pereira. Obtenido de: <http://www.utp.edu.co/~gcalle/Contenidos/DurezaHR.htm>

- [5] Corrosion en válvulas de escape y turbocompresores. (2004). Obtenido de: <http://www.ingenierosnavales.com/docurevista/COMBUSTIBLES%20JUNIO%202004.pdf>
- [6] Resistencia a la corrosión en caliente. (2013). *Tooling University*. Obtenido de: <https://www.toolingu.com/definicion-501255-139019-resistencia-a-la-corrosion-en-caliente.html>
- [7] ROBERGE, P. (1999). *Handbook of Corrosion Engineering*. 2ª Ed. Nueva York. ISBN: 0-07-076516-2. Obtenido de: <http://www.atmosferis.com/corrosion-en-bombas/>
- [8] Sánchez, B. *Corrosión de alta temperatura tubo de los generadores de vapor en centrales termoeléctricas*. Obtenido de: <http://www.monografias.com/trabajos94/corrosion-paneles-tubos-centrales-termoelectricas/corrosion-paneles-tubos-centrales-termoelectricas.shtml>

## **ANEXOS**

## ANEXO A

### A.1. INVESTIGACIÓN DE CORROSIÓN EN VÁLVULAS DE ESCAPE

|   |
|---|
| <b>Título:</b>  |
| Estudios de corrosión con un nuevo sistema a escala de laboratorio simulando motores diésel de gran escala que operan con combustibles residuales. Parte I  |
| <b>Autores:</b>   |
| Jussi Lyrranen, Jorma Jokiniemi<br>Esko I. Kauppinen, Aulis Silvonen  |
| <b>Fuente:</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• VTT Procesos, Aerosol Technology Group, P.O. Caja 1401, FIN-02044 VTT, Finlandia</li> <li>• Wartsila Ltd., P.O. Caja 244, FIN-65101 Vasa, Finlandia</li> </ul>   |
| <b>Ámbito de aplicación:</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• En los motores diésel de tipo de centrales eléctricas.</li> <li>• En los motores diésel que operan con combustible pesados.</li> </ul>   |
| <b>Técnicas utilizadas:</b>   |
| Se utilizaron partículas de cenizas sintéticos (SAP) generadas por métodos de aerosol y el sistema de alimentación de gas, una entrada caliente, un reactor de flujo laminar de tres zonas (LFR) horno y un aparato de deposición de la corrosión (DCA). Todo este proceso fue aplicado a una superaleación llamado NIMONIC 80 A. También se analizó con partículas de ceniza sintética y alimentación de SO <sub>2</sub> (g). Luego de los ataques químicos se realizó un análisis comparativo de las muestras de laboratorio y en campo; con sus respectivos análisis metalográficos. |
| <b>Breve Resumen:</b>   |
| Se tiene motores estacionarios que funcionan con crudo combustible, en lo cual dicho combustible tienen gran cantidad de azufre. Este combustible ataca de manera grave aciertos elementos. La temperatura en la superficie del asiento de la válvula de escape es de 700-800 °C. Los cuales pueden formar  |

depósitos de bajo punto de fusión, que consiste principalmente de vanadylvanadato de sodio y sulfatos de sodio. Por lo tanto, uno de los factores más importantes que controlan la corrosión de vanadio-inducida puede ser la tasa de flujo de contaminante, los depósitos consistieron principalmente en vanadatos de sodio fundido y que no se encontró sulfato de sodio por encima de 650 C. La corrosión en caliente a altas temperaturas, se han concentrado principalmente en sulfato de sodio.

Para Nimonic 80 A se estudió con queroseno dopado con azufre (2,5-5 peso. %), Sodio o vanadio (ambos 10-40 ppm), se concluyó que en 600 C, el azufre dopado a la queroseno reacciona con el cromo, en la aleación para formar sulfuro de cromo y el cromo se agotan.

A temperaturas más altas (700 C), una fusión eutéctica se forma el queroseno dopado con azufre y el azufre no puede escapar a la atmósfera. También se argumenta que el aumento del nivel de azufre en el fuel oil se incrementará la actividad  $V_2O_5$  en depósito de sal.

Una cuestión fundamental en la propagación de la corrosión fue la definición de la profundidad de la picadura de corrosión y el espesor de la capa inferior, porque se incrementa con la temperatura de 26  $\mu\text{m}$  en 700°C y 87  $\mu\text{m}$  en 750 °C. La alimentación de  $\text{SO}_2$  (g) causó una clara diferencia entre sólo la alimentación de SAP y  $\text{SO}_2$  (g) con SAP de alimentación a 700 C. Una zona de "islas negras" (15-33 S, 8-38 Cr, Ti 6-58 y 10-54 de Ni, en peso. %) se encontraron sólo en las muestras tanto con  $\text{SO}_2$  (g) y en SAP. Esto indicaba la presencia de reacciones de sulfuración interna. La composición de estas islas sugirió que se componen de un tipo de "mixto" de sulfuro de ((Cr, Ti, Ni)  $\text{S}_x$ ). Sin embargo, algunas de estas islas eran notablemente diferente de los otros que consisten de 26 Cr, Ti 37, 26% en peso de O, siendo el resto V y Ni.

La corrosión en 700 C con  $\text{SO}_2$  (g) y en SAP fue más pronunciado que con sólo la alimentación de SAP; esto puede ser causado por el azufre que puede aumentar la actividad de los compuestos de vanadio  $V_2O_5$  principalmente y por lo tanto mejorar la corrosión por el transporte sólido / gas promovida por rastro de V en la red cristalina de óxido. Por lo tanto, el proceso de corrosión parece

|   |
|---|
| ser una sulfuración vanadio inducida / acelerada.   |
| <b>Aspectos de interés:</b>   |
| La superaleación de Nimonic 80 A, contiene: 20 Cr, Fe 3.0, 2.4 Ti, Al 1.4, Si 1.0, C 0.1 y Ni como el equilibrio (% en peso)).  |
| Se analizó una válvula de escape a partir de una prueba de resistencia de campo de 8600 h, en donde se observó que contiene mucho más de Ni (alrededor de 70-80% en peso) y menos de Ti (alrededor de 5% en peso) y S (aproximadamente 5-10% en peso).  |
| Las tasas de desperdicio de metal eran cerca de 30 veces mayor en las pruebas de campo. La comparación de los resultados de este estudio para Nimonic 80 A en 700 C, es de 85-90- $\mu$ m en picadura de corrosión a 144 h.   |
| El tamaño de los orificios en el experimento fue diseñado de modo que la eficacia de deposición sería un máximo de 1-2 $\mu$ m tamaño.  |
| Para el experimento la cantidad de flujo de aire corresponde a aproximadamente el 13% de O <sub>2</sub> en la fase de gas, que es la misma cantidad detectada en los gases de escape de los motores diésel sobrealimentados (presión de (O <sub>2</sub> ) = 0,13 atm, presión (SO <sub>2</sub> ) = 7,0* 10 <sup>-4</sup> atm,(N <sub>2</sub> ) = 0,87 atm). |

## A.2. INVESTIGACIÓN DE LA MORFOLOGÍA Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS DEPÓSITOS

|  |
|--|
| <b>Título:</b>   |
| Estudios de corrosión con un nuevo sistema a escala de laboratorio simulando motores diésel de gran escala que operan con combustibles residuales<br>Parte II. Características de las partículas y el depósito |
| <b>Autores:</b>  |
| Jussi Lyrranen, Jorma Jokiniemi<br>Esko I. Kauppinen, Aulis Silvonen   |
| <b>Fuente:</b>   |

|  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• VTT Procesos, Aerosol Technology Group, P.O. Caja 1401, FIN-02044 VTT, Finlandia</li> <li>• Wartsila Ltd., P.O. Caja 244, FIN-65101 Vasa, Finlandia</li> </ul>  |
| <b>Ámbito de aplicación:</b>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• En los motores diésel de tipo de centrales eléctricas.</li> <li>• En los motores diésel que operan con combustible pesados.</li> </ul>  |
| <b>Técnicas utilizadas:</b>  |
| <p>Se utilizaron técnicas analíticas de microscopía electrónica y microscopía electrónica de barrido. Antes de realizar estos ensayos las muestras se almacenaron en un ambiente seco y limpio para evitar la contaminación de la muestra. Previamente al análisis SEM/EDS, las muestras se almacenaron en un vacío durante la noche para asegurar que la cantidad de los gases adheridos a la superficie sean mínimos.</p> <p>El análisis de los depósitos se los realizaron en tres zonas: la base, el centro y la parte superior, para establecer diferentes morfologías y composiciones.</p> <p>El equipo utilizado para el análisis fue un microscopio electrónico de barrido digital. El analizador EDS montado en el SEM detector, con software tipo 4. La tensión de funcionamiento del SEM durante el análisis fue de 12KV, la distancia de trabajo fue de 13mm que proporciona un ángulo de 32 a 33° entre el detector y el plano de la muestra.</p> |
| <b>Breve Resumen:</b>  |
| <p>La investigación de la composición de los depósitos formados en la superficie de la aleación de Nimonic 80 A, previamente expuestas a las partículas simuladas a gran escala de ceniza de combustible diésel y el flujo de gas. También se estudió la morfología y la composición química de las partículas de ceniza diésel sintético, para entender las características de las partículas como cambian cuando se depositan en la superficie de las muestras.</p> <p>Se dice que las concentraciones en masa de las partículas no dependen en la composición de la alimentación, es decir cuando se tiene la alimentación de partículas de ceniza sintética sin SO<sub>2</sub> (g), las concentraciones totales de masa de las partículas eran ente 5% y 19% más pequeño que las concentraciones con alimentación de SO<sub>2</sub> (g).</p>   |

Esto indica claramente el efecto de la alimentación de  $\text{SO}_2$  (g) y la temperatura sobre la concentración en masa. La disminución rápida de la temperatura después de la dilución frío causó la condensación de  $\text{SO}_3$  (g) como ácido sulfúrico y también fue visto como un aumento en la concentración de masa. Por otra parte, las partículas contienen hasta un 26 en peso. % V, que lo más probable es  $\text{V}_2\text{O}_5$  debido a la atmósfera altamente oxidante.  $\text{V}_2\text{O}_5$  puede actuar como un catalizador para la formación de  $\text{SO}_3$  (g). Además se observaron pequeñas partículas esféricas de 70-90 nm de tamaño, que se formó por la nucleación de ácido sulfúrico.

Análisis EDS de las partículas de ceniza diésel reales producidos en el motor diésel de gran escala operativo con HA- HFO indicaron que las partículas de 0.1  $\mu\text{m}$  en tamaño aerodinámico, contenía S 9-17, 18-40 V, 33-50 O, Na 1- 4 y 0-5 Ni dé % en peso. La composición de estas partículas es similar a los producidos en este sistema a escala de laboratorio. Debido a que casi ninguna azufre se encontró en las pilas de depósito, en contraste con la alta concentración de S que se encuentra en las partículas, se confirmó la idea de que S como  $\text{SO}_2$  (g) /  $\text{SO}_3$  (g) puede ser transportado a través de la pila de depósito en la muestra del material base. Algunas reacciones de  $\text{SO}_2$  (g) /  $\text{SO}_3$  (g) se puede producir en el depósito para formar sulfato de sodio. Cuando S como  $\text{SO}_2$  (g) /  $\text{SO}_3$  (g) se depositaron en el material base, se hace reaccionar para formar ricos en S, Cr, Ti, con hasta aproximadamente 30% en peso de S formando un frente a la corrosión.

#### **Aspectos de interés:**

En el caso sin  $\text{SO}_2$  (g) con el reactivo de  $\text{V}_2\text{O}_5$  es posible que haya un poco de humedad y los balances de masa se corresponderían.

En los casos que el oxígeno sea deficiente, no puede haber bajos compuestos de vanadio contenido en el  $\text{VO}_2$ . La composición de las partículas en el caso de sin  $\text{SO}_2$  (g) sugirió que V no se oxida completamente en  $\text{V}_2\text{O}_5$ , ya que no había partículas con una composición donde la especie dominante es el  $\text{VO}_2$ . En algunos casos, todavía había muy poco O, sin embargo, se supuso que todo el V presente en las partículas se formará  $\text{VO}_2$ . También hubo casos en los que la cantidad de O era demasiado alta a pesar de que todos los V se



transformaron para formar  $V_2O_5$ .

Otra cuestión importante en la morfología de las partículas de ceniza sintética y composición química es el papel de  $SO_2$  (g) y vanadio. La oxidación del  $SO_2$  (g) a  $SO_3$  (g) se sabe que está catalizada por  $V_2O_5$ .

Con la suposición de  $VOSO_4 \cdot 3H_2O$  en la formación de las partículas (óxidos de vanadio pueden sulfatar a altas temperaturas), el contenido de ácido sulfúrico de las partículas es todavía 37- 49 % en peso. Y la humedad varía en este caso, del 6 al 16 % en peso.

En comparación con 55-67% en peso de ácido sulfúrico y la humedad en peso 11-20. % en el caso de asumir la formación de óxido de vanadio ( $VO_2$ ,  $V_2O_5$ ).

Cuando se forman  $VOSO_4 \cdot 3H_2O$  todavía hay gran cantidad de ácido sulfúrico y la humedad en las partículas, que se pueden ver en las micrografías SEM. Esto es causado por la nucleación de ácido sulfúrico y la de condensación, cuando el flujo de gas se enfría. Sin ninguna dilución, la temperatura era de unos 160 ° C con 20% en peso, en el caso de asumir la formación de óxido de vanadio ( $VO_2$ ,  $V_2O_5$ ).

### A.3. INVESTIGACIÓN DEL EFECTO DEL ADITIVO EN BASE DE MAGNESIO

|  |
|--|
| <b>Título:</b>   |
| El efecto de los aditivos a base de Mg en las características de aerosoles en los motores diésel de velocidad media que funcionan con fuel oíl residual. |
| <b>Autores:</b>  |
| Jussi Lyyranen, Jorma Jokiniemi  |
| Esko I. Kauppinen, Aulis Silvonen  |
| <b>Fuente:</b>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>VTT Procesos, Aerosol Technology Group, P.O. Caja 1401, FIN-02044 VTT, Finlandia</li> </ul>                       |

|   |
|---|
| <b>Ámbito de aplicación:</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• En motores de barcos marinos de velocidad media</li> <li>• Motores de 4 tiempos de 750-1000 RPM</li> <li>• Motores diésel</li> <li>• Aceites de combustibles residuales de baja calidad y la carga del motor suele causar corrosión en caliente y problemas de erosión</li> </ul>  |
| <b>Técnicas utilizadas:</b>   |
| <p>Se utilizó técnicas analíticas, donde las concentraciones de masa de las muestras se analizaron por plasma acoplado inductivamente espectroscopia de masas y espectroscopia de emisión atómica, fueron aplicadas para el sodio, níquel, azufre, vanadio, calcio, zinc y magnesio.</p>  |
| <b>Breve Resumen:</b>   |
| <p>Cuando se opera el motor sin el aditivo de aceite combustible, es posible que el aditivo a base de Mg también actúe como un acelerador de oxidación del carbono no quemado (catalizador) por lo tanto mejorar, al menos parcialmente, el agotamiento de carbono en las partículas. Esto puede ocurrir por la ionización de aditivo en la llama y la formación de iones para reducir la nucleación y la velocidad de coagulación. El resultado es una disminución del hollín formado y/o un cambio en las distribuciones de tamaño de las partículas. Otra posibilidad es que el aditivo reacciona homogéneamente con los gases de la llama para producir radicales hidroxilo. Ambos mecanismos son posibles e incluso pueden ocurrir simultáneamente.</p> <p>También se detectaron tipos similares de las clases de partículas en el análisis de la morfología y la composición de las partículas. Se descubrieron gran cantidad de partículas primarias esféricas pequeñas, en el intervalo de aproximadamente 0,04-0,1 <math>\mu\text{m}</math> que se forman por la nucleación de las especies gaseosas.</p> <p>El tamaño de 2 <math>\mu\text{m}</math> con el caso de aditivos ha podido ser causado por las partículas re – arrastrados es decir desde las superficies del sistema de combustión (álabes de la turbina, de las superficies del tubo de escape, etc.) En los casos sin el aditivo y los modos de re - arrastrados están en el mismo rango de tamaño 10 <math>\mu\text{m}</math>, es decir que están al menos parcialmente superpuestos y no se pueden separar.</p> |

Sin embargo, en el caso con el aditivo se separan los dos modos, es posible que el Mg aumente el punto de fusión de la ceniza y por lo tanto disminuye la sinterización. Por lo tanto, el proceso de arrastre se produce más fácilmente y las partículas re - arrastradas son más pequeñas. En este caso, el modo de 10  $\mu\text{m}$  no contiene ningún Mg y la cantidad de los componentes principales de ceniza (V y Ni) también se redujo. Otra posibilidad es que el aditivo mejora las reacciones de oxidación y por lo tanto facilita la fragmentación de partículas de combustible.

#### **Aspectos de interés:**

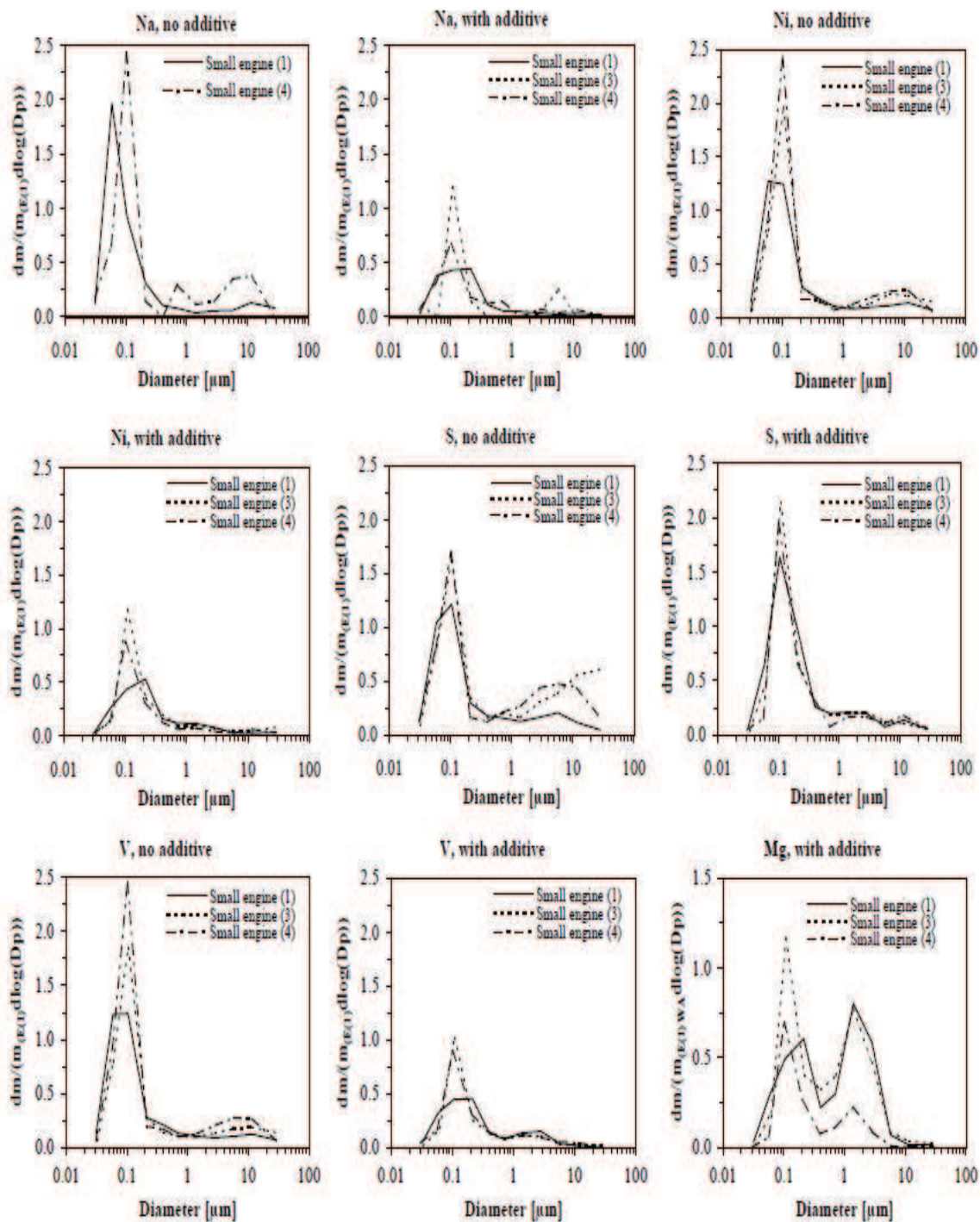
Para las concentraciones de masas elementales de sodio, níquel, azufre, vanadio, calcio y magnesio se determinaron mediante el análisis analítico de espectroscopia de emisión atómica usando una fuente de plasma de acoplamiento inductivo, las concentraciones se normalizaron con la utilización de un motor pequeño, donde se trabaja sin aditivo, obteniendo la unidad para los elementos excepto para el magnesio.

Es interesante que a medida que la concentración elemental relativa de magnesio aumenta en el caso con aditivo, la concentración de calcio disminuye consecuentemente, es decir el calcio al menos parcialmente se sustituye por el magnesio.

Si la normalización se lleva acabo con la relación de concentración de sodio, las concentraciones son muchas más altas con la excepción de unos pocos casos del níquel y el calcio. Además la más alta relación azufre/sodio se encuentran en el caso de la adivinación, sin embargo la concentración relativa de sodio es baja; lo mismo sucede con el níquel, vanadio y magnesio. En el caso que se usa combustible sin aditivo, el níquel, vanadio, sodio y azufre contribuyen a que el tamaño de las partículas tenga un modo de 10  $\mu\text{m}$ .

Para el caso que se utiliza el aditivo, la distribución de tamaño de masas elementales son alrededor de 0.1  $\mu\text{m}$  a 2  $\mu\text{m}$ , para el caso de níquel, azufre y vanadio, a mayor magnesio el tamaño de la partícula esta alrededor de 0.1  $\mu\text{m}$ .

## Distribuciones De Tamaño De La Masa De Composición Para Los Principales Elementos De La Ceniza De Aceite Combustible



## ANEXO B

**CRUDO NAPO QUE UTILIZA OLEODUCTO DE CRUDOS PESADOS  
ECUADOR OCP S.A.**

**Intertek Caleb Brett**

**REPORT OF ANALYSIS**

**Vessel** :  
**Port / Terminal** : N/A  
**Client Ref** :  
**Our Ref** : 2005-003511  
**Date Sample Taken** : 6/27/2005  
**Date Submitted** : 6/27/2005  
**Sample Designated As** : NAPO Crude Oil  
**Drawn By** : Submitted by Intertek Caleb Brett Ecuador  
**Representing** : Whole Sample  
**Lab Reference** : 2005-003511-NOLA-001

| Test                              | Units           | Method       | Result                                   |
|-----------------------------------|-----------------|--------------|--|
| Distillation                      | Wt %            | D2892        | 100                                      |
| Distillation                      | Vol %           |              | 100                                      |
| Vacuum Distillation               | Wt %            | D5236        | 100                                      |
| Vacuum Distillation               | Vol %           |              | 100                                      |
| Reid Vapor Pressure               | psi             | D323         | 2.90                                     |
| Dry Vapor Pressure Equivalent     | psi             | D5191        | 1.60                                     |
| Gravity, API @ 60 F               | deg API         | D4052        | 18.9                                     |
| Specific Gravity @ 15 deg C       |                 |              | 0.9408                                   |
| Sediment & Water Content, (S & W) | Vol %           | D4007        | 0.100                                    |
| Sulfur Content                    | Wt %            | D4294        | 2.03                                     |
| Mercaptan Sulfur                  | ppm             | UOP 163      | 27                                       |
| Pour Point (Actual)               | deg F           | D97          | 5.0                                      |
| Viscosity, Kinematic @ 100 F      | cSt             | D445         | 301.4                                    |
| Viscosity, Kinematic @ 122 F      | cSt             | D445         | 146.4                                    |
| Viscosity, Kinematic @ 210 F      | cSt             | D445         | Unable to run due to<br>nature of sample |
| Salt Content                      | lbs / 1000bbbls | D3230        | 20                                       |
| Nitrogen Content                  | ppm Wt          | D4629        | 4434                                     |
| Basic Nitrogen                    | ppm             | UOP 269      | 1010                                     |
| Calcium (Ca) Content              | ppm Wt          | Dry Ashed    | 4.8                                      |
| Copper (Cu) Content               | ppm Wt          | Dry Ashed    | <0.1                                     |
| Iron (Fe) Content                 | ppm Wt          | Dry Ashed    | 4.2                                      |
| Magnesium (Mg) Content            | ppm Wt          | Dry Ashed    | 0.2                                      |
| Nickel (Ni) Content               | ppm Wt          | Dry Ashed    | 128                                      |
| Sodium (Na) Content               | ppm Wt          | Dry Ashed    | 30                                       |
| Vanadium (V) Content              | ppm Wt          | Dry Ashed    | 375                                      |
| Asphaltene Content                | Wt %            | IP143        | 9.6                                      |
| Total Acid Number                 | mg KOH / g      | D664Modified | <0.05                                    |
| Carbon Residue, Conradson (CCR)   | Wt %            | D189         | 12.0                                     |
| Heat of Combustion (Gross)        | BTU / bbl       | D240         | 6731014                                  |
| Carbon Residue, Micro (MCRT)      | Wt %            | D4530        | 13.7                                     |
| Pentane Insolubles                | Wt %            | D893A        | 13.7                                     |
| Toluene Insolubles                | Wt %            | D893A        | 0.1                                      |
| Flash Point (PMCC) - Proc. "B"    | deg F           | D93          | <60                                      |
| Aluminum (Al) Content             | mg / kg         | D5184A       | 7  |
| Silicon (Si) Content              | mg / kg         | D5184A       | 1  |
| K Factor                          |                 | UOP 375      | 16.55                                    |
| Wax Content                       | Wt %            | UOP 46       | 1.55                                     |
| Simulated Distillation            |                 | D2887 HT     | see attached                             |

The Information contained herein is based on laboratory tests and observations performed by Intertek Caleb Brett New Orleans Laboratory on the date stated above. The sample was submitted by Intertek Caleb Brett Ecuador solely for testing.

Roy Barrios  
 Intertek Caleb Brett

## ANEXO C

### TOBERA DE INYECCIÓN DE COMBUSTIBLE SIN REFRIGERACIÓN



Figura C 1. Inyector sin refrigeración.

### TOBERA DE INYECCIÓN DE COMBUSTIBLE CON REFRIGERACIÓN



Figura C 2. Inyector con refrigeración.

## VÁLVULA DE ESCAPE CON DESGASTE POR CORROSIÓN EN CALIENTE



Figura C 3. Válvula con pérdida de material.

## VÁLVULA DE ESCAPE CON PRECENCIA DE DEPÓSITOS



Figura C 4. Válvula sin pérdida de material.

## **FRACTURA DEL ANILLO DE SEGURIDAD DE LOS ÁLABES DEL TURBOCARGADOR.**



Figura C 5. Anillo de seguridad de los álabes del turbocargador.

## **PROCESO DE CORROSIÓN – EROSIÓN EN LA CARCASA DEL TURBOCARGADOR.**



Figura C 6. Carcasa del turbocargador con presencia de perforaciones.



## ANEXO D

### DESGASTE CON PÉRDIDA DE MATERIAL EN LA TOBERA CON REFRIGERACIÓN

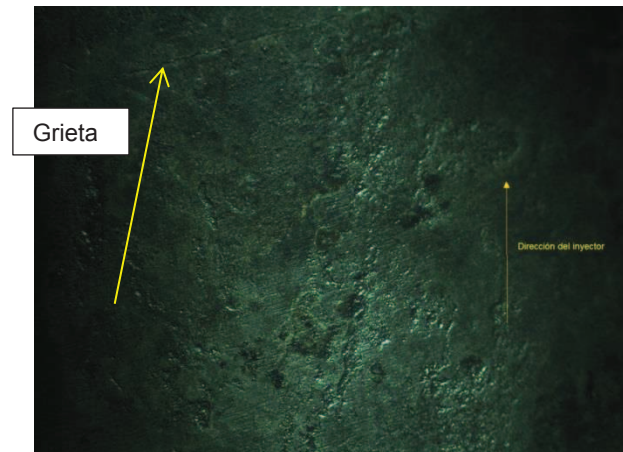


Figura D 1. Desgaste de material en la superficie externa, con una presencia de una grieta en la cabeza del inyector.

### DESGASTE CON PÉRDIDA DE MATERIAL EN LA TOBERA SIN REFRIGERACIÓN

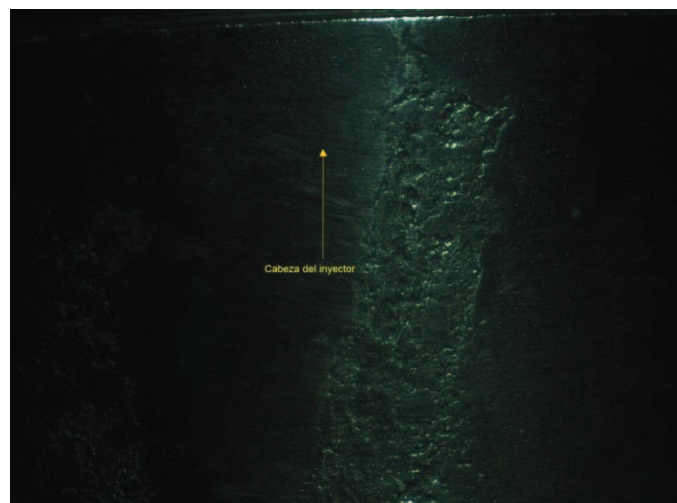


Figura D 2. Inyector sin refrigeración con desgaste externo.

## FRACTURA DEL ANILLO DE SEGURIDAD DE LOS ÁLABES DE UN TURBOCARGADOR

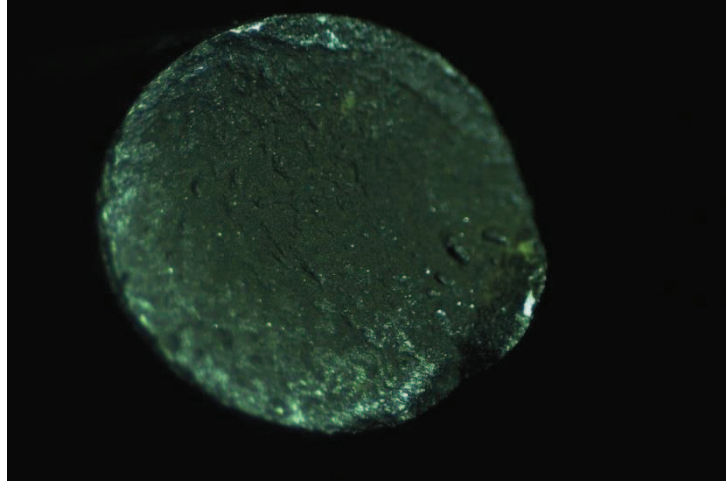


Figura D 3. Fractura frágil con superficie de falla que presenta marcas de río y deformación plástica.

## CORROSIÓN EN LAS CARCAS DE LOS TURBOCARGADORES

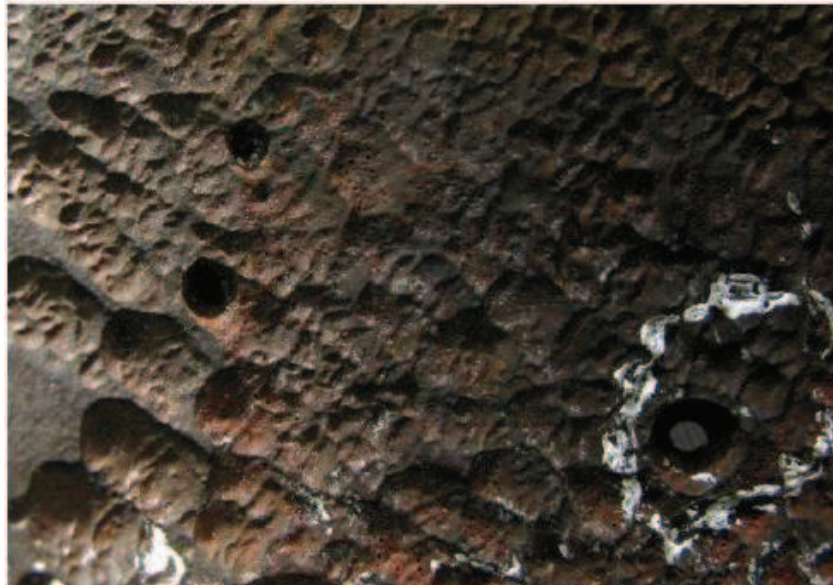


Figura D 4. Superficie interna de la carcasa con muestras de corrosión-erosión, presenta un agujero que perfora la carcasa.

## ANEXO E

### VÁLVULA CON DEFECTOS EN EL ASIENTO

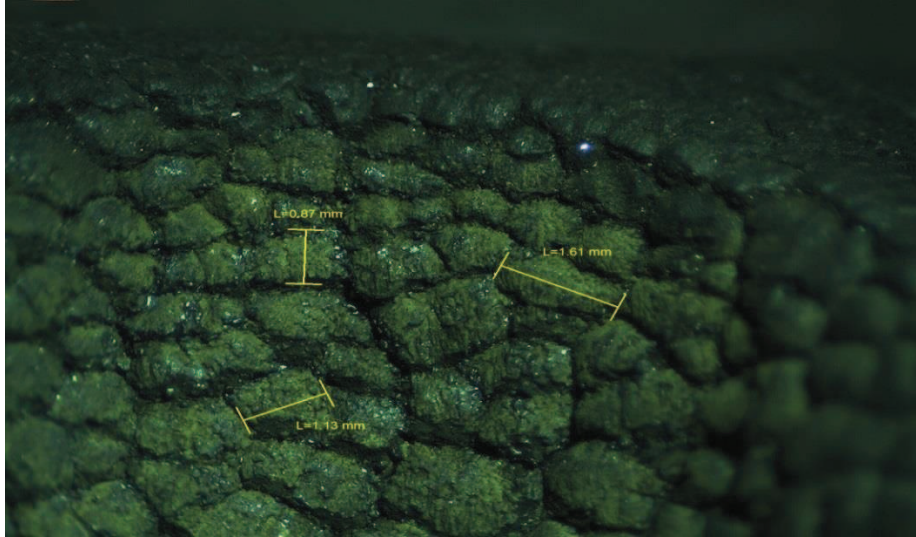


Figura E. 1. Crecimiento y tamaño de grano formado por la corrosión en caliente.

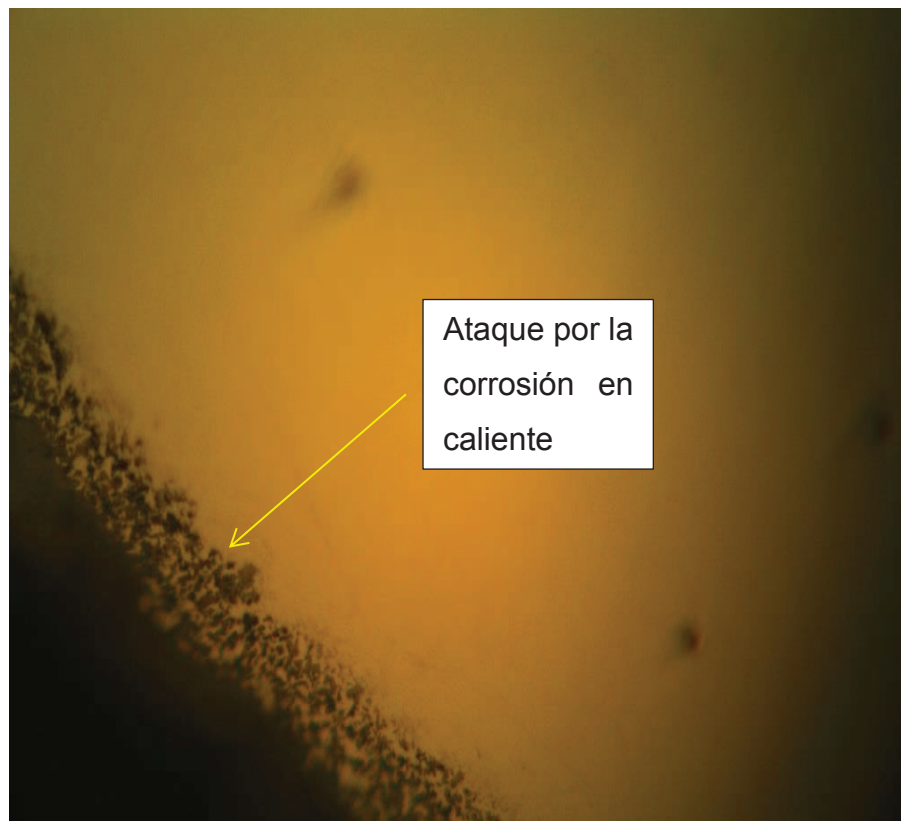


Figura E. 2. Corrosión en caliente en el borde de grano.

## ANEXO F

### MICROESTRUCTURA TRANSVERSAL DE LA TOBERA SIN REFRIGERACIÓN

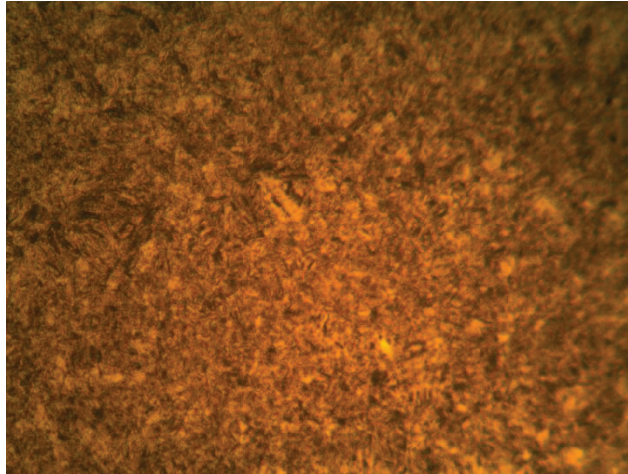


Figura F 1. Microestructura de martensita con material tipo níquel alargado, difusión del níquel en el acero aleado, muestra a 500X.

### MICROESTRUCTURA TRANSVERSAL DE LA TOBERA CON REFRIGERACIÓN

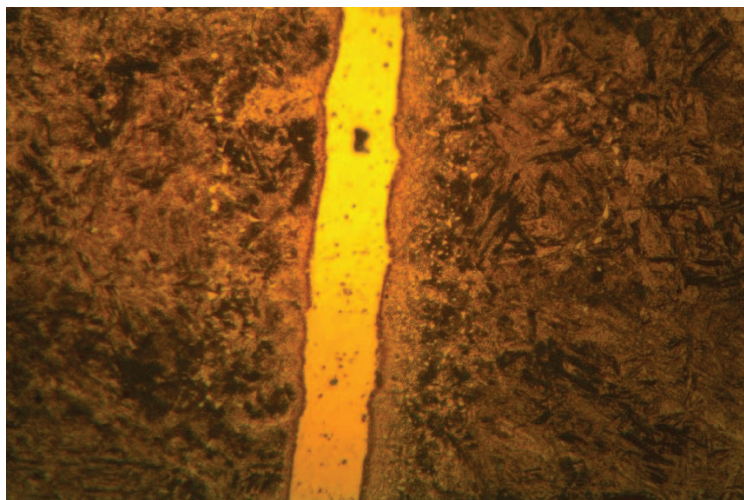


Figura F 2. Microestructura de martensita con aleación cromo-níquel, junta soldada en el conformado del inyector, proceso de corrosión en caliente indicada a 500X.

## ANEXO G

### PRECIPITADOS DE CARBUROS



Figura G 1. Microestructura de sección transversal tomada a 500X, presenta precipitados de carburos y una grieta en la dirección trasversal.

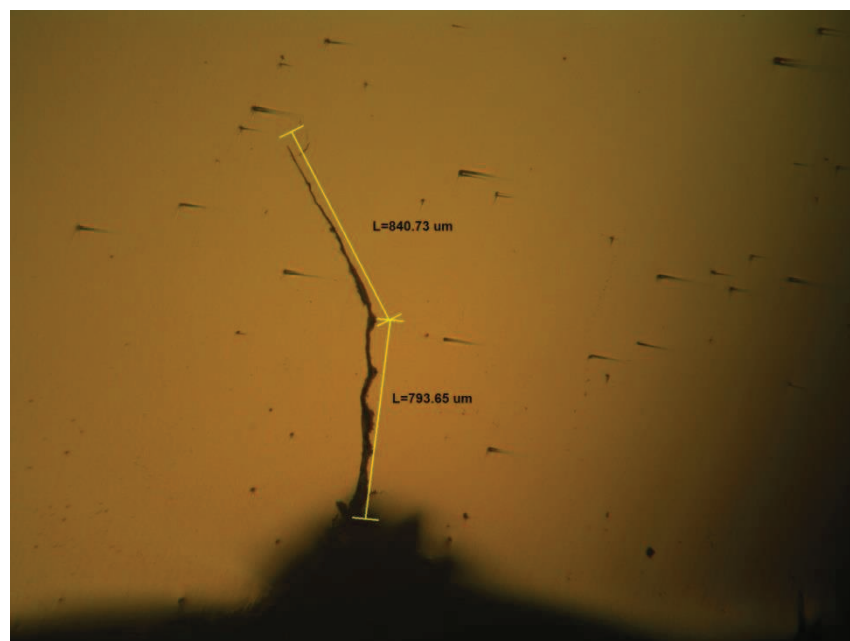


Figura G. 2. Grietas formadas transversalmente, iniciando en el borde de grano.

## ANEXO H

### MICROESTRUCTURA DE LA SECCIÓN FRACTURADA DEL ANILLO

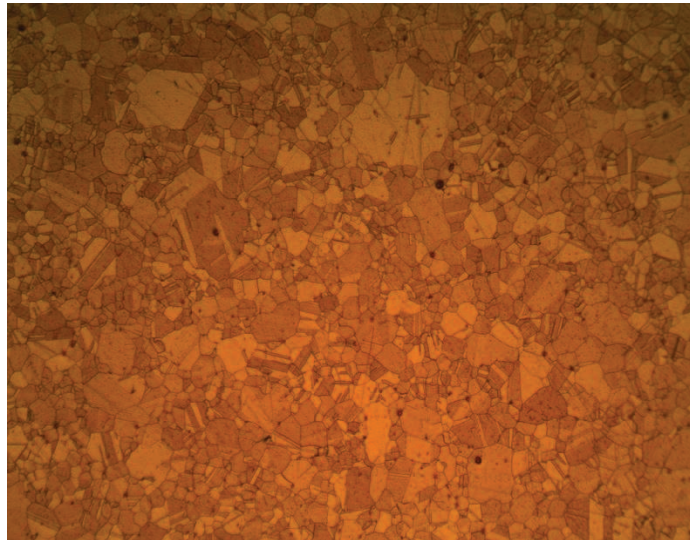


Figura H 1. Microestructura de sección transversal tomada a 100X, corresponde a una matriz de acero cromo-níquel-vanadio, presenta ligeros precipitados de titanio.

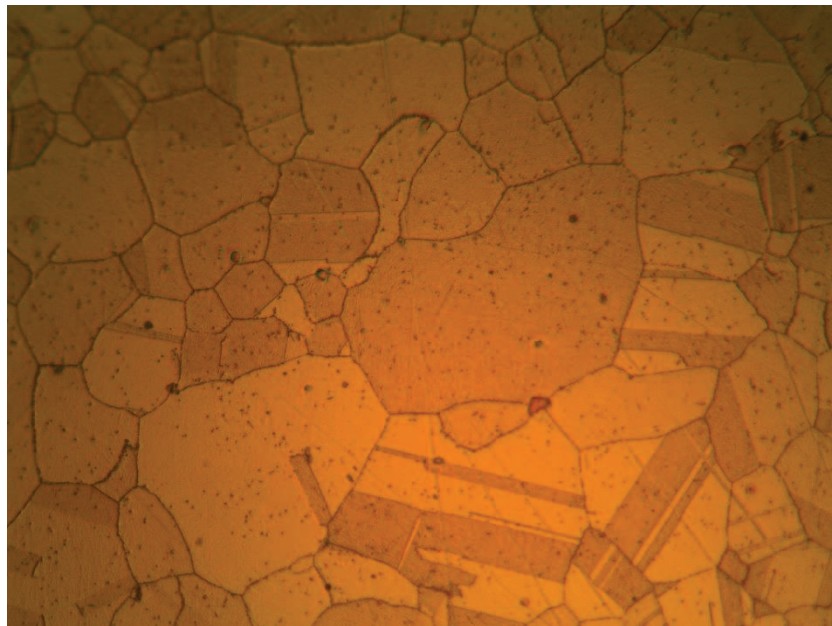


Figura H 2. Microestructura de sección transversal tomada a 500X, presenta precipitados de carburos con tamaño variable.

## ANEXO I

### MICROESTRUCTURA DE FUNDICIÓN MALEABLE

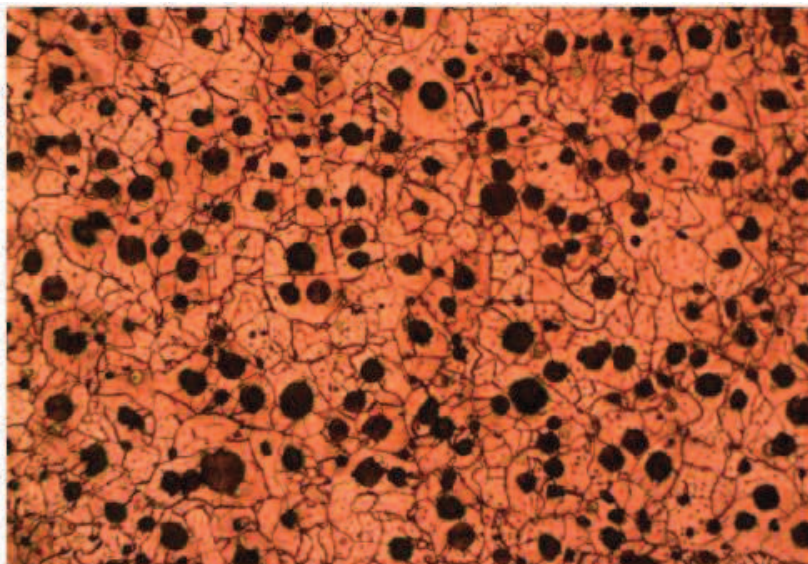


Figura I 1. Microestructura de una fundición maleable de la sección transversal a 100X.

### CORROSIÓN EN CALIENTE EN UNA TOBERA CON REFRIGERACIÓN

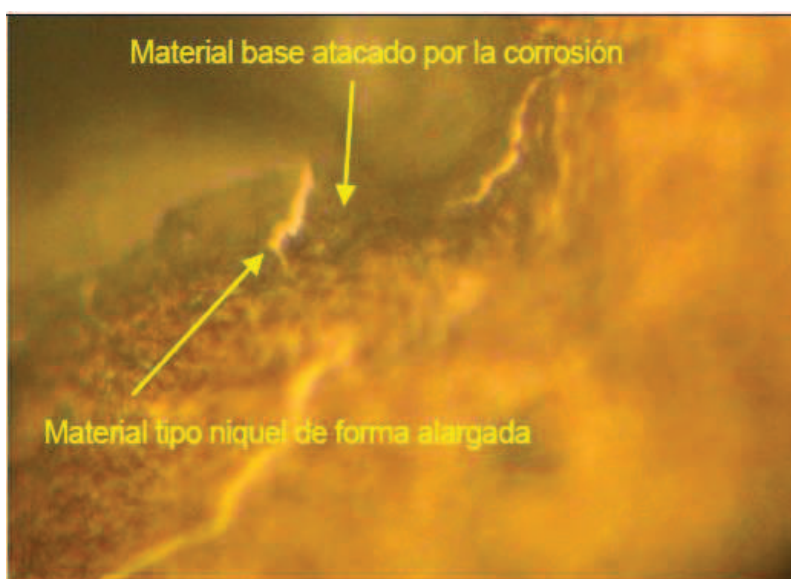


Figura I. 2. Proceso de corrosión en caliente y parte de material tipo níquel alargado (láminas blancas).