



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES INDUSTRIALES**

**“DESARROLLO DE LA FASE UNO DEL PMBOK PARA UN SISTEMA  
INSTRUMENTADO DE SEGURIDAD EN EL CONTROL DE PROCESOS  
DE LA ESTACIÓN PÁRAMO DE OCP”**

TRABAJO DE TITULACIÓN: **PROYECTO TÉCNICO**  
Para optar al Grado Académico de:  
**INGENIERO EN ELECTRÓNICA, CONTROL Y REDES  
INDUSTRIALES**

**AUTOR: JHOFRE EDUARDO OJEDA CORONADO**  
**TUTOR: Ing. JESÚS ALBERTO RODRÍGUEZ FLORES Ph.D.**

Riobamba - Ecuador

2018

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES**  
**INDUSTRIALES**

El tribunal del Trabajo de Titulación certifica que el Trabajo Técnico: “DESARROLLO DE LA FASE UNO DEL PMBOK PARA UN SISTEMA INSTRUMENTADO DE SEGURIDAD EN EL CONTROL DE PROCESOS DE LA ESTACIÓN PÁRAMO DE OCP”, de responsabilidad del señor JHOFRE EDUARDO OJEDA CORONADO, ha sido minuciosamente revisado por los miembros del tribunal del trabajo de titulación, quedando autorizada su presentación.

<b>NOMBRE</b>	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Dr. Julio Santillán <b>VICEDECANO DE LA FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA.</b>	.....	.....
Ing. Freddy Chávez. V <b>DIRECTOR DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES INDUSTRIALES.</b>	.....	.....
Ing. Jesús Rodríguez F. <b>DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN.</b>	.....	.....
Ing. Jorge Paucar <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL.</b>	.....	.....

Yo, Jhofre Eduardo Ojeda Coronado soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este Trabajo Titulación y el patrimonio intelectual del Trabajo de Titulación de Grado pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Jhofre Eduardo Ojeda Coronado

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo se lo dedico a mi familia por guiarme con su amor, sabiduría y apoyo incondicional, lo cual ha sido un pilar fundamental para culminar un capítulo más de mi existencia.

En especial a mis padres Eduardo, Edwin, Alba y Mariana por su trabajo y sacrificio durante todos estos años, agradecerles por brindarme la fuerzas necesarias para no desmayar ante las adversidades y ser modelos a seguir.

A mi hermano Byron por guiarme y apoyarme con sus consejos cuando más los necesité.

A mi hermana Milka por brindarme ese amor y calidez de familia la cual amo.

A mis tías Elena y Mónica por ser ejemplos de mujeres fuertes y luchadoras lo cual me motivó a culminar esta etapa de mi vida.

**Jhofre Ojeda**

## **AGRADECIMIENTO**

A mi tío el Ing. Wagner Carrera por brindarme su confianza, experiencia y apoyo para poder culminar con éxito este trabajo de titulación.

Un agradecimiento muy grande a “OLEODUCTO DE CRUDOS PESADOS ECUADOR S.A” por la oportunidad brindada al permitirme elaborar el trabajo de titulación en sus instalaciones, especialmente a los Ingenieros de la estación de bombeo “Páramo” por su contribución, las cuales fueron de gran valor para la finalización del proyecto.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por aportar a la formación integral de profesionales, mediante la experiencia y ética profesional de sus docentes.

Finalmente a Ing. Jesús Rodríguez por su apoyo y guía en desarrollo del presente trabajo.

**Jhofre Ojeda**

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE TABLAS .....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvi
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xix
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	xx
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	xxii
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xxiii
RESUMEN.....	xxiv
ABSTRACT.....	xxv
INTRODUCCIÓN .....	1
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	3
OBJETIVOS.....	3
DELIMITACIÓN.....	4
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>1. MARCO REFERENCIAL .....</b>	<b>6</b>
<b>1.1 Definiciones.....</b>	<b>6</b>
<b>1.2 Estándares y Normas en la Seguridad Funcional .....</b>	<b>13</b>
<i>1.2.1 IEC: 61508 .....</i>	<i>13</i>
<i>1.2.2 IEC: 61511 .....</i>	<i>14</i>
<i>1.2.3 ANSI/ISA-S84.01-2004 .....</i>	<i>15</i>
<i>1.2.4 ANSI/ISA-5.1-2009 .....</i>	<i>16</i>

<b>1.3</b>	<b>Riesgo .....</b>	<b>17</b>
<i>1.3.1</i>	<i>Tipos de Riesgo .....</i>	<i>18</i>
<i>1.3.2</i>	<i>Métodos de identificación del riesgo .....</i>	<i>19</i>
<i>1.3.3</i>	<i>Reducción de Riesgo .....</i>	<i>20</i>
<b>1.4</b>	<b>Ciclo de Vida de la Seguridad Funcional (CVSF) .....</b>	<b>22</b>
<i>1.4.1</i>	<i>Fases del Ciclo de Vida de la Seguridad Funcional .....</i>	<i>23</i>
<i>1.4.2</i>	<i>Requerimientos del Ciclo de Vida de la Seguridad Funcional.....</i>	<i>24</i>
<i>1.4.3</i>	<i>Fallas ocurridas dentro del Ciclo de Vida de los Sistemas .....</i>	<i>26</i>
<b>1.5</b>	<b>Análisis de Riesgos y Operabilidad (HAZOP).....</b>	<b>27</b>
<b>1.6</b>	<b>Sistemas Instrumentados de Seguridad (SIS).....</b>	<b>28</b>
<b>1.7</b>	<b>Nivel de Integridad de Seguridad (SIL) .....</b>	<b>29</b>
<i>1.7.1</i>	<i>Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF).....</i>	<i>31</i>
<i>1.7.2</i>	<i>Análisis de Capas de Protección .....</i>	<i>33</i>
<i>1.7.3</i>	<i>Diseño e Ingeniería del SIS .....</i>	<i>37</i>
<i>1.7.4</i>	<i>Modos y Tasas de fallos .....</i>	<i>42</i>
<b>1.8</b>	<b>Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (PMBOK).....</b>	<b>44</b>
<i>1.8.1</i>	<i>Grupo de Procesos de la Etapa de Inicio.....</i>	<i>46</i>
<b>1.9</b>	<b>Esquemas del Proceso Productivo de la Estación Páramo de OCP.....</b>	<b>47</b>
<i>1.9.1</i>	<i>Generalidades del Oleoducto de Crudos Pesados .....</i>	<i>47</i>
<i>1.9.1.1</i>	<i>Esquema General del Proceso y Descripción de la Ruta de Transporte .....</i>	<i>47</i>
<i>1.9.1.2</i>	<i>Aspectos Relevantes del Oleoducto.....</i>	<i>52</i>
<i>1.9.2</i>	<i>Estación de Bombeo Páramo de OCP .....</i>	<i>58</i>

<i>1.9.2.1 Generalidades</i> .....	<b>58</b>
<i>1.9.2.2 Funcionamiento de la Estación de Bombeo Páramo</i> .....	<b>58</b>
<i>1.9.2.3 Condiciones Operativas</i> .....	<b>59</b>
<b><i>1.9.3 Detalle de los Procesos de la Estación de Bombeo Páramo</i></b> .....	<b>60</b>
<i>1.9.3.1 Recibidor y Lanzador de chanchos</i> .....	<b>61</b>
<i>1.9.3.2 Filtro Principal de Entrada</i> .....	<b>62</b>
<i>1.9.3.3 Sistema de Aceite Caliente (Hot Oil System)</i> .....	<b>63</b>
<i>1.9.3.4 Bombas Principales</i> .....	<b>64</b>
<i>1.9.3.5 Unidades de aumento de presión de combustible (Booster Units)</i> .....	<b>64</b>
<i>1.9.3.6 Calentador de Aceite Térmico (Hot Oil Heater)</i> .....	<b>65</b>
<i>1.9.3.7 Generadores Eléctricos</i> .....	<b>65</b>
<i>1.9.3.8 Almacenamiento de Combustible (Fuel Oil Storage TK)</i> .....	<b>66</b>
<i>1.9.3.9 Almacenamiento de Gas Licuado de Petróleo (GLP)</i> .....	<b>67</b>
<i>1.9.3.10 Tratamiento de Drenaje</i> .....	<b>67</b>
<i>1.9.3.11 Sistema de Agua de Servicio</i> .....	<b>68</b>
<i>1.9.3.12 Sistema de Compresores de Aire</i> .....	<b>68</b>
<i>1.9.3.13 Tanques de Agua de Enfriamiento (Cooling Water TK)</i> .....	<b>69</b>
<i>1.9.3.14 Tanques de Aceite Lubricante (Lub Oil TK)</i> .....	<b>69</b>
<i>1.9.3.15 Sistema de Aceite Diésel (Diésel Oil System)</i> .....	<b>69</b>
<i>1.9.3.16 Tanque de Alivio (Relief Tank)</i> .....	<b>70</b>
<i>1.9.3.17 Bombas de Agua contra Incendio</i> .....	<b>70</b>



## CAPÍTULO II

<b>2.</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>72</b>
<b>2.1</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>72</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Premisas.....</b>	<b>72</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Método de Investigación .....</b>	<b>73</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Técnica de Investigación.....</b>	<b>73</b>
<b>2.2</b>	<b>Diseño de Nodos de la Estación Páramo .....</b>	<b>74</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Desarrollo del Diagrama de Bloques General de la Estación Páramo .....</b>	<b>74</b>
<b>2.2.1.1</b>	<b>Nodo 1 “Recibo de crudo de Sardinas” .....</b>	<b>75</b>
<b>2.2.1.2</b>	<b>Nodo 2 “Despacho de Crudo a Chiquilpe” .....</b>	<b>76</b>
<b>2.2.1.3</b>	<b>Nodo 3 “Intercambiador de calor” .....</b>	<b>78</b>
<b>2.2.1.4</b>	<b>Nodo 4 “Bombeo” .....</b>	<b>80</b>
<b>2.2.1.5</b>	<b>Nodo 5 “Sistema de Alivio” .....</b>	<b>82</b>
<b>2.2.1.6</b>	<b>Nodo 6 “Horno” .....</b>	<b>83</b>
<b>2.3</b>	<b>HAZOP de la Estación de Bombeo Páramo .....</b>	<b>85</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Antecedentes .....</b>	<b>85</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Selección de Causas de la Estación de Bombeo Páramo del HAZOP .....</b>	<b>85</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Jerarquización de los riesgos del Análisis de Riesgos y Operabilidad (HAZOP) .....</b>	<b>88</b>
<b>2.4</b>	<b>Desarrollo del LOPA para el cálculo del SIL objetivo .....</b>	<b>103</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>103</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Cálculo del Factor de Ocupación .....</b>	<b>103</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Probabilidad de Ignición.....</b>	<b>106</b>

2.4.4	<i>Capas de Protección Independientes (IPLs)</i> .....	106
2.4.5	<i>Desarrollo de las Hojas de Trabajo LOPA del Nodo 1</i> .....	106
2.4.6	<i>Desarrollo de las Hojas de Trabajo LOPA del Nodo 2</i> .....	122
2.4.7	<i>Desarrollo de las Hojas de Trabajo LOPA del Nodo 3</i> .....	130
2.4.8	<i>Desarrollo de las Hojas de Trabajo LOPA del Nodo 4</i> .....	138
2.4.9	<i>Desarrollo de las Hojas de Trabajo LOPA del Nodo5</i> .....	151
2.4.9.1	<i>Cálculo de la Frecuencia del Evento Iniciante de la Causa 1</i> .....	151
2.4.10	<i>Desarrollo de las Hojas de Trabajo LOPA del Nodo 6</i> .....	159
2.5	<b>Localización de las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF)</b> .....	159
2.6	<b>Diseño de las Especificaciones de Requerimientos de Seguridad (SRS)</b> .....	162
2.6.1	<i>Elaboración de los Requerimientos Generales del SIS</i> .....	162
2.6.2	<i>Elaboración de los Requerimientos de Software e Interfaces</i> .....	164
2.6.3	<i>Elaboración de Requerimientos del Procesador Lógico de Seguridad (SPLC)</i> .....	166
2.6.4	<i>Elaboración de los Requerimientos de Sensores y Actuadores</i> .....	166
2.6.5	<i>Elaboración de Requerimientos de Fuentes de energía eléctrica</i> .....	168
2.6.6	<i>Elaboración de los Requerimientos de Bypass</i> .....	169
2.6.7	<i>Elaboración de la Filosofía de Bypass durante Arranque y Override de Proceso</i> ....	169
2.6.8	<i>Elaboración de la Filosofía de Reset</i> .....	170
2.6.9	<i>Especificaciones para el Diseño y Operación</i> .....	170
2.7	<b>Diseño del Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS)</b> .....	173
2.7.1	<i>Cálculo de <math>PFD_{avg}</math> de los Elementos de Seguridad</i> .....	173
2.7.2	<i>Cálculo de las <math>PFD_{avg}</math> de Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF)</i> .....	197

<i>2.7.3</i>	<i>Diseño del diagrama de bloques del SIS</i>	203
--------------	---	-----

### **CAPÍTULO III**

<b>3.</b>	<b>MARCO DE RESULTADOS, DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS...</b>	<b>205</b>
<b>3.1</b>	<b>Introducción</b>	<b>205</b>
<b>3.2</b>	<b>Funciones instrumentadas de seguridad (SIF)</b>	<b>205</b>
<i>3.2.1</i>	<i>Ingeniería del detalle de la SIF-01</i>	<i>206</i>
<i>3.2.2</i>	<i>Ingeniería del detalle de la SIF-02</i>	<i>208</i>
<i>3.2.3</i>	<i>Ingeniería del detalle de la SIF-03</i>	<i>209</i>
<i>3.2.4</i>	<i>Ingeniería del detalle de la SIF-04</i>	<i>211</i>
<b>3.3</b>	<b>Arquitectura del Sistema Instrumentado de Seguridad</b>	<b>213</b>
<b>3.4</b>	<b>Evaluación del Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS)</b>	<b>214</b>
<i>3.4.1</i>	<i>Análisis de la reducción de riesgo</i>	<i>214</i>
<b>3.5</b>	<b>Diagrama de Tuberías e Instrumentación del SIS</b>	<b>222</b>
<b>3.6</b>	<b>Matriz de Causa-Efecto de la Estación de Bombeo Páramo</b>	<b>228</b>
<b>3.7</b>	<b>Selección de instrumentación del SIS de la estación Páramo</b>	<b>230</b>
<i>3.7.1</i>	<i>Equipos reutilizables</i>	<i>230</i>
<i>3.7.1.1</i>	<i>ESDV-04004</i>	<i>230</i>
<i>3.7.1.2</i>	<i>ESDV-04003 y MOV-04001</i>	<i>231</i>
<i>3.7.2</i>	<i>Equipos nuevos</i>	<i>232</i>
<i>3.7.2.1</i>	<i>PZIT-04022A/B, PZIT-04661A/B, PZIT-04418A/F, PZIT-04419A/F</i>	<i>233</i>
<i>3.7.2.2</i>	<i>PDZIT-04003</i>	<i>233</i>
<i>3.7.2.3</i>	<i>FZIT-04661</i>	<i>234</i>

3.7.2.4 MOV-04661 .....	235
3.7.2.5 Tablero de control de seguridad .....	236
3.7.2.6 InTouch Panel PC .....	236
3.7.2.7 PLC de Seguridad (SPLC) .....	237
<b>3.8 Evaluación Económica de equipos Mayores del SIS .....</b>	<b>242</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>243</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>245</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b>	Partes del estándar IEC: 61508 .....	14
<b>Tabla 2-1:</b>	Valoración del riesgo de forma matricial .....	19
<b>Tabla 3-1:</b>	Niveles de factor de reducción de riesgo objetivo.....	21
<b>Tabla 4-1:</b>	Matriz de reducción de riesgo.....	22
<b>Tabla 5-1:</b>	Requerimientos del ciclo de vida de la seguridad funcional.....	25
<b>Tabla 6-1:</b>	Modelo de hoja HAZOP de OCP.....	27
<b>Tabla 7-1:</b>	Nivel SIL para funciones en modo a demanda.....	30
<b>Tabla 8-1:</b>	Niveles SIL para funciones en modo continuo.....	30
<b>Tabla 9-1:</b>	Datos del HAZOP para ser usados en el LOPA.....	33
<b>Tabla 10-1:</b>	Modelo de tabla LOPA.....	34
<b>Tabla 11-1:</b>	Niveles de severidad de los eventos de impacto.....	35
<b>Tabla 12-1:</b>	Probabilidad de eventos iniciantes.....	35
<b>Tabla 13-1:</b>	Términos y rangos de datos para validación SIL.....	39
<b>Tabla 14-1:</b>	Formulas de la Probabilidad de falla en demanda promedio.....	41
<b>Tabla 15-1:</b>	Formulas de la Probabilidad de fallo por hora.....	42
<b>Tabla 16-1:</b>	Propiedades del crudo pesado.....	59
<b>Tabla 17-1:</b>	Condiciones de Temperatura.....	59
<b>Tabla 18-1:</b>	Condiciones de Presión.....	60
<b>Tabla 19-1:</b>	Escenarios de Operación.....	60
<b>Tabla 1-2:</b>	Condiciones de diseño, operación y equipos del Nodo 1 .....	76
<b>Tabla 2-2:</b>	Desviaciones del Nodo 1.....	76
<b>Tabla 3-2:</b>	Condiciones de diseño, operación y equipos del Nodo 2.....	77
<b>Tabla 4-2:</b>	Desviaciones del Nodo 2.....	78
<b>Tabla 5-2:</b>	Condiciones de diseño, operación y equipos del Nodo 3.....	79
<b>Tabla 6-2:</b>	Desviaciones del Nodo 3.....	80
<b>Tabla 7-2:</b>	Condiciones de diseño, operación y equipos del Nodo 4.....	81
<b>Tabla 8-2:</b>	Desviaciones del Nodo 4.....	82
<b>Tabla 9-2:</b>	Condiciones de diseño, operación y equipos del Nodo 5.....	83
<b>Tabla 10-2:</b>	Desviaciones del Nodo 5.....	83
<b>Tabla 11-2:</b>	Condiciones de diseño, operación y equipos del Nodo 6.....	84
<b>Tabla 12-2:</b>	Desviaciones del Nodo 6.....	85
<b>Tabla 13-2:</b>	Causas de desviaciones típicas en el Nodo 1.....	86
<b>Tabla 14-2:</b>	Causas de desviaciones típicas en el Nodo 2.....	86

<b>Tabla 15-2:</b>	Causas de desviaciones típicas en el Nodo 3.....	87
<b>Tabla 16-2:</b>	Causas de desviaciones típicas en el Nodo 4.....	87
<b>Tabla 17-2:</b>	Causas de desviaciones típicas en el Nodo 5.....	88
<b>Tabla 18-2:</b>	Causas de desviaciones típicas en el Nodo 6.....	88
<b>Tabla 19-2:</b>	Desarrollo de hoja HAZOP Nodo 1.....	90
<b>Tabla 20-2:</b>	Desarrollo de hoja HAZOP Nodo 2.....	93
<b>Tabla 21-2:</b>	Desarrollo de hoja HAZOP Nodo 3.....	95
<b>Tabla 22-2:</b>	Desarrollo de hoja HAZOP Nodo 4.....	97
<b>Tabla 23-2:</b>	Desarrollo de hoja HAZOP Nodo 5.....	100
<b>Tabla 24-2:</b>	Desarrollo de hoja HAZOP Nodo 6.....	102
<b>Tabla 25-2:</b>	Factor de Ocupación Operación Normal.....	103
<b>Tabla 26-2:</b>	Factor de Ocupación Lanzamiento de Marrano.....	104
<b>Tabla 27-2:</b>	Factor de Ocupación en Recepción de Marrano.....	104
<b>Tabla 28-2:</b>	Factor de Ocupación en las Bombas de Sardinas.....	105
<b>Tabla 29-2:</b>	Factor de Ocupación en las Bombas de Páramo.....	105
<b>Tabla 30-2:</b>	Factor de Ocupación en Parada General del Oleoducto.....	106
<b>Tabla 31-2:</b>	Hoja de trabajo LOPA Nodo 1- Causa 1.....	109
<b>Tabla 32-2:</b>	Hoja de trabajo LOPA Nodo 1- Causa 2.....	111
<b>Tabla 33-2:</b>	Hoja de trabajo LOPA Nodo 1- Causa 3.....	113
<b>Tabla 34-2:</b>	Hoja de trabajo LOPA Nodo 1- Causa 4.....	115
<b>Tabla 35-2:</b>	Hoja de trabajo LOPA Nodo 1- Causa 5.....	117
<b>Tabla 36-2:</b>	Hoja de trabajo LOPA Nodo 1- Causa 6.....	119
<b>Tabla 37-2:</b>	Hoja de trabajo LOPA Nodo 1- Causa 7.....	121
<b>Tabla 38-2:</b>	Hoja de trabajo LOPA Nodo 2- Causa 1.....	123
<b>Tabla 39-2:</b>	Hoja de trabajo LOPA Nodo 2- Causa 2.....	125
<b>Tabla 40-2:</b>	Hoja de trabajo LOPA Nodo 2- Causa 3.....	127
<b>Tabla 41-2:</b>	Hoja de trabajo LOPA Nodo 2- Causa 4.....	129
<b>Tabla 42-2:</b>	Hoja de trabajo LOPA Nodo 3- Causa 1.....	131
<b>Tabla 43-2:</b>	Hoja de trabajo LOPA Nodo 3- Causa 2.....	133
<b>Tabla 44-2:</b>	Hoja de trabajo LOPA Nodo 3- Causa 3.....	135
<b>Tabla 45-2:</b>	Hoja de trabajo LOPA Nodo 3- Causa 4.....	137
<b>Tabla 46-2:</b>	Hoja de trabajo LOPA Nodo 4- Causa 1.....	139
<b>Tabla 47-2:</b>	Hoja de trabajo LOPA Nodo 4- Causa 2.....	141
<b>Tabla 48-2:</b>	Hoja de trabajo LOPA Nodo 4- Causa 3.....	143
<b>Tabla 49-2:</b>	Hoja de trabajo LOPA Nodo 4- Causa 4.....	147
<b>Tabla 50-2:</b>	Hoja de trabajo LOPA Nodo 4- Causa 5.....	149

<b>Tabla 51-2:</b>	Hoja de trabajo LOPA Nodo 5- Causa 1.....	152
<b>Tabla 52-2:</b>	Hoja de trabajo LOPA Nodo 5- Causa 2.....	154
<b>Tabla 53-2:</b>	Hoja de trabajo LOPA Nodo 5- Causa 3.....	156
<b>Tabla 54-2:</b>	Hoja de trabajo LOPA Nodo 5- Causa 4.....	158
<b>Tabla 55-2:</b>	Localización de las Funciones Instrumentadas de Seguridad .....	159
<b>Tabla 56-2:</b>	Referencia de la SIF-01.....	160
<b>Tabla 57-2:</b>	Referencia de la SIF-02.....	160
<b>Tabla 58-2:</b>	Referencia de la SIF-03.....	160
<b>Tabla 59-2:</b>	Referencia de la SIF-04.....	161
<b>Tabla 60-2:</b>	Referencia de la Recomendación.....	161
<b>Tabla 61-2:</b>	Especificaciones de la SIF-01.....	170
<b>Tabla 62-2:</b>	Especificaciones de la SIF-02.....	171
<b>Tabla 63-2:</b>	Especificaciones de la SIF-03.....	172
<b>Tabla 64-2:</b>	Especificaciones de la SIF-04.....	172
<b>Tabla 65-2:</b>	Especificaciones de la Recomendación.....	173
<b>Tabla 66-2:</b>	Estructura de la SIF-01.....	197
<b>Tabla 67-2:</b>	Estructura de la SIF-02.....	199
<b>Tabla 68-2:</b>	Estructura de la SIF-03.....	200
<b>Tabla 69-2:</b>	Estructura de la SIF-04.....	202
<b>Tabla 1-3:</b>	Ingeniería del detalle del subsistema de lógica.....	206
<b>Tabla 2-3:</b>	Ingeniería del detalle de la SIF-01.....	206
<b>Tabla 3-3:</b>	Subsistema de detección de la SIF-01.....	207
<b>Tabla 4-3:</b>	Subsistema de actuación de la SIF-01.....	207
<b>Tabla 5-3:</b>	Ingeniería del detalle de la SIF-02.....	208
<b>Tabla 6-3:</b>	Subsistema de detección de la SIF-02.....	208
<b>Tabla 7-3:</b>	Subsistema de actuación de la SIF-02.....	209
<b>Tabla 8-3:</b>	Ingeniería del detalle de la SIF-03.....	209
<b>Tabla 9-3:</b>	Subsistema uno de detección de la SIF-03.....	210
<b>Tabla 10-3:</b>	Subsistema dos de detección de la SIF-03.....	210
<b>Tabla 11-3:</b>	Subsistema de actuación de la SIF-03.....	211
<b>Tabla 12-3:</b>	Ingeniería del detalle de la SIF-04.....	211
<b>Tabla 13-3:</b>	Subsistema de detección de la SIF-04.....	212
<b>Tabla 14-3:</b>	Subsistema de actuación de la SIF-04.....	212
<b>Tabla 15-3:</b>	Verificación SIL Objetivo SIF-01.....	214
<b>Tabla 16-3:</b>	Verificación SIL Objetivo SIF-02.....	216
<b>Tabla 17-3:</b>	Verificación SIL Objetivo SIF-03.....	217

<b>Tabla 18-3:</b>	Verificación SIL Objetivo SIF-04 causa 1.....	219
<b>Tabla 19-3:</b>	Verificación SIL Objetivo SIF-04 causa 2.....	219
<b>Tabla 20-3:</b>	Verificación SIL Objetivo SIF-04 causa 4.....	219
<b>Tabla 21-3:</b>	Matriz causa- efecto del SIS de Páramo.....	229
<b>Tabla 22-3:</b>	Módulos de entrada y salida.....	239
<b>Tabla 23-3:</b>	Costos equipos mayores.....	242



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b>	Relación entre la IEC: 61508 y la IEC: 61511 .....	15
<b>Figura 2-1:</b>	Relación de las normativas IEC con ANSI/ISA .....	16
<b>Figura 3-1:</b>	Niveles de Riesgo .....	18
<b>Figura 4-1:</b>	ALARP .....	19
<b>Figura 5-1:</b>	Capas de Protección .....	20
<b>Figura 6-1:</b>	Ciclo de Vida de la Seguridad Funcional (CVSF) .....	23
<b>Figura 7-1:</b>	Flujo grama del HAZOP .....	28
<b>Figura 8-1:</b>	Elementos de un SIS .....	29
<b>Figura 9-1:</b>	Tipos de funciones instrumentadas .....	31
<b>Figura 10-1:</b>	SIF en modo continuo .....	32
<b>Figura 11-1:</b>	SIF en modo a demanda .....	32
<b>Figura 12-1:</b>	Estructura de un subsistema de seguridad .....	41
<b>Figura 13-1:</b>	Tasas y modos de falla .....	43
<b>Figura 14-1:</b>	Límites del proyecto .....	46
<b>Figura 15-1:</b>	Perfil del oleoducto .....	47
<b>Figura 16-1:</b>	Estación de bombeo Amazonas .....	48
<b>Figura 17-1:</b>	Estación de bombeo Cayagama .....	49
<b>Figura 18-1:</b>	Estación de Bombeo Sardinas .....	49
<b>Figura 19-1:</b>	Estación de bombeo Páramo .....	50
<b>Figura 20-1:</b>	Estación reductora de presión Chiquilpe .....	50
<b>Figura 21-1:</b>	Estación reductora de presión Puerto Quito .....	51
<b>Figura 22-1:</b>	Estación de Bloqueo Automático (ABS) .....	51
<b>Figura 23-1:</b>	Terminal Marino .....	51
<b>Figura 24-1:</b>	Centro de control principal del oleoducto .....	52
<b>Figura 25-1:</b>	LHMI de Páramo .....	53
<b>Figura 26-1:</b>	SCADA de OCP .....	54
<b>Figura 27-1:</b>	Control por presión de succión .....	55
<b>Figura 28-1:</b>	Control por presión de descarga .....	55
<b>Figura 29-1:</b>	LHMI general de la estación de bombeo Páramo .....	61
<b>Figura 30-1:</b>	Diagrama de bloques Recibidor .....	62
<b>Figura 31-1:</b>	Diagrama de bloques Lanzador .....	62
<b>Figura 32-1:</b>	Diagrama de bloques Filtro principal .....	63
<b>Figura 33-1:</b>	Diagrama de bloques Sistema de Aceite Caliente .....	63

<b>Figura 34-1:</b>	Diagrama de bloques Bombas Principales.....	64
<b>Figura 35-1:</b>	Diagrama de bloques Booster Units.....	65
<b>Figura 36-1:</b>	Diagrama de bloques Calentador de Aceite Térmico.....	65
<b>Figura 37-1:</b>	LHMI de suministro eléctrico.....	66
<b>Figura 38-1:</b>	Diagrama de bloque Almacenamiento de Combustible.....	66
<b>Figura 39-1:</b>	Diagrama de bloque Almacenamiento de GLP.....	67
<b>Figura 40-1:</b>	Diagrama de bloque Tratamiento de Drenaje.....	67
<b>Figura 41-1:</b>	Diagrama de bloques Sistema de Agua de Servicio.....	68
<b>Figura 42-1:</b>	Diagrama de bloque Sistema de Compresores de Aire.....	68
<b>Figura 43-1:</b>	Diagrama de bloques Tanques de Agua de Enfriamiento.....	69
<b>Figura 44-1:</b>	Diagrama de bloque Tanques de Aceite Lubricante.....	69
<b>Figura 45-1:</b>	Diagrama de bloque Sistema de Aceite Diésel.....	70
<b>Figura 46-1:</b>	Diagrama de bloque Tanque de alivio.....	70
<b>Figura 47-1:</b>	Diagrama de bloque Bombas de Agua contra Incendio.....	71
<b>Figura 1-2:</b>	Diagrama de bloques de nodos de la estación Páramo.....	74
<b>Figura 2-2:</b>	Nodo 1 “Recibo del crudo de Sardinias”.....	75
<b>Figura 3-2:</b>	Nodo 2 “Despacho de Crudo a Chiquilpe”.....	77
<b>Figura 4-2:</b>	Nodo 3 “Intercambiador de calor”.....	78
<b>Figura 5-2:</b>	Nodo 4 “Bombeo” etapa 1.....	80
<b>Figura 6-2:</b>	Nodo 4 “Bombeo” etapa 2.....	81
<b>Figura 7-2:</b>	Nodo 5 “Sistema de Alivio”.....	82
<b>Figura 8-2:</b>	Nodo 6 “Horno”.....	84
<b>Figura 9-2:</b>	Lazo de seguridad 01.....	198
<b>Figura 10-2:</b>	Lazo de seguridad 02.....	200
<b>Figura 11-2:</b>	Lazo de seguridad 03.....	201
<b>Figura 12-2:</b>	Lazo de seguridad 04.....	202
<b>Figura 13-2:</b>	Recomendación.....	203
<b>Figura 14-2:</b>	Diseño general del SIS.....	204
<b>Figura 1-3:</b>	Arquitectura del SIS.....	213
<b>Figura 2-3:</b>	P&ID Pig receiver and Pig launcher.....	223
<b>Figura 3-3:</b>	P&ID Hot oil circulation pumps.....	224
<b>Figura 4-3:</b>	P&ID Pumps A/B/C.....	225
<b>Figura 5-3:</b>	P&ID Pumps D/E/F.....	226
<b>Figura 6-3:</b>	P&ID Recomendación.....	227
<b>Figura 7-3:</b>	ESDV-04004.....	230
<b>Figura 8-3:</b>	ESDV-04003 y MOV-04001.....	231

<b>Figura 9-3:</b>	Transmisor de presión IGP10.....	233
<b>Figura 10-3:</b>	Transmisor de presión diferencial IDP10.....	233
<b>Figura 11-3:</b>	Transmisor de flujo Rosemount 8800 Dual.....	234
<b>Figura 12-3:</b>	Válvula DVC6000 SIS y controlador Fisher FIELDVUE.....	235
<b>Figura 13-3:</b>	InTouch Panel PC.....	236
<b>Figura 14-3:</b>	Procesador 140CPU65160S.....	238
<b>Figura 15-3:</b>	Alimentación CA 140CPS12420.....	238
<b>Figura 16-3:</b>	Alimentación CC 140CPS22400.....	239
<b>Figura 17-3:</b>	Módulo 140NOE77111.....	240
<b>Figura 18-3:</b>	Red de comunicaciones del SIS.....	241

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-1:</b>	Origen y Causas de accidentes en el CVSF.....	26
<b>Gráfico 1-3:</b>	Validación de SIF-01.....	215
<b>Gráfico 2-3:</b>	Contribución PFDavg de elementos de la SIF-01.....	215
<b>Gráfico 3-3:</b>	Validación de SIF-02.....	216
<b>Gráfico 4-3:</b>	Contribución PFDavg de elementos de la SIF-02.....	217
<b>Gráfico 5-3:</b>	Validación de SIF-03.....	218
<b>Gráfico 6-3:</b>	Contribución PFDavg de elementos de la SIF-03.....	218
<b>Gráfico 7-3:</b>	Validación de SIF-04 causa 1.....	220
<b>Gráfico 8-3:</b>	Validación de SIF-04 causa 2.....	220
<b>Gráfico 9-3:</b>	Validación de SIF-04 causa 4.....	221
<b>Gráfico 10-3:</b>	Contribución PFDavg de elementos de la SIF-04.....	221

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

<b>SIL:</b>	Nivel de integridad de seguridad.
<b>BPCS:</b>	Sistema básico de control de procesos
<b>LOPA:</b>	Análisis de capas de protección
<b>HAZOP:</b>	Análisis de riesgos y operatividad
<b>SIF:</b>	Funciones instrumentadas de seguridad
<b>IPLs:</b>	Capas de protección independientes
<b>SIS:</b>	Sistemas instrumentado de seguridad
<b>RRF:</b>	Factor de reducción de riesgo
<b>PDF:</b>	Probabilidad de falla en demanda
<b>PDFdavg:</b>	Probabilidad de falla en demanda promedio
<b>IEC:</b>	Comisión internacional de Electrotecnia
<b>FMEDA:</b>	Análisis de los efectos de modo de falla
<b>HFT:</b>	Tolerancia a la falla de hardware
<b>MTBF:</b>	Tiempo promedio entre fallas
<b>MTTF:</b>	Tiempo promedio de falla
<b>MTTFS:</b>	Tiempo promedio de fallas espurias
<b>MTTR :</b>	Tiempo promedio de reparación
<b>TUV:</b>	Asociación de inspección técnica
<b>ALARP:</b>	Tan bajo como razonablemente sea posible
<b>ANSI:</b>	Instituto de estándares nacionales americanos
<b>DC:</b>	Cobertura de diagnóstico
<b>FAT:</b>	Test de aceptación de falla
<b>FPL:</b>	Lenguaje de programación fijo
<b>FVL:</b>	Lenguaje variable completo
<b>MooN:</b>	M canales de N canales
<b>NP:</b>	No programables
<b>PE:</b>	Electrónicos programables
<b>SRS:</b>	Especificaciones de requerimientos de seguridad
<b>SFF:</b>	Fracción de falla segura
<b>PTI:</b>	Intervalo de pruebas de periódicas
<b>ESD:</b>	Sistemas de paro de emergencia
<b>MCE:</b>	Matriz causa efecto
<b>F&amp;GS:</b>	Sistema de Fuego & Gas

<b>PST:</b>	Tiempo de seguridad del proceso
<b>DE-T-T:</b>	Des-energizar para "disparar"
<b>E-T-T:</b>	Energizar para "disparar"
<b>MOC:</b>	Manejo del cambio
<b>MOS:</b>	Mantenimiento de sobreescritura
<b>SPLC:</b>	PLC de seguridad
<b>PS-4:</b>	Estación de bombeo Páramo

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1-1:</b>	Riesgo.....	17
<b>Ecuación 2-1:</b>	Factor de Reducción de Riesgo.....	21
<b>Ecuación 3-1:</b>	Frecuencia de causas iniciantes.....	35
<b>Ecuación 4-1:</b>	Factor de ocupación.....	36
<b>Ecuación 5-1:</b>	Frecuencia sin mitigar.....	36
<b>Ecuación 6-1:</b>	Probabilidad de eventos intermedios.....	37
<b>Ecuación 7-1:</b>	Factor de reducción de riesgo.....	37
<b>Ecuación 8-1:</b>	PFDavg de un subsistema.....	40
<b>Ecuación 9-1:</b>	Fracción de Falla Seguro (SFF).....	44

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO A:</b>	Diagramas P&ID principales de la estación Paramo
<b>ANEXO B:</b>	MATRIZ DE RIESGO DE OCP
<b>ANEXO C:</b>	HAZOP ESTACIÓN PÁRAMO
<b>ANEXO D:</b>	PROBABILIDAD DE IGNICIÓN
<b>ANEXO E:</b>	PROBABILIDAD DE CAPAS DE PROTECCIÓN
<b>ANEXO F:</b>	BASE DE DATOS DE FALLAS DE EQUIPOS
<b>ANEXO G:</b>	INTERFAZ DE GESTIÓN DE ACTIVOS EMPRESARIALES (EAM)
<b>ANEXO H:</b>	FLUJO GRAMA HAZOP-LOPA
<b>ANEXO I:</b>	HOJAS OREDA
<b>ANEXO J:</b>	IPLs DE OPERADORES
<b>ANEXO K:</b>	INSTRUMENTOS PS-4
<b>ANEXO L:</b>	FRECUENCIAS DE CAUSAS INICIANTES
<b>ANEXO M:</b>	CARACTERÍSTICAS InTouch PANEL
<b>ANEXO M:</b>	CARACTERÍSTICAS DEL PROCESADOR DEL SPLC



## RESUMEN

El presente trabajo de titulación tuvo como objetivo el desarrollo de la fase uno del Project Management Body of Knowledge (PMBOK) para un Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) en el control de procesos de la estación de bombeo “Páramo” de Oleoducto de Crudos Pesados (OCP). Se identificaron los peligros y riesgos presentes utilizando los análisis de riesgos y operatividad (HAZOP) para la ejecución del análisis de capas de protección (LOPA) y obtención de los niveles de integridad de seguridad objetivos (SIL objetivo) en base a los estándares internacionales IEC: 61511 y ANSI/ISA 84. Se identificaron cuatro funciones instrumentadas de seguridad (SIF) y una recomendación a diseñar para reducir los riesgos a niveles tolerables. Posteriormente se desarrolló las especificaciones de requisitos de seguridad (SRS) y el cálculo de la probabilidad de falla en demanda promedio (PFDavg) de las SIFs diseñadas que ejecuta el SIS, lo que estableció un primer ejercicio acerca de los planes de acción a ser ejecutados para alcanzar el nivel de riesgo adecuado obtenidos en el LOPA. Se concibió la ingeniería del detalle de las SIFs y la recomendación, se obtuvo la arquitectura del SIS; para validar el proyecto se realizó una evaluación del mismo verificando la reducción de riesgo y obtención de los niveles SIL exigidos, en base al diseño y requerimientos definidos se obtuvieron los diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID) del SIS y la matriz de causa efecto (MCE) para la lógica de programación del PLC de seguridad (SPLC), basados en el estándar IEC: 61508 se seleccionó la instrumentación del SIS y finalmente se obtuvo una evaluación económica de equipos mayores del proyecto. Se concluyó que al contar con un SIS independiente del sistema básico de control de procesos (BPCS) es posible alcanzar la seguridad funcional en la estación de bombeo, al presentarse cualquier desviación atípica al proceso ayuda a llevar a un estado seguro a la estación, se ha determinado que es imperioso cumplir con los estándares internacionales IEC: 61511, IEC: 61508 y ANSI/ISA 84. Se recomienda que se desarrollen SIS para las demás estaciones que forman el oleoducto de OCP.

**Palabras Claves:** <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <TECNOLOGÍA DEL CONTROL AUTOMÁTICO>, <SISTEMA INSTRUMENTADO DE SEGURIDAD (SIS)>, <FUNCIÓN INSTRUMENTADA DE SEGURIDAD (SIF)>, <NIVEL DE INTEGRIDAD DE SEGURIDAD>, <IEC: 61511 (ESTÁNDAR)>, <ESPECIFICACIONES DE REQUISITOS DE SEGURIDAD (SRS)>, <IEC: 61508(ESTÁNDAR)>.

## ABSTRACT

The present research was carried out with objective of developing phase one of the Project Management Body of Knowledge (PMBOK) for a Safety Instrumented System (SIS) in the process control at Páramo station from “Oleoducto de Crudos Pesados” (OCP). Danger and risk were identified using the hazard and operational analysis (HAZOP) from execution from layer of protection analysis (LOPA) and achievement of objective safety integrity levels (SIL targets) based on international standards. IEC: 61511 and ANSI/ISA 84. Four safety instrumented functions (SIF) were identified and recommendation to be designed to reduce the levels to tolerable levels. Then, it developed the safety requirement specifications (SRS) and calculation of probability failure in demand average (PFD<sub>avg</sub>) of the designed SIFs to execute SIS, which established a first exercise about the action plans to be executed to reach the level of appropriate risk obtained in the LOPA. The engineering details were conceived SIFs and the recommendation, therefore, it was obtained the architecture SIS; to validate the project a reevaluation of Project was carried out verifying risk reduction and obtaining the required SIL levels. It based on design and defined requirements, pipeline and instrumentation diagrams of SIS and cause-effect matrix (MCE) were obtained for programming logic of safety PLC (SPLC), based on standard IEC: 61508 the instrumentation at SIS was selected and after an economic evaluation major equipment of Project was obtained. It is concluded that by having SIS independent of the basic process control system (BPCS), it is possible to achieve functional safety in pumping station, at occurrence of atypical deviation, process helps to bring the station to a safe state. It has determined that it is imperative to comply with international standards IEC: 61511, IEC:61508 and ANSI/ISA 84. It is recommended that SIS be developed for the other stations that make up the OCP pipeline.

Keywords: <TECHNOLOGY AND SCIENCE OF ENGINEERING>, <AUTOMATIC CONTROL TECHNOLOGY>, <SAFETY INSTRUMENTED SYSTEM (SIS)>, <SAFETY INSTRUMENTED FUNCTION (SIF)>, <SAFETY INTEGRITY LEVEL>, <IEC: 61511 (STANDARD)>, <SAFETY REQUIREMENT SPECIFICATIONS (SRS)>, <IEC: 61508 /STANDARD>.



## INTRODUCCIÓN

El cumplimiento de estándares y normativas que buscan alcanzar la seguridad funcional de procesos, apoyados por la implementación de dispositivos tecnológicos de punta en las instalaciones hidrocarburíferas son de gran necesidad hoy en día, el riesgo inherente del proceso de transporte de crudos pesados por el manejo de materiales peligrosos e inflamables es muy alto lo que puede generar catástrofes de gran magnitud, uno de los principales objetivos de las industrias a nivel mundial es aumentar su producción, en la actualidad además es necesario considerar adquirir una seguridad funcional de procesos y tener en claro que esta necesita ir actualizándose conforme lo haga el proceso productivo y que así el riesgo presente en los sistemas sea tolerable.

Algunas catástrofes a nivel internacional y en el Ecuador son (Venegas, 2013, pp-3-6):

- Incendio de Chevron en agosto de 2012
- Explosión en la refinería Francisco Madero en México en el año de 2012
- Explosión en la refinería Amuay en Venezuela en agosto de 2012
- Incendio en la planta LA FABRIL en Ecuador en 2012
- Incendio en Fibro Acero en Ecuador en 2013

Los Sistemas Instrumentados de Seguridad (SIS) han sido utilizados durante los últimos años por industrias de proceso las que requieren efectuar evaluaciones de los niveles de riesgo que contemplan sus actividades para así poder utilizar instrumentación de seguridad eléctrica o electrónica que adquiera altos niveles de rendimiento y patrones internacionales, es así como Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) desarrolla estándares que se deben adoptar para obtener las especificaciones necesarios de un Sistemas Instrumentados de Seguridad (SIS) desde su inicio hasta su desmantelamiento (IEC: 61511, 2003a, p.6 ).

Organismos europeos como el Comité Europeo de Normalización de Electrotecnia (CENLEC) adoptaron los estándares IEC: 61511 e IEC: 61508 por lo que han sido y continuaran siendo la base de las normas de seguridad funcional y de los marcos legales modernos relacionados con la integridad de los procesos, por lo que las normas expuestas por las Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), si bien fueron utilizados inicialmente en la industria química luego fueron adaptados en los métodos para trabajar con elementos de alto riesgo.

Oleoducto de Crudos Pesados (OCP) se preocupa de realizar todas sus técnicas de la manera más segura para los trabajadores, el proceso y el medio ambiente, por lo que tiene un documento de “Seguridad Industrial y Salud Ocupacional” que en sus segmentos más importantes toma en cuenta los siguientes aspectos (OCP, 2013):

- Gestión administrativa
- Gestión técnica
- Gestión del talento humano
- Procesos operativos básicos

Para la capacitación, entrenamiento y adiestramiento del recurso humano que trabaja en la empresa de OCP de manera directa o a través de la provisión de servicios y bienes en temas de seguridad, salud y ambiente se ha tomado los siguientes recursos (OCP, 2013):

- Inducción de seguridad, salud y ambiente
- Charla diaria
- Adiestramiento

Además los procesos en la Estación de bombeo Páramo constan de una “Respuesta a Emergencias” en lo que establece actividades como (OCP, 2013):

- Alerta temprana
- Monitoreo operativo
- Capacitación
- Relacionamiento con la comunidad
- Fiabilidad
- Apoyo externo

La implementación de estos protocolos y procedimientos en la empresa han permitido alcanzar estándares a través de los cuales OCP ha logrado reconocimientos a nivel nacional e internacional, y es por eso que se mantiene a la vanguardia en los aspectos que hacen referencia a la seguridad.

## **FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cómo se puede establecer cuál es el nivel de riesgo actual de la seguridad funcional de procesos y desarrollar la fase uno del Project Management Body of Knowledge (PMBOK) para un Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) en el control de procesos de la estación Páramo de Oleoducto de Crudos Pesados (OCP)?.

### **Sistematización**

- ¿Qué tipo de estudios específicos y adicionales se va a necesitar para el desarrollo del proyecto?
- ¿Qué estándares internacionales establecidos para la industria de procesos se deben utilizar?
- ¿Qué cálculos de probabilidad se utilizarán para el análisis de esta problemática?
- ¿Cuáles estrategias se pueden utilizar para elegir adecuadamente los Niveles de Integridad de Seguridad (SIL) en la estación de bombeo Páramo del Oleoducto de Crudos Pesados (OCP)?

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General:**

Desarrollar la fase uno del Project Management Body of Knowledge (PMBOK) para un Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) en el control de procesos de la estación de bombeo “Páramo” de Oleoducto de Crudos Pesados (OCP).

### **Objetivos Específicos:**

- Identificar los peligros y riesgos presentes actualmente en el proceso de bombeo de la estación “Páramo”, utilizando los Análisis de Riesgos y Operatividad (HAZOP) realizados en la compañía que sirven como base a la generación del Análisis de Capas de Protección (LOPA).
- Identificar las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF) en el proceso de bombeo de la estación “Páramo” para reducir los riesgos a niveles tolerables.

- Analizar los requerimientos para las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF) que debe ejecutar el Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) de la estación “Páramo”, aplicando los cálculos de la Probabilidad de Falla en Demanda Promedio (PFDavg) de cada una de las SIFs identificadas en el Análisis de Capas de Protección (LOPA) y posteriormente detalladas en las Especificaciones de Requisitos de Seguridad (SRS), para comprobar que sus valores se encuentran en los rangos de probabilidad exigidos por el nivel SIL requerido de acuerdo a lo establecido en los estándares IEC-61511 y 61508 (ANSI / ISA 84).
- Establecer un primer ejercicio de cuáles son los planes de acción a ser ejecutados para alcanzar el nivel de riesgo adecuado obtenido del estudio LOPA.

## **DELIMITACIÓN**

### **Espacio**

Se delimita espacialmente para la estación de bombeo “Páramo” de Oleoducto de Crudos Pesados (OCP) ubicada en KP 185+900 a 2863 m.s.n.m., por las características únicas que presenta el perfil hidráulico en donde se encuentra ubicada la estación.

### **Tiempo**

Esta investigación está realizada con datos actuales vigentes de la empresa Oleoducto de Crudos Pesados (OCP), empleando el HAZOP actual creado en el año dos mil ocho (2008) y con un análisis de una base de datos de que acumula antecedentes históricos de cinco años atrás para la frecuencia de ocurrencia de eventos iniciantes.

### **Alcance**

En particular se pretende desarrollar un proyecto técnico para obtener el sustento necesario para el desarrollo de un sistema instrumentado de seguridad (SIS) en la estación de bombeo “Páramo” (PS-4) de Oleoducto de Crudos Pesados (OCP), el cual se adapte la fase uno del PMBOK con el objetivo de reducir el riesgo en la estación de bombeo Páramo, mediante el Análisis de Riesgos y Operabilidad (HAZOP) y el Análisis de Capas de Protección (LOPA) para la identificación de las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF) con su Nivel de Integridad de Seguridad (SIL) objetivo, especificar el funcionamiento y los requerimientos necesarios para que las Funciones

Instrumentadas de Seguridad (SIF) respondan adecuadamente, formalizar el diseño de los Sistemas Instrumentado de Seguridad (SIS) con la cuantificación de la Probabilidad de Falla en Demanda Promedio ( $PFD_{avg}$ ) para adquirir el SIL objetivo, a su vez generar los respectivos P&ID, componer la matriz causa-efecto de acuerdo a los nuevos requerimientos de funcionalidad, y una evaluación económica del costo de equipos mayores de implementación del proyecto en la estación Páramo.



# CAPÍTULO I

## 1. MARCO REFERENCIAL

### 1.1 Definiciones

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) con la intención de facilitar la interpretación de la norma ICE: 61511 define las siguientes expresiones (IEC: 61511, 2003a, pp-8-22 ):

#### **Sistema de control**

Sistema que recibe señales de entrada del proceso, las encausa y genera señales de salida que determinan el comportamiento del proceso, este puede ser un Sistema Básico del Control de Procesos (BPCS) o un Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS), o a su vez la integración de ambos.

#### **Sistema Básico del Control de Procesos (BPCS)**

Es el sistema que se encarga de receptor variables de entradas para procesarlas y poder entregar variables controladas para que el proceso funcione dentro de los límites deseados, este a su vez es dinámico y opera en modo continuo.

Está formado por dispositivos que realizan la medición y transmisión de variables físicas, procesadores lógicos y actuadores finales.

#### **Canal**

Un canal es un elemento o varios de estos, que se encargan de realizar una función específica, pueden existir configuraciones de varios canales independientes que realizan la misma función.

Pueden estar formados por sensores, actuadores, módulos de entradas y salidas, y procesadores lógicos.

#### **Unidad funcional**

Entidad de hardware o software, o ambos, que es capaz de cumplir un propósito específico.

**Falla**

Condición anormal que disminuye o impide la capacidad de una unidad para que realice su función.

**Fallo de causa común**

Tipo de fallo que se presenta cuando sucede uno o más eventos, que causan fallo en dos o más canal independientes de un sistema multicanal.

**Fallo de modo común**

Fallo de dos o más canales del igual carácter.

**Fallo peligrosa**

Es un fallo que tiene el potencial necesario para hacer que el SIS actúe e instale al proceso en un estado seguro, la robustez antes estos tipos de fallos puede mejorar con sistemas multicanal.

**Fallo dependiente**

Fallo que no se puede expresar como el producto simple de las probabilidades incondicionales de los sucesos individuales que lo causaron, estos fallos incluye a causa común.

**Dispositivo**

Elementos de hardware o software o la unión de los dos que se encarga de realizar una tarea específica.

**Diagnóstico de Cobertura (DC)**

El DC se aplica a componentes o subsistemas de un SIS (sensores, elementos finales, solucionadores lógicos). Es la tasa de fallo detectada de la tasa total de un componente en pruebas de diagnóstico.

**Diversidad**

El uso de varios métodos para realizar una misma función requerida.

**Eléctrico / Electrónico / Programable (E/E/PE)**

Basado en la tecnología Eléctrica (E) y / o Electrónica (E) y / o Electrónica programable (PE).

**Error**

Diferencia entre el valor o condición deseada y la condición o valor verdadero obtenido.

**Instalaciones externas de reducción de riesgo**

Instalaciones independientes a los SIS que se encargan de mitigar o reducir riesgos presentes.

**Tolerancia a fallos**

Capacidad de una unidad funcional de seguir realizando su ocupación a pesar de la presencia de fallos o errores.

**Seguridad funcional**

Parte de la seguridad global que enmarca el uso de varias capas de protección independientes y al SIS con la finalidad de mantener integro al BPCS.

**Peligro**

Fuente potencial de daño.

**Error humano**

Acción errónea o inacción que causa resultados no deseados.

**Modo de operación**

Carácter en la que opera una Función Instrumentada de Seguridad (SIS), esta puede ser de seguridad, control o de monitoreo.

**Modo demanda**

Actúa en caso de un fallo peligroso en la instalación de seguridad, ha esto se toma una acción específica. Generalmente la existencia de fallas debe ser bajas en el año.

**Modo continuo**

Cubre las funciones SIF que implementa un control continuo para mantener la seguridad funcional, se aplica cuando la tasa de riesgo es mayor que la tasa de fallo de la SIF.

**Necesaria reducción de riesgo**

Es la reducción que se necesita para garantizar que se reduzca a un nivel tolerable.

**Prevención**

Acción que reduce la frecuencia de ocurrencia de un evento peligroso.

**Fase**

Etapas que describe las actividades a desarrollar en el ciclo de vida de la seguridad.

**Riesgo del proceso**

Riesgo inherente del proceso.

**Examen de prueba**

Prueba que revela fallas no detectadas en un SIS, de modo que si es necesario el sistema puede ser restaurado a su funcionalidad diseñada.

**Capas de protección**

Mecanismos independientes que reducen el riesgo mediante etapas de control, prevención o mitigación.

**Falla de hardware aleatorio**

Fallas de carácter aleatorio que resultan en la degradación del hardware.

**MooN**

Configuración del SIS o parte del mismo, que está formado por “N” canales independientes, que están dispuestos de tal manera que los “M” canales son suficientes para activar la función instrumentada de seguridad para que lleve al proceso ha estado seguro.

**Redundancia**

Uso de múltiples elementos o sistemas que se dedican a realizar la misma función, esto puede ser aplicado por elementos idénticos o por diversos elementos.

**Riesgo**

Es la combinación de la frecuencia de ocurrencia por la gravedad del daño.

**Falla segura o Falla de espurio**

Falla que no tiene el potencial de poner en un estado peligroso al SIS o de fallo de la función instrumentada de seguridad, la potencialidad puede depender de la arquitectura que tiene el canal del sistema.

**Fración de falla segura**

Fración de la tasa global de fallos de hardware aleatorios de un dispositivo que resulta en un fallo seguro o un fallo peligroso detectado.

**Función Instrumentada de Seguridad (SIF)**

Función de seguridad a ser implementado por un SIS y que tiene asociado un nivel de integridad de seguridad especificado y que es necesario para lograr la seguridad funcional.

**Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS)**

Instrumentado que es utilizado para implementar una o más Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF).

**Integridad de la seguridad**

Probabilidad media de que un sistema instrumentado de seguridad desempeñe satisfactoriamente las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF) requeridas en todas las condiciones establecidas dentro de un período de tiempo establecido.

**Nivel de Integridad de Seguridad (SIL)**

Valor discreto utilizado para especificar los requisitos de integridad de seguridad de las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF) que se asignarán a los sistemas instrumentados de seguridad.

**Probabilidad de Falla en Demanda Promedio ( $PFD_{avg}$ )**

Es el valor que indica que un sistema falle al responder una demanda, los valores se encuentran entre 0-1.

**Ciclo de vida de la seguridad funcional (CVSF)**

Son las actividades necesarias relacionadas con la aplicación de la (s) Función (es) Instrumentada (s) de Seguridad (SIF). Cada una de las etapas correspondientes al Ciclo de Vida de la Seguridad Funcional (CVSF) se encuentra detalladas posteriormente en el punto 1.4.

## **Especificaciones de Requerimientos de Seguridad (SRS)**

Especificaciones que contienen todos los requerimientos de las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF) que tienen que cumplir favorablemente para los Sistemas Instrumentados de Seguridad.

## **Lenguajes de programación**

A continuación se exponen los diferentes tipos de lenguajes de programación que pueden ser usados en los Sistemas Instrumentados de Seguridad (SIS) según el estándar IEC 61511:

- **Lenguaje de programación fijo (FPL):** Este arquetipo de expresiones se usa solo para la variación de parámetros como rangos de presiones, niveles de alarmar, rangos, etc.
- **Lenguaje de variabilidad limitada (LVL):** Este tipo de lenguaje es diseñado para que sea comprensible por los usuarios del proceso, estos pueden ser programación en escalera, diagramas de bloques o de secuencias de caracteres.
- **Lenguaje variable completo (FVL):** Se designa para ser comprensible por los programadores y puede realizar modificaciones a todo nivel.

## **Tipos de programa de software**

A continuación se exponen los diferentes tipos de programa de software que pueden ser usados en los Sistemas Instrumentados de Seguridad (SIS) según el estándar IEC 61511:

- **Software de aplicación:** Se usa en la aplicación del usuario, contiene secuencia lógicas, permisivos, límites y expresiones que controlan la entrada, salida, cálculos, y las decisiones para satisfacer los requisitos funcionales.
- **Software embebido:** Suministrado por el fabricante y no es accesible a modificación por el usuario final.
- **Software de utilidad:** Herramientas de software para la creación, modificación y documentación de programas de aplicación.

## **Ciclo de vida del software**

Indica los periodos desde la concepción del mismo hasta que termina la desactivación del software. Según la metodología expuesta por el estándar IEC: 61511 el ciclo de vida del software generalmente incluye una fase de requerimientos, fase de desarrollo, fase de prueba, fase de integración, fase de instalación y una fase de modificación.

**Fracaso sistemático**

Fallo relacionado de manera determinista con una causa determinada, que sólo puede eliminarse mediante una modificación del diseño o del proceso de fabricación, procedimientos operativos u otros factores relevantes.

**Riesgo tolerable**

Riesgo que se acepta en un contexto dado sobre la base de los valores actuales de la sociedad.

Por otro lado OCP y TECNIEQUIPOS ( 2016b, pp.7-13) en contaste con la norma IEC. 61511 definen los términos de la siguiente manera:

**Análisis de Modos de Falla, Efectos y Diagnostico (FMDA)**

Método cuantitativo que detecta los modos de falla posibles de un dispositivo o equipo, esto se usa para la certificación de componentes según la EIC: 61508.

**Factor de Reducción de Riesgo a ser conseguido (RRF objetivo)**

Es el grado de reducción que la función instrumentada de seguridad deberá proveer, se determina en el estudio LOPA.

**Intervalo de Pruebas Periódicas (PTI)**

Es el intervalo de tiempo establecido para la realización de las pruebas funcionales de la SIF, este tiempo es comprobado mediante la Verificación SIL y generalmente está alineado con los periodos de paradas de planta.

**Sistema de Paro de Emergencia (ESD)**

Este nombre es también utilizado para referirse al Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS).

**Tiempo Medio entre Fallos (MTBF)**

Es el tiempo medio que se produce entre fallos, solo se aplica a equipos reparables.

**Tiempo Promedio de Falla (MTTF)**

Es el tiempo promedio entre fallas de un componente o de la SIF, también se le conoce como tiempo esperado de falla.

### **Tiempo Promedio de Reparación (MTTR)**

Es el tiempo promedio transcurrido entre la ocurrencia de una falla y su reparación. Esto incluye el tiempo requerido para detectar la falla, iniciar la reparación y terminarla.

### **Tasa de Fallos en Falso (MTTFs)**

Todas las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF) deberán ser diseñadas de tal manera que el MTTFs no sea menor a 5 años.

### **Pruebas de cierre parcial (PST)**

Periodo entre un fallo en el BPCS y la ocurrencia del evento peligroso si la Función Instrumentada de Seguridad (SIF) no es realizada.

## **1.2 Estándares y Normas en la Seguridad Funcional**

### **1.2.1 IEC: 61508**

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) en el año de 1998 lanza a la comunidad industrial un estándar titulada “Seguridad funcional de los sistemas electrónicos programables relacionados con la seguridad”, es un estándar que hace referencia a la seguridad que deben brindar los dispositivos que van a ser usados en Sistemas Instrumentados de Seguridad (SIS), por lo que aplica para fabricantes, proveedores e instaladores de este tipo de elementos (Venegas, 2013, pp-13-14).

Algunas de las entidades a nivel mundial que certifican estos dispositivos son:

- TUV Rheinland
- EXIDA
- FM Global

Es una guía metodológica para que las industrias desarrollen sus propios procedimientos de seguridad, utilizando las directrices y recomendaciones señaladas en la norma que se debe seguir para que pueda ser implementado en cualquier tipo de procesos industriales.



La Tabla 1-1 muestra las diferentes partes en las se encuentra dividido el estándar IEC: 61508.

**Tabla 1-1:** Partes del estándar IEC: 61508

Estándar IEC: 61508	
Parte	Detalle
IEC: 61508-1	Requerimientos generales.
IEC: 61508-2	Requerimientos para sistemas E/E/EP.
IEC: 61508-3	Requerimientos de software.
IEC: 61508-4	Definiciones y abreviaciones.
IEC: 61508-5	Ejemplos de métodos de determinación del SIL.
IEC: 61508-6	Guías en aplicación para IEC 61508-2 e IEC 61508-3.
IEC: 61508-7	Revisión de técnicas y medidas.

Realizado por: Ojeda, 2018.

Fuente: (IEC: 61508, 1998, p.3)

### 1.2.2 IEC: 61511

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) genera estándar titulado “Seguridad funcional: SIS para el sector de la industria del proceso”, en vista de que la IEC: 61508 no define de manera clara las pautas que se debe tener en cuenta en la ejecución de Sistemas Instrumentados de Seguridad (SIS) se procedió a crear la EIC: 61511 en el año del 2003, con el objetivo de que sea de uso práctico para diseñadores de nivel de seguridad, integradores y usuarios.

IEC: 61511 es un estándar para la gestión de la seguridad a lo largo del ciclo de vida útil completo de un Sistema Instrumentada de Seguridad (SIS), desde el diseño hasta el desmantelamiento. En este enfoque es fundamental el ciclo de vida de seguridad general, que describe las actividades relacionadas con la especificación, el desarrollo, el funcionamiento o el mantenimiento de un sistema instrumentado de seguridad es el punto de referencia para las industrias que desean desarrollar Sistemas Instrumentados de Seguridad (SIS) (Rockwell, 2013, p.3).

La norma IEC: 61511 establece que para declarar la conformidad debe demostrarse que se hayan cumplido los requisitos de la norma de acuerdo a los criterios requeridos y que, en cada cláusula o subcláusula, se hayan cumplido todos los objetivos. En la práctica, por lo general resulta difícil demostrar la conformidad total con cada cláusula y subcláusula de la norma y se precisa cierto juicio para determinar el nivel de rigor aplicado al cumplimiento de los requisitos. Normalmente, el grado de rigor necesario depende de determinados factores como (Rockwell, 2013, pp-3-7):

- La naturaleza de los peligros
- La gravedad de las consecuencias

- La reducción de riesgos necesaria
- La tecnología utilizada

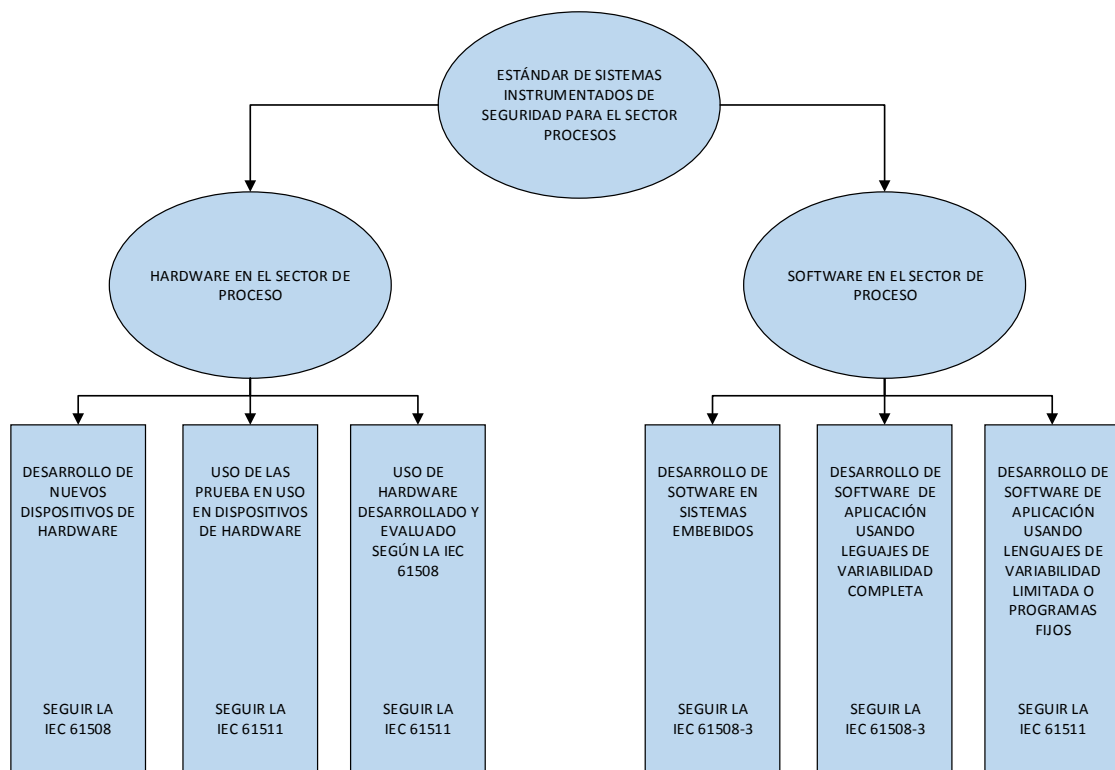
Algunos de los motivos para cumplir con la norma son:

- Requisitos contractuales
- Optimización de la arquitectura del diseño
- Posible ventaja en lo que respecta a marketing

La norma consta de tres partes que son (IEC: 61511, 2003a):

- EIC: 61511-1: Marco, definiciones, software.
- EIC: 61511-2: Directrices para la aplicación.
- EIC: 61511-3: Guías para la determinación del nivel SIL.

Los estándares establecidos por la Comisión Electrotécnica Internacional como la IEC: 61508 y la IEC: 61511 se relacionan entre sí como se puede ilustrar en la Figura 1-1.



**Figura 1-1:** Relación entre la IEC: 61508 y la IEC: 61511

Fuente:(IEC: 61511, 2003a, p.14)

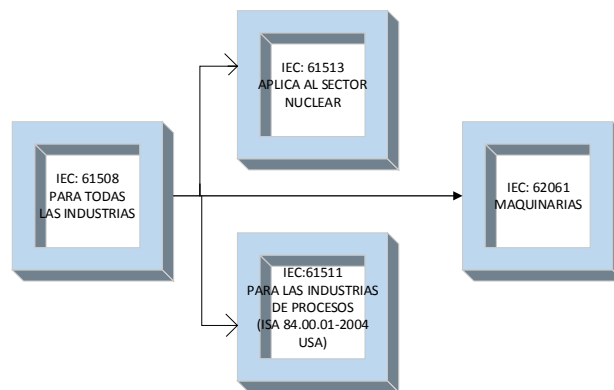
### 1.2.3 ANSI/ISA-S84.01-2004

Se la conoce como “Aplicación de sistemas instrumentados de seguridad para los procesos de la industria”, es una norma Americana que equivale a la IEC: 61511.

Se usa para el diseño de sistemas instrumentados de seguridad en los que se abarcan los siguientes aspectos tecnológicos del proyecto:

- Eléctrica
- Electrónica
- Electrónica programable

Su uso es dedicado para el personal que participa en el desarrollo y fabricación de SIS, la relación con los estándares de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) es la siguiente como se muestra en la Figura 2-1:



**Figura 2-1:** Relación de las normativas IEC con ANSI/ISA

Fuente:(ANSI/ISA, 2004, p.24)

#### 1.2.4 ANSI/ISA-5.1-2009

La ANSI/ISA-5.1 ( 2009, pp.9-13) se ha encargado de establecer un medio estandarizado para la representación e identificación de instrumentos o dispositivos, y las funciones inherentes, los sistemas de instrumentación y funciones, y las funciones de software de medición, monitoreo y control, presentando un sistema de denominación que incluya la identificación de esquemas y símbolos gráficos que se pueden encontrar en las representaciones industriales, aparte de que esta norma ha sido creada principalmente por trabajadores de la industrias de petróleo y químicas.

Las industrias en las que se usa este estándar son:

- Petroleras
- Químicas
- Generación de energía

### 1.3 Riesgo

Según Rockwell Automation(2013, p.30) el riesgo es la posibilidad de que un peligro cause un efecto adverso que pueda medirse, esto puede causar daños al personal de planta, bienes materiales o el medio ambiente, en contraste con lo anterior “el riesgo viene a ser una abstracción de origen completamente humano” (Soldano, 2008, p.2).

El riesgo se debe concebir como una medida cualitativa o cuantitativa para su análisis en los sistemas instrumentados de seguridad, en donde intervienen dos aspectos relevantes que son la frecuencia y las consecuencias de que pueda provocar dicho evento.

El riesgo se puede cuantificar mediante la siguiente Ecuación 1-1:

$$Riesgo \left[ \frac{muertes}{año} \right] = frecuencia \left[ \frac{accidentes}{año} \right] \times consecuencias \left[ \frac{muertes}{accidentes} \right]$$

**Ecuación 1-1: Riesgo**

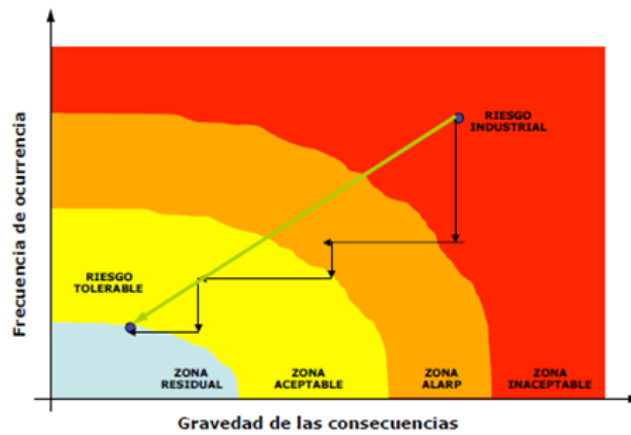
*En donde:*

Frecuencia: Es el número de veces que se repite un evento en un determinado lapso de tiempo.

Consecuencia: Es lo que obtiene como resultado cuando se lleva a cabo un evento.

Severidad: Es el nivel de gravedad que tiene un evento.

De la siguiente manera en la Figura: 3-1 se puede observar cómo se comporta el riesgo dependiendo su frecuencia de ocurrencia y la gravedad de las consecuencias:



**Figura 3-1:** Niveles de Riesgo

Fuente:(Cataluña, 2014, p.6)

Los riesgos se deben identificar de una manera temprana para que se puedan eliminar, reducir o mitigar de una manera adecuada.

### 1.3.1 Tipos de Riesgo

Los riesgos se pueden valorar por naturaleza o frecuencia de tal manera que resultan ser (Galindo, 2012, pp. 15-28):

- **Riesgo inherente:** Es el riesgo potencial que el proceso tiene asociado, ya sea por los materiales con los que se trabaja, las condiciones de labor o por el tipo de maquinaria que se utiliza.
- **Riesgo tolerable:** El riesgo nunca puede llegar a ser cero, por lo que es necesario aceptar una cantidad del mismo en contexto de los valores de la sociedad actual, de normativas vigentes o de la aceptabilidad que la empresa tiene, ha esto se lo conoce como riesgo tolerable, el mismo puede ser documentado de manera matricial como se aprecia en la Tabla 2-1.

**Tabla 2-1:** Valoración del riesgo de forma matricial

	Lesión Documentable	Lesión con Pérdida de Tiempo	Lesión Permanente o Fatalidad	Múltiples fatalidades
1/100 años	Aceptable	Moderado	Extremo	Extremo
1/1000 años	Aceptable	Moderado	Moderado	Extremo
1/10000 años	Aceptable	Aceptable	Moderado	Moderado
1/100000 años	Aceptable	Aceptable	Moderado	Moderado

Realizado por: Ojeda, 2017.

Fuente:(Galindo, 2012, p.27)

- **Riesgo individual (Principio ALARP):** Es la frecuencia de manera individual que un individuo reciba un nivel sostenido de daño según Galindo (2012, pp.27-28), es decir se puede sintetizar como la probabilidad de fatalidad en un año, este riesgo se encuentra entre dos límites ya que este debe ser tan bajo como sea posible como se demuestra en la Figura 4-1.



**Figura 4-1: ALARP**

Fuente:(Emerson, 2005a, p.7)

- **Riesgo social:** Es el riesgo potencial al que la planta industrial expone a la sociedad, esto se usa en caso de desastres a gran escala.

### 1.3.2 Métodos de identificación del riesgo

En los procesos siempre ha sido de gran necesidad poder identificar los riesgos presentes para poder reducir su severidad o mitigarlos adecuadamente, por este motivo se han desarrollado varias técnicas, a continuación se considera los de mayor relevancia (Cataluña, 2014, pp.22-24):

- **Checklist:** Lista de registros de las acciones y las consecuencias que se han dado en los procesos que ayudan a determinar los riesgos a los que se está expuesto.
- **What if?:** Se realiza una reunión con personas que tengan conocimiento sobre el proceso en estudio en el que se cuestionan ¿Qué pasa si?, para descubrir falencias que se deban reducir.

- **Estudio de peligros y operabilidad (HAZOP):** Se identifican los diferentes peligros existentes de manera sistemática con un grupo de trabajo que comprenda de personas con conocimientos en varias áreas del proceso y a su vez de gente externa para una mejor deducción.
- **Análisis de árbol de fallas (FTA):** Identifica las causas de eventos peligrosos.

### 1.3.3 Reducción de Riesgo

Una vez identificado los riesgos en los procesos para poder reducirlos o mitigarlos es necesario agregar métodos independientes, ha esto se lo conoce como capas de protección, mientras más capas tenga un proceso este es tiende a acrecentar su fiabilidad.

Las diferentes capas de protección que se aplican en la industria se pueden observar en la Figura 5-1.



**Figura 5-1:** Capas de Protección

Fuente: (IEC: 61511, 2003a, p.34)

Una vez identificado que el riesgo inherente es mayor que le riesgo tolerable es necesario reducirlo, por lo que existen dos diferentes metodologías:

- **Cuantitativa:** Para realizarlo de manera cuantitativa es necesario tener en cuenta el factor de reducción de riesgo (RRF) que se establece en reducir la cantidad de fatalidad en rangos de una vez cada 10 años a una vez cada 10,000 años, ha este valor se le puede asocia un nivel SIL como se verifica en la Tabla 3-1 (Emerson, 2005b, p.1).

**Tabla 3-1:** Niveles de factor de reducción de riesgo objetivo

Nivel de integridad de seguridad	Factor de reducción de riesgo objetivo
4	>10000 a ≤ 100000
3	>1000 a ≤ 10000
2	>100 a ≤ 1000
1	>10 a ≤ 100

Realizado por: Ojeda, 2017.

Fuente:(Emerson, 2005b, p.3)

Para lograr este método se necesita la recolección de muchos datos para que sean relevantes y a su vez es necesario que las empresas expresen niveles cuantificados que pueden tolerar con respecto a lesiones graves por años o incluso muertes lo cual hace que las empresas se sientan incomodas antes esta metodología.

El Factor de Reducción de Riesgo (RRF) es inversamente proporcional a la probabilidad de falla en demanda promedio ( $PFD_{avg}$ ) como se expresa en la Ecuación 2-1:

$$RRF = \frac{1}{PFD_{avg}}$$

**Ecuación 2-1:** Factor de Reducción de Riesgo

*En donde:*

RRF: Factor de reducción de riesgo.

$PFD_{avg}$ : Probabilidad de falla en demanda promedio.

- **Cualitativa:** Se basa en el uso tablas con clasificaciones cualitativas las cuales denotan características de frecuencia y consecuencias para poder encasillar la reducción de riesgo necesaria que necesita el evento como se observa en la Tabla 4-1 (Emerson, 2005c, p.2).

**Tabla 4-1:** Matriz de reducción de riesgo



Pro	Alta	2	3	Riesgo demasiado alto
	Media	1	2	3
	Baja	No se requiere	1	3
		Menores	Graves	Extensas
<b>Consecuencia</b>				

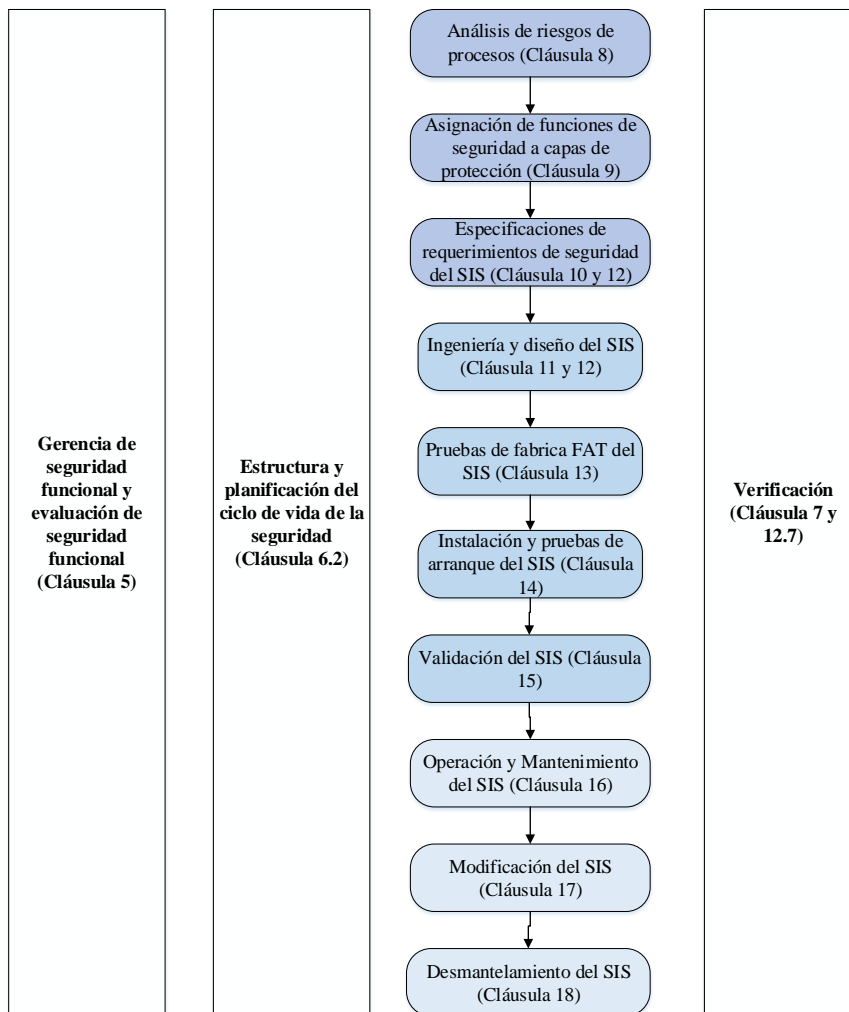
**Realizado por:** Ojeda, 2017.

**Fuente:**(Emerson, 2005c)

#### 1.4 Ciclo de Vida de la Seguridad Funcional (CVSF)

El autor Luis García ( 2005, pp.5-12) establece al Ciclo de Vida de la Seguridad Funcional (CVSF) como una metodología práctica que delinea los pasos a seguir para alcanzar una seguridad funcional según, obteniendo como resultado una seguridad integral del proceso, su objetivo primordial a conseguir en la reducción de riesgos a niveles tolerables, a su vez señala al CVSF como la base fundamental de los nuevos estándares de seguridad funcional para procesos industriales a pesar de su intensivo nivel de ingeniería y documentación.

El ciclo de vida como se observa en la Figura 6-1 nos aclara las acciones a tomar desde el inicio hasta su desmantelamiento que una industria debe adoptar para el desarrollo de Sistemas Instrumentados de Seguridad (SIS) en sus procesos, según Venegas (2013, p.17) el CVSF “Representa una descripción simplificada de los pasos que deben seguirse para desarrollar un SIS según la norma actual, pero no necesariamente representa el proceso funcional necesario que una compañía o empresa deba implementar para el diseño de un SIS en particular”, lo que es beneficioso ya que deja a carta abierta para que se pueda implementar en cualquier tipo de proceso adoptando diferentes metodologías siempre y cuando estas cumplan la secuencia, y normas del ciclo de vida.



**Figura 6-1:** Ciclo de Vida de la Seguridad Funcional (CVSF)

Fuente: (IEC: 61511, 2003a, p.25 )

#### 1.4.1 Fases del Ciclo de Vida de la Seguridad Funcional

Las rutinas establecidas dentro del Ciclo de Vida de la seguridad Funcional (CVSF) se pueden puntualizar en tres etapas generales:

- **Análisis:** Es la primera etapa y de su buen desarrollo depende del éxito del sistema instrumentado de seguridad ya que abarca el reconocimiento del proceso en tratamiento para asignar las funciones instrumentadas de seguridad teniendo en cuenta la identificación de los peligros y riesgos, a su vez se realiza la asignación del SIL y las especificaciones de requerimientos del sistema instrumentado de seguridad (Galindo, 2012, pp.64-68).

- **Implementación:** Se realiza la ingeniería y diseño del sistema instrumentado de seguridad tanto en hardware como en software, se determina la frecuencia de las pruebas FAT, la instalación del SIS y las pruebas de arranque, y por último se da la validación inicial del sistema (Galindo, 2012, pp.68-72).
- **Operación:** Se asignan los procedimientos de operación y mantenimientos hacer realizados en el SIS, se analizan posibles modificaciones que se deban implementar y por último el desmantelamiento del sistema instrumentado de seguridad (Galindo, 2012, pp.72-74).

#### **1.4.2 *Requerimientos del Ciclo de Vida de la Seguridad Funcional***

Cada una de las fases del Ciclo de Vida de la Seguridad Funcional (CVSF) tiene requerimientos de datos entrada para poder lograr sus objetivos obteniendo resultados. En la Tabla 5-1 se destacan las particularidades de cada ciclo.

**Tabla 5-1:** Requerimientos del ciclo de vida de la seguridad funcional

Actividades		Objetivos	Cláusula	Entradas	Salidas
#	Título				
1	Análisis de peligros y riesgos	Determinar los peligros y eventos peligrosos del proceso y equipo asociado, la secuencia de eventos que conducen al evento peligroso, los riesgos de proceso asociados con el evento peligroso, los requerimientos de reducción de riesgo y las funciones de seguridad requeridas para lograr la necesaria reducción del riesgo	8	Diseño del proceso, disposición, acuerdos de dotación,	Una descripción de los peligros, de la (s) función (es) de seguridad requerida (s) y de la reducción de riesgo asociada
2	Asignación de las SIF	Asignación de funciones de seguridad a capas de protección y para cada función instrumentada, el nivel de integridad de seguridad(SIL) asociado	9	Una descripción de los peligros, de la (s) función (es) de seguridad requerida (s) y de la reducción de riesgo asociada	Descripción de la asignación de los requisitos de seguridad
3	SIS safety	Especificar los requisitos para cada SIS, en términos de las funciones instrumentadas de seguridad requeridas y su integridad de seguridad asociada, con el fin de lograr la seguridad funcional requerida	10	Descripción de la asignación de los requisitos de seguridad	Requisitos de seguridad del SIS; Requisitos de seguridad del software
4	Diseño e ingeniería del SIS	Diseñar el SIS para cumplir con los requisitos para las funciones instrumentadas de seguridad y la integridad de seguridad	11 y 12.4	Requisitos de seguridad del SIS; Requisitos de seguridad del software	Diseño del SIS en conformidad con los requisitos del sistema, planificación de la prueba de integración del sistema.
5	SIS instalación, comisionamiento y desmantelamiento	Integrar y probar el SIS para validar que el SIS cumple en todos los aspectos los requisitos de seguridad en términos de las funciones instrumentadas de seguridad requeridas y la integridad de seguridad requerida	12.3,14, 15	Diseño SIS, plan de integración, SRS y plan de evaluación.	SIS de funcionamiento completo en conformidad con los resultados de diseño SIS de las pruebas de integración SIS.resultados de instalación, puesta en marcha y validación.

**Tabla 5-1:**

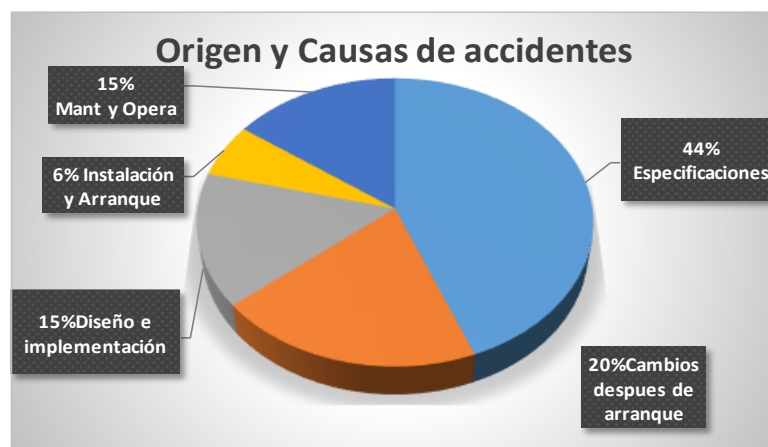
6	SIS operación y mantenimiento	Para garantizar que la seguridad funcional del SIS se mantenga durante	16	SRS, SIS diseño, Plan de operación y mantenimiento del SIS	Resultados de las actividades de operación y mantenimiento.
7	SIS modificaciones	Realizar correcciones, mejoras o adaptaciones al SIS, velando por que se consiga y mantenga el nivel de integridad de seguridad requerido	17	Revisión de los requerimientos de seguridad	Resultados de las modificaciones del SIS
8	Decomisionamiento	Para garantizar una revisión adecuada, la organización del sector y asegurar que los SIF sigan siendo apropiados	18	Requerimientos de construcción del SIS e información sobre el proceso	SIF(s) fuera(s) de servicio
9	SIS verificación	Probar y evaluar los resultados de una fase dada para asegurar la corrección y consistencia con respecto a los productos y estándares proporcionados como entrada a esa fase	7, 12.7	Plan de verificación para cada una de las fases.	Resultados de verificaciones para cada una de las fases.
10	Evaluación de la seguridad funcional	Investigar y llegar a una sentencia sobre la seguridad funcional alcanzada por el SIS	5	Planificación de la evaluación de la seguridad funcional del SIS	Un SIS seguro y una evaluación de la seguridad funcional

**Realizado por:** Ojeda, 2017.

**Fuente:** (IEC: 61511, 2003, pp.28-29)

### 1.4.3 Fallas ocurridas dentro del Ciclo de Vida de los Sistemas

En la publicación “Fuera de control” de la HSE (Health Safety Executive, 2003, pp.30-33) se analiza el origen de las fallas que se producen a lo largo de la vida de los sistemas dando como resultado el Gráfico 1-1 donde se observa las distintas fallas ocurridas y el porcentaje de las mismas.



**Gráfico 1-1:** Origen y Causas de accidentes en el CVSF

**Fuente:** (UK Health and Safety Executive, 2003, p.31)

## 1.5 Análisis de Riesgos y Operabilidad (HAZOP)

La aplicación HAZOP se desarrolló en el Reino Unido en el año de 1974 por la empresa química ICI debido a un grave accidente ocurrido en Flixborough, por su eficacia de la misma forma fueron implementados en diferentes tipos de industrias petroleras, metalúrgicas, mineras etc.

El método HAZOP es una técnica cualitativa multidisciplinar que se usa para la identificación de riesgos y el análisis de operabilidad, es probablemente el método más utilizado en el área de procesos (Cataluña, 2014, pp-26-29).

En la Tabla 6-1 se muestra el modelo de hojas HAZOP manejado por OCP.

**Tabla 6-1:** Modelo de hoja HAZOP de OCP

<b>Nodo 3:</b> Facilidades de rebombeo y tranferencia desde la estación Cayagama hacia la estación Sardinias <b>Tag equipos:</b> P-0201 A/B/C/D/E, E-0301 A/B/C/D/E, P-0301 A/B/C/D/E <b>Intención de diseño:</b> Transferencia de crudo entre 105 MBD y 210 MBD a 160 PSI para recepción a 300 PSI <b>Desviación:</b> Mas temperatura				<b>Planos:</b> 2745-R-DP-02001 REV 13; 2745-R-DP-02007 REV 18; 2745-R-DP-02008 REV 19; 2745-R-DP-03001 REV 13;	
Causas	Consecuencias	Protecciones	Recomendaciones	Responsable	Categoría
1. Falla en el control de temperatura con incremento de temperatura del crudo a la salida de los intercambadores E-0301	1.1 Incremento de temperatura del crudo con posible afectación de la integridad de las bombas P-0301 1.2 Posible afectación de la integridad del sistema de tubería	1.1 TT-03410A con alarma por alta temperatura enclavamiento para parada de la bomba.	45. Establecer dos niveles de alta temperatura en el crudo de forma tal que en una primera instancia se origine parada del calentamiento del crudo y en cao de que persista el incremento se pare la bomba.	Ingeniería	II

**Realizado por:** Ojeda, 2017.

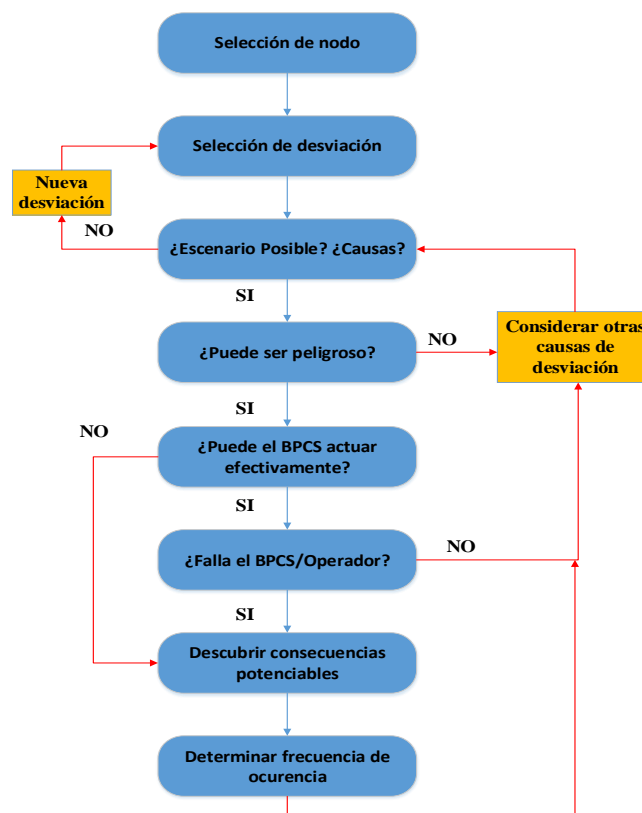
**Fuente:** (OCP, 2008, p.58)

Algunos autores relacionados con la problemática como Cataluña (2014) y Galindo (2012) definen los términos más usados en la realización del método HAZOP de la siguiente manera:

- **Nodo:** Es el tramo específico donde se evalúan las posibles desviaciones del proceso, se debe dividir el proceso en nodos para una mayor relevancia del análisis.
- **Intención:** Descripción de cómo se desea que se comporte el proceso el nodo de análisis.
- **Desviación:** Factor de anormalidad de las variables del proceso, está formada por un parámetro y la palabra guía.
- **Parámetro:** La variable de estudio en la desviación de proceso. Ej. Presión, temperatura, nivel, pH, etc.

- **Palabra guía:** Es el nivel de la desviación de la variable en estudio, estas suelen ser no, mas menos, inverso, en lugar, etc.
- **Causa:** son los motivos por lo que se podrían estar ocasionando las desviaciones.
- **Consecuencias:** Son los efectos que tiene sobre el proceso las desviaciones identificadas.
- **Protecciones:** Son salvaguardas que tiene el proceso para ayudar a reducir la frecuencia de ocurrencia de la desviación o ayuda a mitigar las consecuencias.
- **Recomendación:** Son modificaciones, propuestas o mejoras que se sugieren para mejorar el proceso.

En la Figura 7-1 se muestra la lógica que se debe aplicar para realizar adecuadamente el método HAZOP.



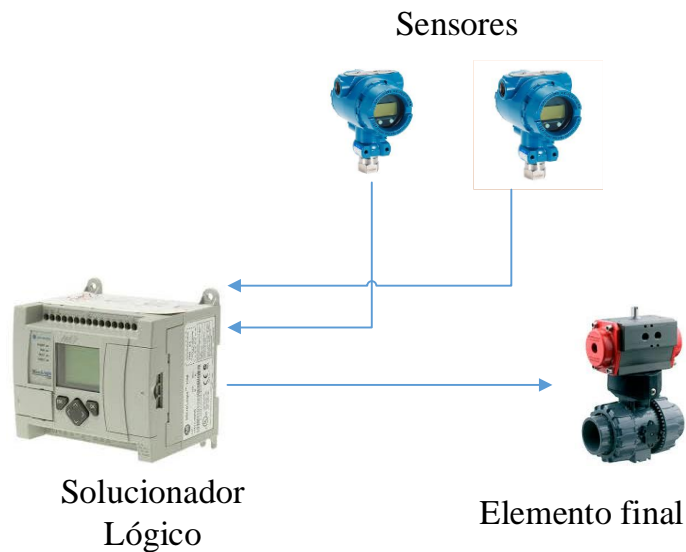
**Figura 7-1:** Flujo grama del HAZOP

Fuente:(Galindo, 2012, p.84)

## 1.6 Sistemas Instrumentados de Seguridad (SIS)

Según la norma IEC: 61511 define que “Un Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) es un sistema instrumentado utilizado para implementar una o más funciones instrumentadas de seguridad, y se compone de cualquier combinación de sensor(es), controlador lógico y elementos finales de control” como se contempla en la Figura 8-1, estos elementos son conocidos como los

dispositivos esenciales para llevar a cabo una Función Instrumentada de Seguridad (SIF) (IEC: 61511, 2003a, pp-17-18)



**Figura 8-1:** Elementos de un SIS

Realizado por: Ojeda, 2017.

La empresa Emerson (2005c, p.1) aclara que la operación de sistema instrumentado de seguridad es totalmente diferente a la del Sistema de Control Básico de Procesos (BPCS), incluso en este es posible la variación de los diferentes valores de referencia, o alarmas entre otros, no obstante que en un SIS estas consignas son estáticas en otras palabras es considerado un sistema “durmiente”, esperando las condiciones necesarias que activen alguna de sus funciones instrumentadas de seguridad (SIF) .

### 1.7 Nivel de Integridad de Seguridad (SIL)

Es el valor cuantitativo que se establece para medir el nivel de seguridad en un proceso, este es medido en cuatro niveles de magnitud. La ubicación del SIL se realiza analizando el valor de la frecuencia de ocurrencia de un incidente o peligro, así como el factor de reducción de riesgo que este proveerá al sistema (IEC: 61511, 2003a, p.17).

De acuerdo con la norma IEC: 61511-1 en su primera parte (2003, p.43) es posible satisfacer una función de SIL 3 con la utilización de funciones de SIL 1 y SIL 2 simultáneamente.



En la Tabla 7-1 se identifican los valores de FRR y PFD<sub>avg</sub> que se debe alcanzar para los diferentes niveles SIL.

**Tabla 7-1:** Nivel SIL para funciones en modo a demanda

Modo de operación a demanda		
Nivel integral de (SIL)	Probabilidad de fallo en demanda promedio (PFD <sub>avg</sub> )	Factor de Reducción de riesgo objetivo
4	$\leq 0,00001$ a $< 0,0001$	$>10000$ a $\leq 100000$
3	$\leq 0,0001$ a $< 0,001$	$>1000$ a $\leq 10000$
2	$\leq 0,001$ a $< 0,01$	$>100$ a $\leq 1000$
1	$\leq 0,01$ a $< 0,1$	$>10$ a $\leq 100$

Realizado por: Ojeda, 2017.

Fuente: (IEC: 61511, 2003a, p.43)

Para poder utilizar la tabla en modo a demanda se debe revisar como la IEC-61511 define:

*El objetivo PFD<sub>avg</sub> se determinará por la reducción de riesgo requerida la reducción de riesgo requerida la cual se puede determinar comparando el riesgo de proceso sin el SIS en caso de no tenerlo con el riesgo tolerable, esto se puede establecer cuantitativa o cualitativamente utilizando las técnicas de la IEC: 61511-3 (IEC: 61511, 2003b, p.24).*

En la Tabla 8-1 se identifican los valores de frecuencia de falla objetivo que se debe alcanzar para los diferentes niveles SIL.

**Tabla 8-1:** Niveles SIL para funciones en modo continuo

Modo de operación continua	
Nivel integral de (SIL)	Frecuencia objetivo de fallas peligrosas para realizar la función instrumentada de seguridad (por hora)
4	$\leq 0,000000001$ a $< 0,00000001$
3	$\leq 0,00000001$ a $< 0,0000001$
2	$\leq 0,0000001$ a $< 0,000001$
1	$\leq 0,000001$ a $< 0,00001$

Realizado por: Ojeda, 2017.

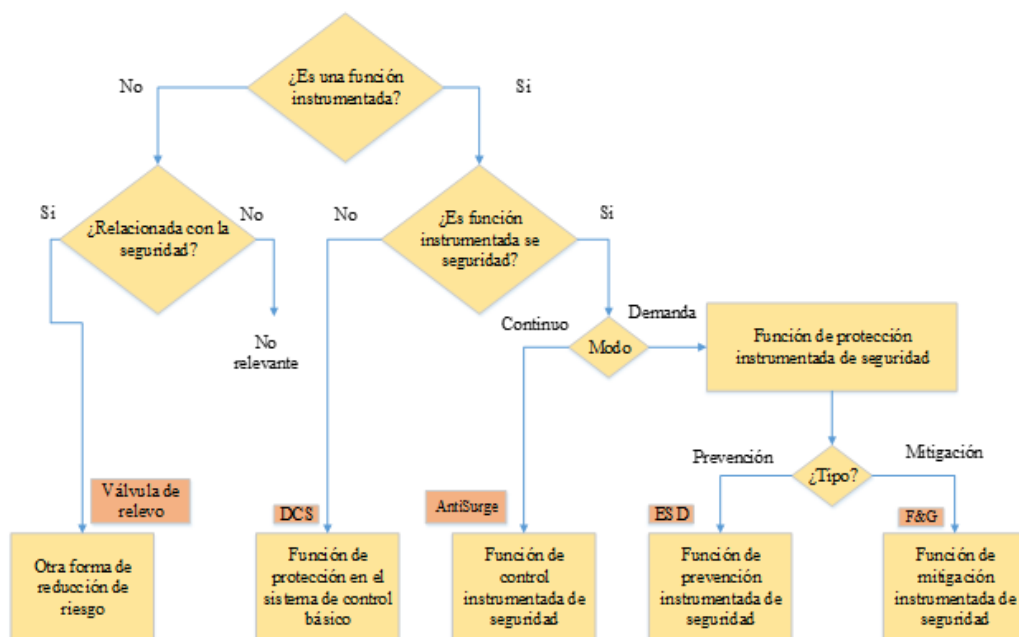
Fuente: (IEC: 61511, 2003a, p.43)

La para Niveles de Integridad de Seguridad (SIL) en modo continuo anterior de IEC 61511-1 define “El Sil en términos de la frecuencia objetivo de fallos peligrosos a realizar el SIF, esto se determinará por el índice de fallas tolerable del SIS, tomando en la consecuencia del fracaso en una aplicación particular”(IEC: 61511, 2003b, p.24).

### 1.7.1 Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF)

Una función instrumentada de seguridad está formada por un controlador lógico, sensor y actuador, los cuales cumplen con la finalidad de reducir el riesgo existen en diferentes sistemas de control mediante el Nivel de Integridad de Seguridad (SIL) que estos adquieren previo a su diseño para poder comparar alternativas de procedimientos (Machiavelo, 2009, pp.1-2).

Para distinguir los tipos de funciones instrumentadas el estándar IEC: 61511-1 en su parte uno como un flujo grama a seguir dependiendo sus características como se ejemplifica en la Figura 9-1:



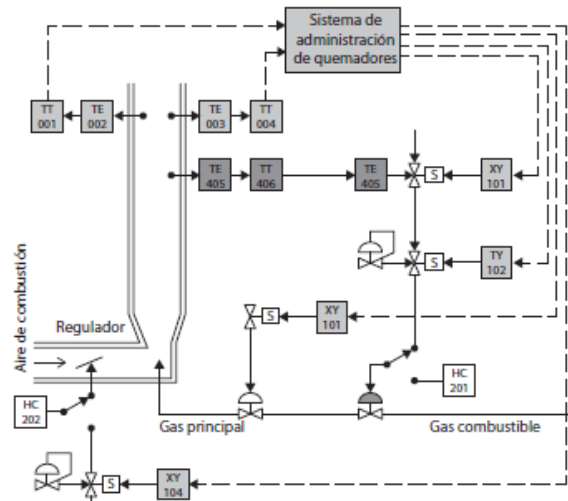
**Figura 9-1:** Tipos de funciones instrumentadas

Fuente: (IEC: 61511, 2003a, p.16)

Las funciones instrumentadas de seguridad se clasifican en dos tipos según la norma IEC-51611, por lo que en una publicación revisemos como Rockwell Automation lo define:

*Al evaluar un sistema de seguridad en términos de fallos de funcionamiento, existen dos opciones principales en función del modo de funcionamiento. Si un sistema de seguridad experimenta una frecuencia baja de demanda, normalmente inferior a una vez al año, se puede decir que funciona en modo a demanda (Rockwell, 2013, p.48).*

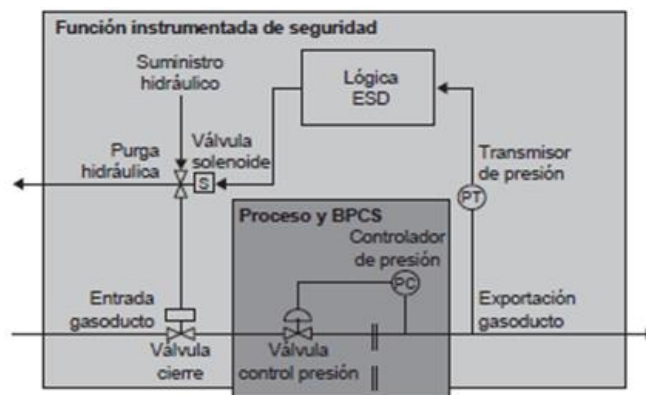
- **Funciones instrumentadas de seguridad en modo continuo:** Su frecuencia de la demanda por lo general tiende a ser muy alta, mayor a 0.5 por ser un probabilidad esta tiende a ser un valor adimensional, en general estas tienden a formar parte de algunas funciones de control y su fallo generalmente provoca una situación peligrosa(Rockwell, 2013, pp-48-61) , un ejemplo se muestra en la Figura 10-1.



**Figura 10-1:** SIF en modo continuo

Fuente: (Rockwell, 2013, p.55)

- **Funciones instrumentadas de seguridad en modo a demanda:** Estas funciones pueden ser identificadas ya que al ser activadas adoptan una acción específica en respuestas a las condiciones del proceso, estas pueden ser potencialmente peligrosas en caso de que el sistema básico del control de procesos falle (Rockwell, 2013, pp-48-61). Estas funciones de seguridad generalmente son totalmente independientes del proceso de control y frecuencia de demanda es baja, un ejemplo se muestra en la Figura 11-1.



**Figura 11-1:** SIF en modo a demanda

Fuente: (Rockwell, 2013, p.54)

### 1.7.2 Análisis de Capas de Protección

El Análisis de Capas de Protección (LOPA) es una herramienta semi-cuantitativa introducida a principios de los años 90', la cual es utilizada para tener una valoración del riesgo y como herramienta de análisis de riesgos, esta usa categorizaciones numéricas para poder estimar los parámetros requeridos para calcular la reducción de riesgo necesario con ciertos criterios de aceptación que son dados dependiendo el entorno donde se dé el proceso (Machiavelo, 2008, p.12), además de según ABS (2012, p.1) el LOPA es una técnica para las empresa que buscan satisfacer como objetivo en mantener un riesgo Tan Bajo Como Sea Posible (ALARP).

Acorde a la norma IEC:61511-3 (2003c, p.50) los datos a ser obtenidos por el Análisis de Capas de Protección (LOPA) pueden ser tomados del Análisis de riesgos y Operabilidad (HAZOP) como se muestra en la Tabla 9-1:

**Tabla 9-1:** Datos del HAZOP para ser usados en el LOPA

Información requerida por el LOPA	Información desarrollada en el HAZOP
Impacto de los eventos	Consecuencias
Nivel de seguridad	Severidad de la concecuencia
Causa iniciante	Causa
Probabilidad iniciante	Frecuencia de la causa
Capas de protección	Salvaguardas existentes
Mitigación adicional requerida	Recomienda nuevas salvaguardas

Realizado por: Ojeda, 2017.

Fuente: (IEC: 61511, 2003, p.50)

Las razones por la cuales el método LOPA es la mejor opción para obtención del nivel de riesgo a reducir es que se basa en el cálculo de probabilidades de eventos iniciantes ( $\gamma r$ ), la frecuencia de consecuencias no mitigadas ( $\omega r$ ) y mitigas ( $\beta r$ ), y determinada una Probabilidad de Fallo en Demanda Promedio (PFDavg) objetivo, lo cual hace que se trabaje con valores cuantitativos dejando aún lado la subjetividad de riesgo, los diferentes parámetros expuestos son detallados posteriormente.

Un modelo de tabla LOPA establecida con los parámetros necesarios para su desarrollo se muestra en la Tabla 10-1.

**Tabla 10-1:** Modelo de tabla LOPA

# Nodo	# Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de severidad	AFO	Salvaguarda	#	Causa	Frec. evento iniciante

**Tabla 10-1:**

Modificador condicional		Frec. sin mitigar	Capas independientes de protección (IPL)				Prob. de eventos intermedios	SIL	FRR	SIF		
Descripción	Prob.		Tag	Descripción	FRR	PFD				Tag	Nombre	Descripción

Realizado por: Ojeda, 2017

La descripción de cada uno de los campos según la norma IEC: 61511-3 (2003, pp.50-58)son los siguientes:

- **Número de Nodo:** Identificación obtenida en la división de nodos de los sistemas en estudio.
- **Numero de causa:** Identificación obtenida del HAZOP.
- **Desviación:** Identificación obtenida del HAZOP.
- **Consecuencia:** Identificación obtenida del HAZOP.
- **Categoría, Nivel de severidad y AFO:** Estos parámetros pueden ser seleccionados de matrices riesgo como se verifican en la Tabla 11-1, dependiendo su categoría y nivel de severidad se obtendrá un valor de Frecuencia Tolerable Conocida como (AFO).

**Tabla 11-1:** Niveles de severidad de los eventos de impacto

Información requerida por el LOPA	Información desarrollada en el HAZOP
Impacto de los eventos	Consecuencias
Nivel de seguridad	Severidad de la consecuencia
Causa iniciante	Causa
Probabilidad iniciante	Frecuencia de la causa
Capas de protección	Salvaguardas existentes
Mitigación adicional requerida	Recomienda nuevas salvaguardas

**Realizado por:** Ojeda, 2017.

**Fuente:** (IEC: 61511, 2003c, p.51)

- **Salvaguarda:** Identificación obtenida del HAZOP.
- **Causa:** Identificación obtenida del HAZOP.
- **Probabilidad de eventos iniciantes (yr):** Son valores de probabilidad en eventos por año de las causas iniciantes los cuales se pueden tomar de la Tabla 12-1.

**Tabla 12-1:** Probabilidad de eventos iniciantes

<b>Bajo</b>	Un fallo o una serie de fallos con una probabilidad muy baja de ocurrencia dentro de la vida útil esperada de la planta. Ejemplo: Fallas de tres o mas instrumentos simultaneos, fallas humanas, Falla espontánea de tanques individuales o	$f < 0,0001 \text{ .yr}$
<b>Medio</b>	Un fallo o una serie de fallos con una probabilidad muy baja de ocurrencia dentro de la vida útil esperada de la planta. Ejemplo: Fallo dual del instrumento o de la válvula, combinación de fallas de instrumentos y errores de operadores, Fallas simples de pequeñas líneas de proceso o	$0,0001 < f < 0,01 \text{ .yr}$
<b>Alto</b>	Se puede esperar razonablemente que se produzca un fallo dentro del tiempo de vida esperado de la planta. Ejemplo: Fugas de procesos, Fallas de un solo instrumento o válvula, Errores humanos que podrían resultar en liberaciones de material.	$0,01 < f \text{ .yr}$

**Realizado por:** Ojeda, 2017.

**Fuente:** (IEC: 61511, 2003c, p.51)

En caso de tener registro de fallas de los sistemas o equipos en bases de datos se puede calcular la probabilidad de los eventos iniciantes con la Ecuación 3-1.

$$yr = \frac{(\# \text{ de } \_ \text{ fallas})}{(\# \text{ de } \_ \text{ años}) * (\# \text{ de } \_ \text{ equipos})}$$

**Ecuación 3-1:** Frecuencia de causas iniciantes

- **Modificador condicional ( $Mc$ ):** Es un parámetro que se debe considerar que potencialmente puede afectar la consecuencia considerada, como en caso de probabilidades de ignición, factor de ocupación, factor de vulnerabilidad etc.

El factor de ocupación es una medida probabilística que nos señala la expectativa de que una persona se encuentre en el área donde suceda un evento o accidente (OCP y TECNIEQUIPOS, 2016a, p.37).

Cuando se considera una única fatalidad se calcula mediante la Ecuación 4-1:

$$o = \frac{\text{Horas}_{\text{exposición por año}}}{8760}$$

**Ecuación 4-1:** Factor de ocupación

- **Frecuencia sin mitigar ( $\omega r$ ):** Es valor de frecuencia que se encuentra sin ningún tipo de mitigación alguna y, se encuentra al multiplicar el valor de mi frecuencia de evento iniciante por la probabilidad del modificador condicional, como se expresa en la Ecuación 5-1.

$$\omega r = (yr) * (Mc)$$

**Ecuación 5-1:** Frecuencia sin mitigar

*Donde:*

$yr$ : Probabilidad de eventos iniciantes.

$Mc$ : Modificador condicional.

- **Capas independientes de protección (IPL):** Son capas de protección las cuales tienen un alto grado de disponibilidad, su protección reduce significativamente el riesgo y además cumple con las características de Especificidad, Independencia, confiabilidad y auditabilidad, estas por tener una tasa de fallo presente adquieren un valor de probabilidad de falla en demanda.
- **Probabilidad de eventos intermedios ( $\beta r$ ):** Es el valor de probabilidad que toma en cuenta las capas de protección presentes en el proceso, el mismo que se encuentra al multiplicar la frecuencia de eventos sin mitigar por la probabilidad de falla en demanda de las capas de protección, lo cual se contempla en la Ecuación 6-1.

$$\beta r = (\omega r) * (PFD)$$

**Ecuación 6-1:** Probabilidad de eventos intermedios

*Donde:*

$\omega r$ : Frecuencia sin mitigar.

PFD: Probabilidad de falla en demanda promedio de las capas independientes de protección.

- **Nivel de integridad de seguridad (SIL objetivo):** Es el valor que me indentifica de manera cuantitativa el nivel de riesgo a reducir y se obtiene al encontrar mi factor de reducción de riesgo (FRR) mediante la Ecuación 7-1 o probabilidad de falla en demanda(PFD).

$$FRR = \frac{1}{\frac{(AFO)}{\beta r}}$$

**Ecuación 7-1:** Factor de reducción de riesgo

*Donde:*

AFO= Frecuencia tolerable.

$\beta r$ : Probabilidad de eventos intermedios

Algunas de las ventajas y desventajas que nos proporciona en análisis LOPA son las siguientes (Cataluña, 2014, p.55):

- Si se tiene un estudio HAZOP previamente facilita la estructuración del LOPA.
- No solo se obtiene un valor SIL sino el valor cuantitativo de la reducción de riesgo que facilita el diseño de funciones instrumentadas de seguridad.
- Más difícil de aplicar que otros métodos.
- Para la obtención de sus datos es necesario la utilización de tablas de datos o el uso de bases de datos.

### 1.7.3 *Diseño e Ingeniería del SIS*

Para lograr el objetivo de crear sistemas instrumentados de seguridad es necesario el uso de equipos neumático, hidráulicos, mecánicos, eléctricas y electrónicos, por lo que es necesario tomar en cuenta cada uno de estos elementos para su diseño por lo que la norma IEC: 61508



proporciona un marco mediante el cual nos podemos regir a los sistemas relacionados con la seguridad (IEC: 61508, 1998, p.9).

Para el uso de la norma los sistemas con los que se vayan a trabajar tienen que ser estrictamente conformado por equipo E/E/PE puesto que si son de otra naturaleza estarían naturalmente descartados.

Según la cláusula 7.6.2.5 de la norma IEC: 61508-1 (1998a, p.33) cada función instrumentada debe indicar los parámetros de seguridad que este requiere en términos de modo de operación, probabilidades de falla promedios, la localización de funciones instrumentadas ya se de manera cualitativa o cuantitativa entre otros datos significativos para el diseño.

Existen varios métodos para verificar el nivel sil de funciones instrumentadas de seguridad estos pueden cualitativos o cuantitativos la norma IEC: 61508 ( 2000, pp.4-21) en su parte número cinco expone algunos de estas técnicas:

- Tan bajo como sea razonablemente posible (ALARP).
- Método cuantitativo de probabilidades por formulas.
- Método cualitativo de grafico de riesgos.
- Método cualitativo de matrices de severidad de eventos peligrosos.

El cumplimiento con los Niveles de Integridad de Seguridad (SIL) objetivos es necesario para lograr la reducción de riesgo necesario por lo que no basta solo con adquirir dispositivos con certificación SIL, por lo que la norma IEC realiza una propuesta de cómo se debe realizar el procedimiento para ejecutar la respectiva verificación (Rockwell, 2013, p.123).

Estos son algunos de los datos necesarios para la realización de la validación el Nivel de Integridad de Seguridad (SIL) según la norma IEC: 61508 en su parte número seis, los cuales se identifican en la Tabla 13-1:

**Tabla 13-1:** Términos y rangos de datos para validación SIL

Abreviación	Términos (unidades)	Parámetros
$T_i$	Intervalo de examen de prueba (h)	Un mes (730 h) <sup>1</sup> Tres meses (2 190 h) <sup>1</sup> Seis meses (4380 h)
$MTRR$	Tiempo medio de restauración (horas)	8 h
$DC$	Diagnóstico de cobertura ( expresada como una fracción en la ecuación y como porcentaje)	0%, 60%, 90%, 99%
$\beta$	La fracción de fallas no detectadas tiene una causa común ( Expresada como porcentaje) (Anexos asumen $\beta=2*\beta_D$ )	2%,10%, 20%
$\beta_D$	De los fracasos detectados por la prueba diagnóstica, la fracción que tiene una causa común (Expresada como porcentaje) (Anexos asumen $\beta=2*\beta_D$ )	1%, 5%, 10%
$\lambda$	Tasa de fallo (por hora) de un canal en un subsistema	$0,1 \times 10^{-6}$ $0,5 \times 10^{-6}$ $1 \times 10^{-6}$
$PFD_G$	Promedio de probabilidad de fallo en la demanda para el grupo de canales elegidos (si el subsistema de sensores, lógicos o elementos finales se compone de un solo grupo votado, entonces $PFD_G$ es equivalente a $PFD_S$ , $PFD_L$ o $PFD_{FE}$ respectivamente.	
$PFD_S$	Probabilidad media de falla a demanda del subsistema de sensores	
$PFD_L$	Probabilidad media de falla a demanda del subsistema de lógica	
$PFD_{FE}$	Probabilidad media de falla a demanda del subsistema del elemento final	
$PFD_{SYS}$	Probabilidad media de falla a demanda del subsistema de la función de seguridad para E/E/EP de sistemas relacionados con la seguridad	
$PFH_G$	Probabilidad de fallo por hora para el grupo de canales de votos (si el subsistema de sensores, lógicos o elementos finales se compone de un solo grupo votado, entonces $PFH_G$ es equivalente a $PFH_S$ , $PFH_L$ o $PFH_{FE}$ respectivamente.	

**Tabla 13-1:**

Abreviación	Términos (unidades)	Parámetros
$PFH_s$	Probabilidad de fallo por hora del subsistema de sensores	
$PFH_L$	Probabilidad de fallo por hora del subsistema de lógica	
$PFH_{FE}$	Probabilidad de fallo por hora del subsistema del elemento final	
$PFH_{SYS}$	Probabilidad de fallo por hora para E/E/EP de sistemas relacionados con la seguridad	
$\lambda_D$	Tasa de fallo peligrosas (por hora) de un canal en un subsistema, es igual a $0,5\lambda$ (asume que el 50% de fallas peligrosas y 50% de fallas seguras)	
$\lambda_{DD}$	Tasa de fallo peligrosas detectadas (por hora) de un canal en un subsistema,(esta es la suma de todas las fallas peligrosas detectadas dentro de los canales de un subsistema)	
$\lambda_{DU}$	Tasa de fallo peligrosas no detectadas (por hora) de un canal en un subsistema,(esta es la suma de todas las fallas peligrosas no detectadas dentro de los canales de un subsistema)	
$\lambda_{SD}$	Tasa de fallo seguras detectadas (por hora) de un canal en un subsistema,(esta es la suma de todas las fallas seguras detectadas dentro de los canales de un subsistema)	
$t_{CE}$	Tiempo de inactividad del canal equivalente (horas) para arquitecturas 1oo1,1oo2, 2oo2 y 2oo3 (Este es el tiempo de inactividad combinado para todos los componentes en el canal del subsistema)	
$t_{GE}$	Votado grupo equivalente tiempo de inactividad para 1oo2 y 2oo3 arquitecturas( Este es el tiempo de inactividad combinado para todos los canales en el grupo votado)	
$t_{CE}'$	Tiempo de inactividad del canal equivalente (horas) para arquitecturas 1oo2D (Este es el tiempo de inactividad combinado para todos los componentes en el canal del subsistema)	
$t_{GE}'$	Votado grupo equivalente tiempo de inactividad para 1oo2D arquitecturas( Este es el tiempo de inactividad combinado para todos los canales en el grupo votado)	
$T_2$	Intervalo entre demandas (horas)	

**Realizado por:** Ojeda, 2017.

**Fuente:** (IEC: 61508-6, 2000, p.28)

El procedimiento para calcular la probabilidad de falla en demanda total de un sistema se encuentra reflejado en la siguiente Ecuación 8-1:

$$PFD_{SYS} = PFD_s + PFD_L + PFD_{FE}$$

**Ecuación 8-1:** PFDavg de un subsistema

Donde:

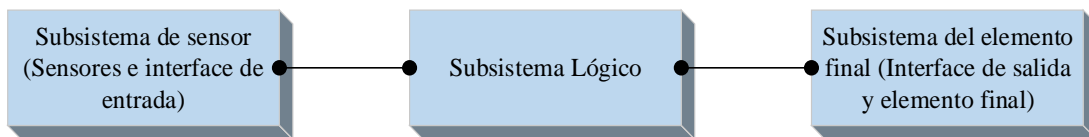
$PFD_{SYS}$ : Probabilidad media de falla a demanda del subsistema de la función de seguridad para E/E/EP de sistemas relacionados con la seguridad.

$PFD_S$ : Probabilidad media de falla a demanda del subsistema de sensores.

$PFD_L$ : Probabilidad media de falla a demanda del subsistema de lógica.

$PFD_{FE}$ : Probabilidad media de falla a demanda del subsistema del elemento final

La estructura de un subsistema está dado por la Figura 12-1.



**Figura 12-1:** Estructura de un subsistema de seguridad

Realizado por: Ojeda, 2017.

En la Tabla 14-1 y Tabla 15-1 se muestran algunas de las fórmulas para diferentes arquitecturas recopiladas de la norma EIC: 61508-6 en su sexta parte (2000, pp-20-41):

**Tabla 14-1:** Formulas de la Probabilidad de falla en demanda promedio

Modo de Operación a demanda	
Estructura	Fórmula
1oo1	$PFD_G = (\lambda_{DU} + \lambda_{DD})t_{CE}$
1oo2	$PFD_G = 2(1-\beta_D)\lambda_{DD} + (1-\beta)\lambda_{DU})^2(t_{CE})(t_{GE}) + \beta_D\lambda_{DD}MIRR + \beta\lambda_{DU}(\frac{T_1}{2} + MIRR)$
2oo2	$PFD_G = 2\lambda_D t_{CE}$
1oo2D	$PFD_G = 2(1-\beta)\lambda_{DU} + ((1-\beta)\lambda_{DU} + (1-\beta_D)\lambda_{DD} + \lambda_{SD})(t_{CE})(t_{GE}) + \beta_D\lambda_{DD}MIRR + \beta\lambda_{DU}(\frac{T_1}{2} + MIRR)$
2oo3	$PFD_G = 6(1-\beta_D)\lambda_{DD} + (1-\beta)\lambda_{DU})^2(t_{CE})(t_{GE}) + \beta_D\lambda_{DD}MIRR + \beta\lambda_{DU}(\frac{T_1}{2} + MIRR)$

Realizado por: Ojeda, 2017.

Fuente: (IEC: 61508-6, 2000, pp.41-50)

**Tabla 15-1:** Formulas de la Probabilidad de fallo por hora

Modo de Operación continua	
Estructura	Fórmula
1oo1	$PFH_G = \lambda_{DU}$
1oo2	$PFH_G = 2((1 - \beta_D)\lambda_{DD} + (1 - \beta)\lambda_{DU})^2(t_{CE}) + \beta_D\lambda_{DD} + \beta\lambda_{DU}$
1oo2D	$PFH_G = 2(1 - \beta)\lambda_{DU} + ((1 - \beta)\lambda_{DU} + (1 - \beta_D)\lambda_{DD} + \lambda_{SD})t_{CE} + \beta_D\lambda_{DD} + \beta\lambda_{DU}$
2oo3D	$PFH_G = 6((1 - \beta_D)\lambda_{DD} + (1 - \beta)\lambda_{DU})^2(t_{CE}) + \beta_D\lambda_{DD} + \beta\lambda_{DU}$

Realizado por: Ojeda, 2017.

Fuente: (IEC: 61508-6, 2000, pp.41-50)

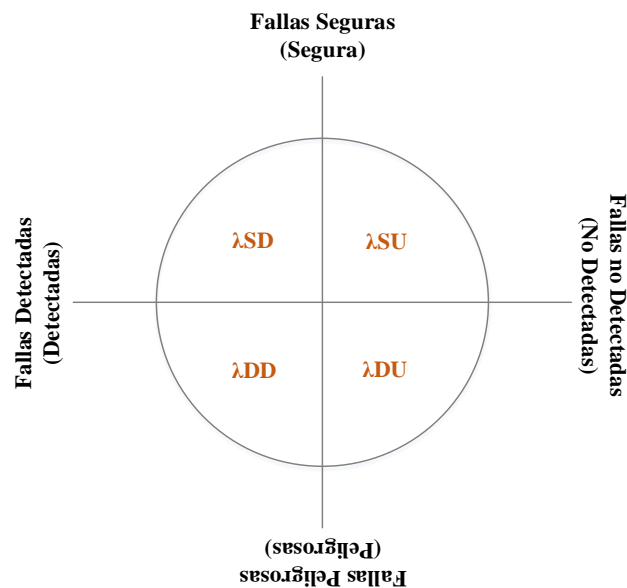
#### 1.7.4 Modos y Tasas de fallos

“La principal preocupacion para un sistema de seguridad no deberia ser como opera el sistema sino como podria fallar, esta es la principal razon porque los SIS difieren de los sistemas activos de control”(Venegas, 2013, p.54).

Los modos de fallas se encuentran detectadas en cuatro categorizaciones principales:

- Fallas seguras
- Fallas peligrosas
- Fallas detectadas
- Fallas no detectadas

Por otro lado las tasas de falla se encuentran distribuidas de la siguiente manera dependiendo su modo de falla como se distingue en la Figura 13-1.



**Figura 13-1:** Tasas y modos de falla

Fuente: (Venegas, 2013,p.55)

Luis M. y Garcia G. ( 2012, pp-8-9) definen de la diferente manera las tasas de fallas:

- **Tasa de fallas seguras detectadas ( $\lambda_{SD}$ ):** Este tipo se consideran fallas esporádicas que no tienen ningún potencial de alto riesgo, a su vez de que son detectadas por el diagnóstico que brindan los sistemas.
- **Tasa de fallas seguras no detectadas ( $\lambda_{SU}$ ):** Estas fallas son las que no logran ser detectadas por los diagnósticos automáticos pero no tienen relevancia en el cálculo de confiabilidad.
- **Tasa de fallas peligrosas detectadas ( $\lambda_{DD}$ ):** Estas fallas son detectadas por el diagnóstico automático de cobertura que protegen al sistema, estas no afectan negativamente al cálculo de  $PFD_{avg}$  ya que los tiempos entre inspecciones automáticas son muy cortos en comparación de las inspecciones manuales.
- **Tasa de fallas peligrosas no detectadas ( $\lambda_{DU}$ ):** Por más detallada que se una inspección siempre va existir una tasa de fallas que sean peligrosas y a su vez no han sido detectadas por el diagnóstico de cobertura de los sistemas como inspecciones manuales, esta tasa de falla en particular afecta directamente al cálculo de  $PFD_{avg}$ .

Para verificar la confianza de la cobertura de diagnóstico es necesario el cálculo de la fracción de fallo seguro (SFF) la cual se define como la razón entre la tasa promedio de fallos seguros mas tasa promedio de fallos peligrosos detectados, sobre el total de las tasas promedio de fallos del sistema, el mismo valor se puede determinar de manera independiente par sensores, dispositivos lógicos y elementos finales (Galindo, 2012, p.131).

$$SFF = \frac{\lambda_S + \lambda_{DD}}{\lambda} = \frac{\lambda_{SD} + \lambda_{SU} + \lambda_{DD}}{\lambda_{SD} + \lambda_{SU} + \lambda_{DD} + \lambda_{DU}}$$

**Ecuación 9-1:** Fracción de Falla Seguro (SFF)

## 1.8 Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (PMBOK)

El Instituto de Manejo de Proyecto (PMI) en el año de 1987 publica la primea edición de la Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (PMBOK), la cual “Proporciona pautas para la dirección de proyectos individuales y define conceptos relacionados con la dirección de proyectos”, por el contrario no debe mal interpretarse como una metodología cerrada (PMI, 2013, p.1).

Lo que se busca con la aplicación del PMBOK es identificar, concentrar y publicar las mejores prácticas que generalmente aceptadas en la dirección de proyectos, esto se refiere a que las diferentes técnicas utilizadas son aplicables a la mayoría de los proyectos por lo que se tiene una alta posibilidad de éxito (Pizarro, 2012, pp-1-2).

La guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos trabaja con dos concepciones bien definidas como son los grupos de procesos y las áreas de conocimiento, en donde los grupos de procesos se considera que “Se logra mediante la aplicación e integración adecuadas de los 47 procesos de la dirección de proyectos, agrupados de manera lógica, categorizados en cinco Grupos de Procesos” los cuales son (PMI, 2013, p.5):

- **Inicio:** Aquellos procesos realizados para definir un nuevo proyecto o nueva fase de un proyecto existente al obtener la autorización para iniciar el proyecto o fase.
- **Planificación:** Aquellos procesos requeridos para establecer el alcance del proyecto, refinar los objetivos y definir el curso de acción requerido para alcanzar los objetivos propuestos del proyecto.
- **Ejecución:** Aquellos procesos realizados para completar el trabajo definido en el plan para la dirección del proyecto a fin de satisfacer las especificaciones del mismo

- **Monitoreo y Control:** Aquellos procesos requeridos para rastrear, revisar y regular el progreso y el desempeño del proyecto, para identificar áreas en las que el plan requiera cambios y para iniciar los cambios correspondientes.
- **Cierre:** Aquellos procesos realizados para finalizar todas las actividades a través de todos los Grupos de Procesos, a fin de cerrar formalmente el proyecto o una fase del mismo.

Los grupos de procesos se agrupan a su vez en áreas del conocimiento que el PMBOK identifica como un conjunto completo de conceptos, términos y actividades que conforman un ámbito profesional, un ámbito de la dirección de proyectos o un área de especialización y los clasifica así (Pizarro, 2012, p.8):

- **Gestión de la integración del proyecto:** Se desarrolla acta de constitución del proyecto, el plan de dirección, gestiona la dirección del proyecto, de igual manera se monitorea el trabajo del proyecto para poder cerrar la fase o el proyecto.
- **Gestión del alcance del proyecto:** Se planifica, controla y se valida el alcance que va a tener el proyecto recopilando los requisitos.
- **Gestión del tiempo del proyecto:** Se planifica el cronograma definiendo las actividades, secuenciándolas y definiendo su tiempo de duración con un control del mismo.
- **Gestión de los costes del proyecto:** Se planifica y estima los costos para determinar un presupuesto, esto con un control.
- **Gestión de la calidad del proyecto:** Se planifica la gestión de la calidad para asegurar la misma controlándola.
- **Gestión de los recursos humanos del proyecto:** Se planifica los recursos humanos, para adquirir el equipo del proyecto, y poder dirigir al mismo.
- **Gestión de las comunicaciones del proyecto:** Se planifica gestiona y controla las comunicaciones
- **Gestión de los riesgos del proyecto:** Se planifica, identifica, se calcula cualitativamente y cuantitativamente el riesgo para poder controlarlo.
- **Gestión de las adquisiciones del proyecto:** Se planifica, efectúa, controla y cierra las adquisiciones.
- **De los interesados del proyecto:** Se identifica, planifica, gestiona y controla la participación de los interesados.



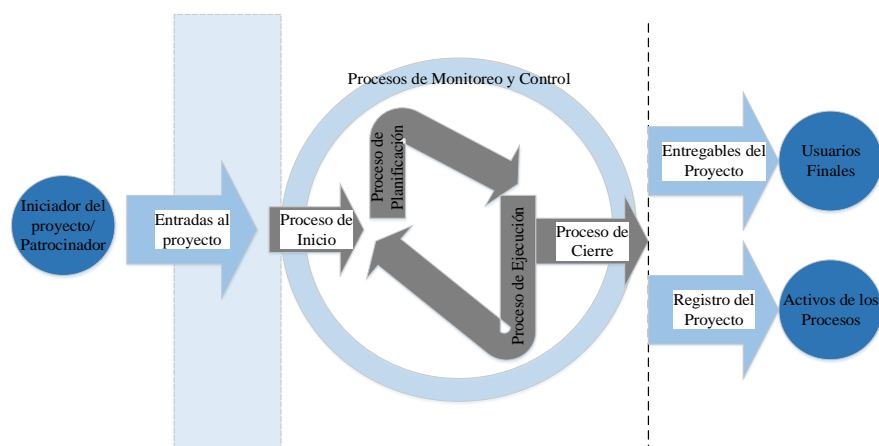
Las acciones que se identifican como esenciales para llevar a cabo con éxito el desarrollo del PMBOK son (Alvarez y Pérez, 2011, p.13):

- Identificar un problema
- Encontrar la solución
- Identificar las tareas y recursos necesarios
- Preparar un cronograma
- Estimar el coste del proyecto
- Estimar los riesgos
- Mantener el control y la comunicación con los interesados
- Gestionar un cierre satisfactorio
- Se dispersan los miembros del equipo con el proyecto concluido.

### 1.8.1 Grupo de Procesos de la Etapa de Inicio

La norma establecida por el PMBOK (2013, p.54) expone que aquí se define el alcance inicial y se ligan los recursos financieros iniciales, se identifican los interesados internos y externos que afectan el proyecto, asimismo se designa el director del proyecto .

El objetivo principal de esta etapa como se observa en la Figura 14-1 “es alinear las expectativas de los interesados con el propósito del proyecto, darles visibilidad sobre el alcance y los objetivos, y mostrar cómo su participación en el proyecto y sus fases asociadas puede asegurar el logro de sus expectativas” por lo que se puede obtener una visión más óptima del proyecto (PMI, 2013, p.54).



**Figura 14-1:** Límites del proyecto

**Fuente:** (PMI, 2013, p.54)

## 1.9 Esquemas del Proceso Productivo de la Estación Páramo de OCP

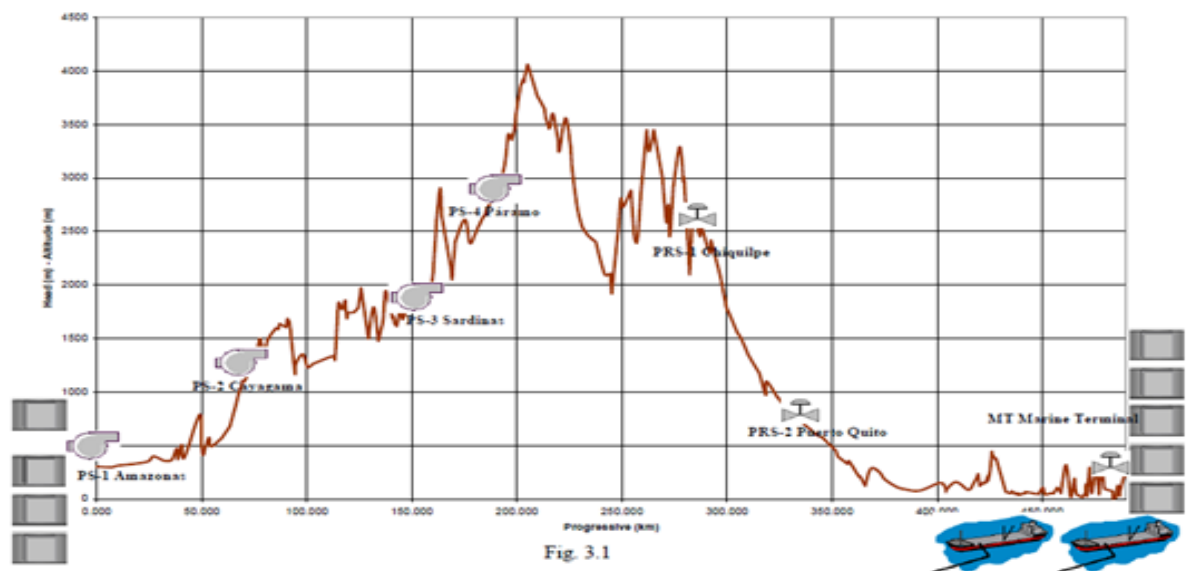
OCP Ecuador S.A el 15 de febrero del 2001 fue autorizada por el estado Ecuatoriano para construir el Oleoducto de Crudos Pesados (OCP), el 26 de junio del mismo año se iniciaron las operaciones de construcción, en el año 2003 el 5 de septiembre el buque “Cabo Vírgenes” recibió 400.000 barriles de crudo del OCP el cual fue el primer embarque de prueba, una vez obtenido todos los permisos de operación el 14 de noviembre el oleoducto inició sus operaciones (OCP, 2013)

La siguiente información y datos fueron tomados del “Manual de Operación del Sistema del Oleoducto” (OCP, 2014).

### 1.9.1 Generalidades del Oleoducto de Crudos Pesados

#### 1.9.1.1 Esquema General del Proceso y Descripción de la Ruta de Transporte

En la Figura 15-1 se establece el perfil del oleoducto de OCP que está destinado al transporte de crudo pesado que es receptado en la estación Amazonas y Sardinas ubicadas en los campos orientales del Ecuador, a través de la cordillera de los Andes hasta el Terminal Marítimo de OCP cerca de Esmeraldas con un recorrido de 455 Km.



**Figura 15-1:** Perfil del oleoducto

Fuente:(OCP, 2014, p.10)

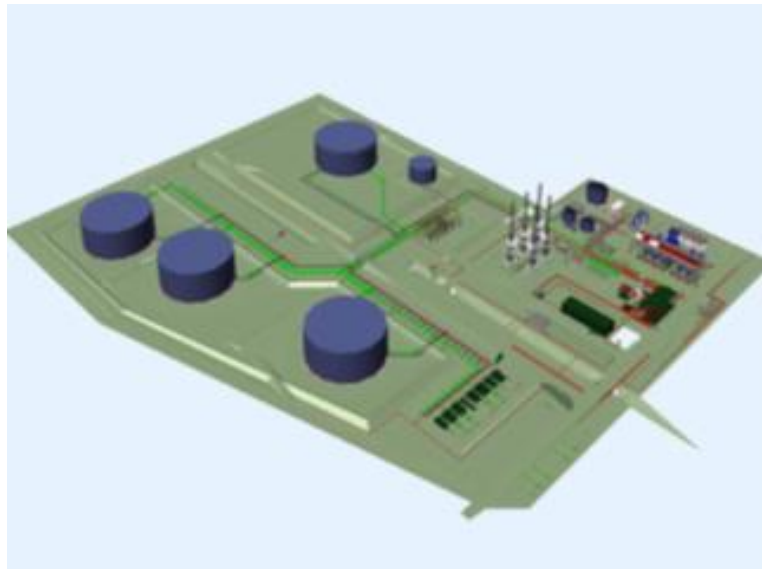
El proceso de transporte de crudo pesado inicia en el área oriental desde la estación de bombeo “Amazonas” (PS-1 a 303m.s.n.m) en Lago Agrio donde se desarrolla la presión hasta que llegue a puntos importantes hidrológicos como el Aguarico lugar que abarca la segunda estación de aumento de presión “Cayagama” (PS-2 a 1028 m.s.n.m) que impulsa el carburante a la estación de bombeo “Sardinas” (PS-3 a 1800 m.s.n.m), el oleoducto se acerca a la zona denominada sierra andina en donde está la última etapa de bombeo generada por la estación “Páramo” (PS-4 a 2863 m.s.n.m) para que el crudo pesado pueda atravesar su punto más alto en la Sierra de la Virgen a 4062 m.s.n.m.

El hidrocarburo inicia su etapa de descenso hasta llegar a 2962 m.s.n.m en donde encontramos la estación reductora de presión “Chiquilpe” (PRS-1) para controlar el flujo de fluido en transporte para que llegue con presiones adecuadas a la segunda estación reductora indicada como Puerto Quito (PRS-2 a 802 m.s.n.m).

La última etapa comprende el “Terminal Marítimo” de Esmeraldas ubicada a 204 m.s.n.m donde se realizan las operaciones de descarga a buque.

Las estaciones pertenecientes al oleoducto de crudos pesados son las siguientes

- Terminal y Estación de bombeo Amazonas (PS-1)



**Figura 16-1:** Estación de bombeo Amazonas

Fuente:(OCP, 2014, p.12)

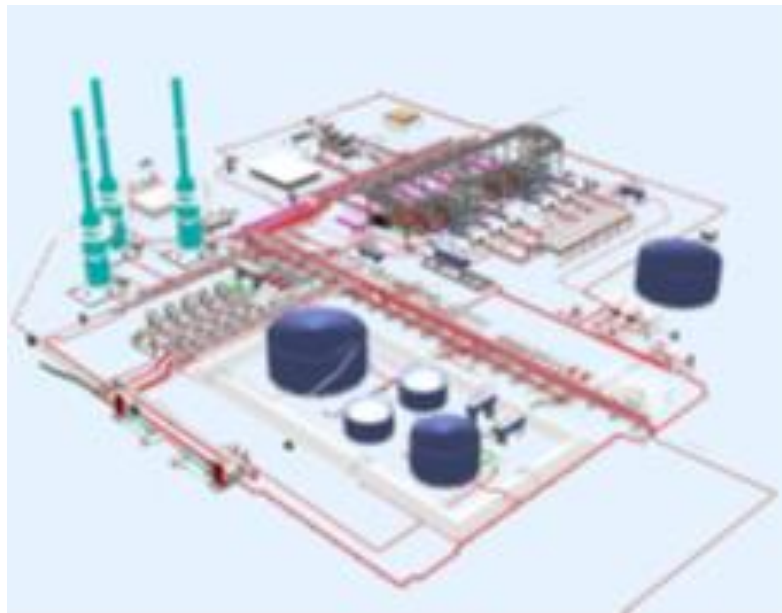
- Estación de bombeo Cayagama (PS-2)



**Figura 17-1:** Estación de bombeo Cayagama

Fuente:(OCP, 2014, p.13)

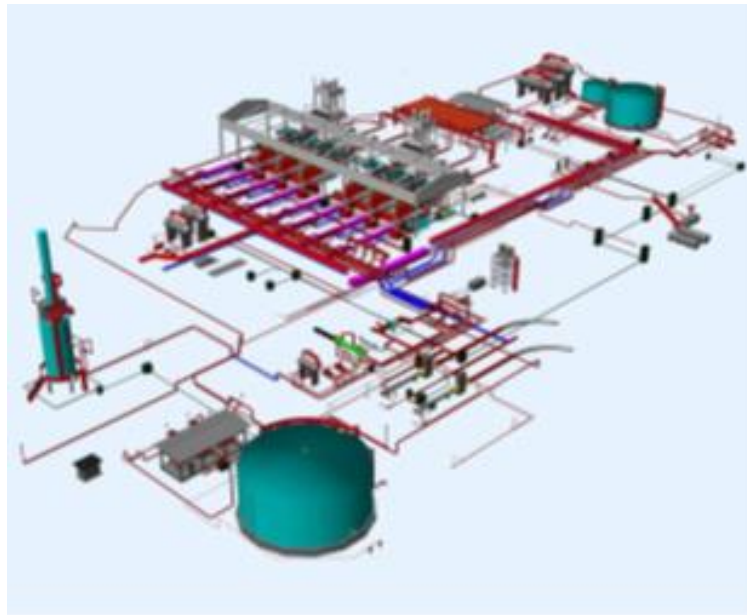
- Estación de Bombeo Sardinas (PS-3)



**Figura 18-1:** Estación de Bombeo Sardinas

Fuente:(OCP, 2014, p.14)

- Estación de bombeo Páramo (PS-4)



**Figura 19-1:** Estación de bombeo Páramo

Fuente:(OCP, 2014, p.15)

- Estación reductora de presión Chiquilpe (PRS-1)



**Figura 20-1:** Estación reductora de presión Chiquilpe

Fuente:(OCP, 2014, p.16)

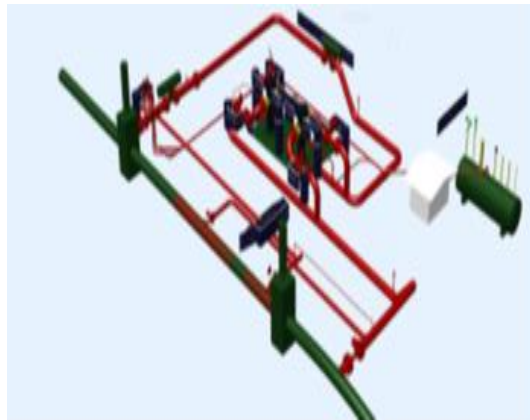
- Estación reductora de presión Puerto Quito (PRS-2):



**Figura 21-1:** Estación reductora de presión Puerto Quito

Fuente:(OCP, 2014, p.17)

- Estación de Bloqueo Automático (ABS)



**Figura 22-1:** Estación de Bloqueo Automático (ABS)

Fuente:(OCP, 2014, p.18)

- Terminal Marino (MT)



**Figura 23-1:** Terminal Marino

Fuente:(OCP, 2014, p.18)

### 1.9.1.2 Aspectos Relevantes del Oleoducto

#### Sistema de Control

Cada estación que forma parte de OCP se encuentra instalado un Sistema de Control Local, y de un sistema de Control de supervisión y Adquisición de Datos (SCADA) instalados en dos centrales en la ciudad de Quito.

En la Figura 24-1 se controla la operación normal que se da desde el Centro de Control Principal del Oleoducto (MPCC) que tendrá la máxima jerarquía y en discreción en condiciones anormales actúa el Centro de Control de Emergencia (ECC), adicionalmente todos los equipos auxiliares instalados remotamente tienen su supervisión local y remota por el MPCC.

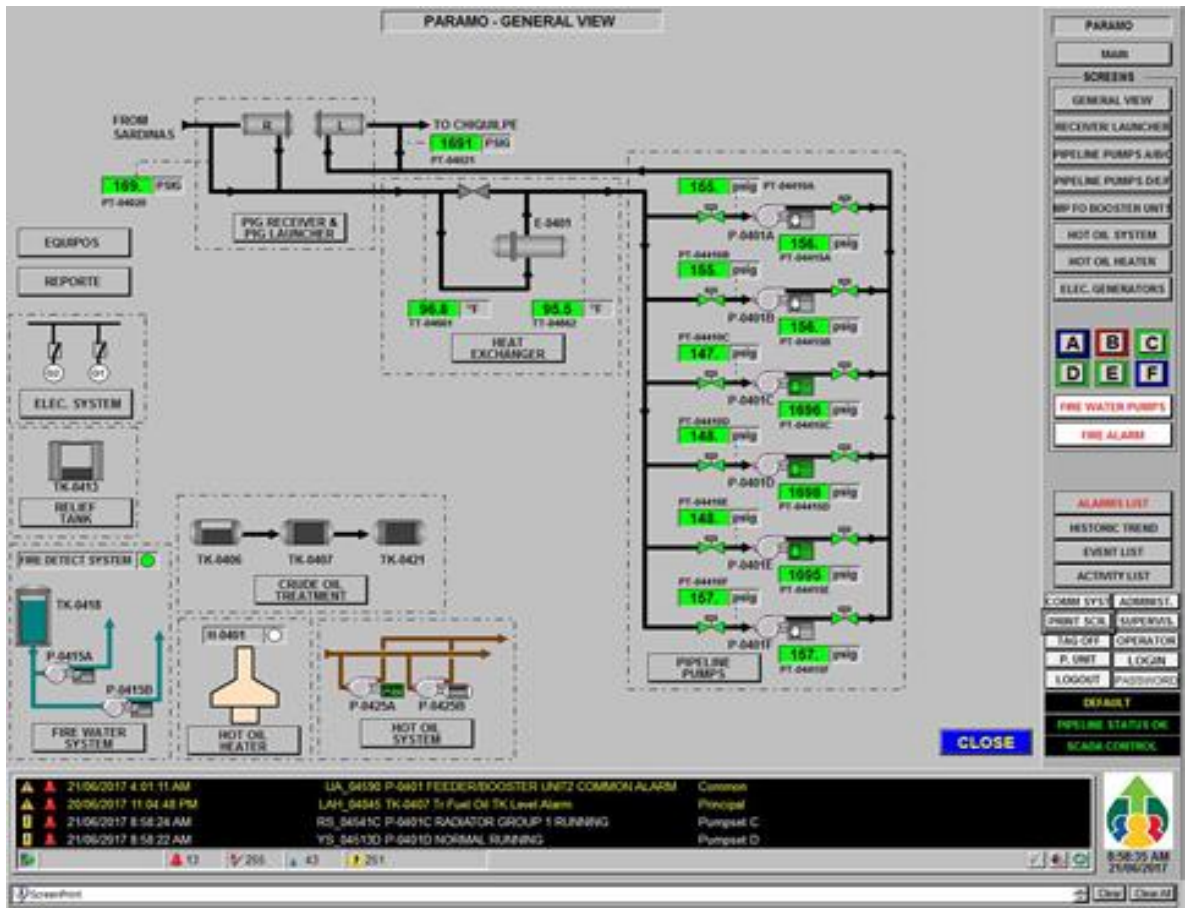


**Figura 24-1:** Centro de control principal del oleoducto

Fuente:(OCP, 2013)

Los equipos principales que intervienen directamente el transporte del hidrocarburo constan de una Interfaz Hombre-Máquina Local (LHMI) ubicado en campo e interconectado al sistema SCADA en el MCC para su control, con funciones como abrir/cerrar, encender/apagar, sacar equipos de servicio y modificar los valores de ajuste de control.

Para el sistema LHMI que se observa en la Figura 25-1 se utilizan controles lógicos programables (PLCs) de manera redundante ubicados en cada sitio remoto para su supervisión local y control local, ante la necesidad de transferir la información de manera segura el año del 2013 se configuró una Red Privada Virtual (VPN) desde el sistema SCADA/MPCC/ECC a la red corporativa de OCP.

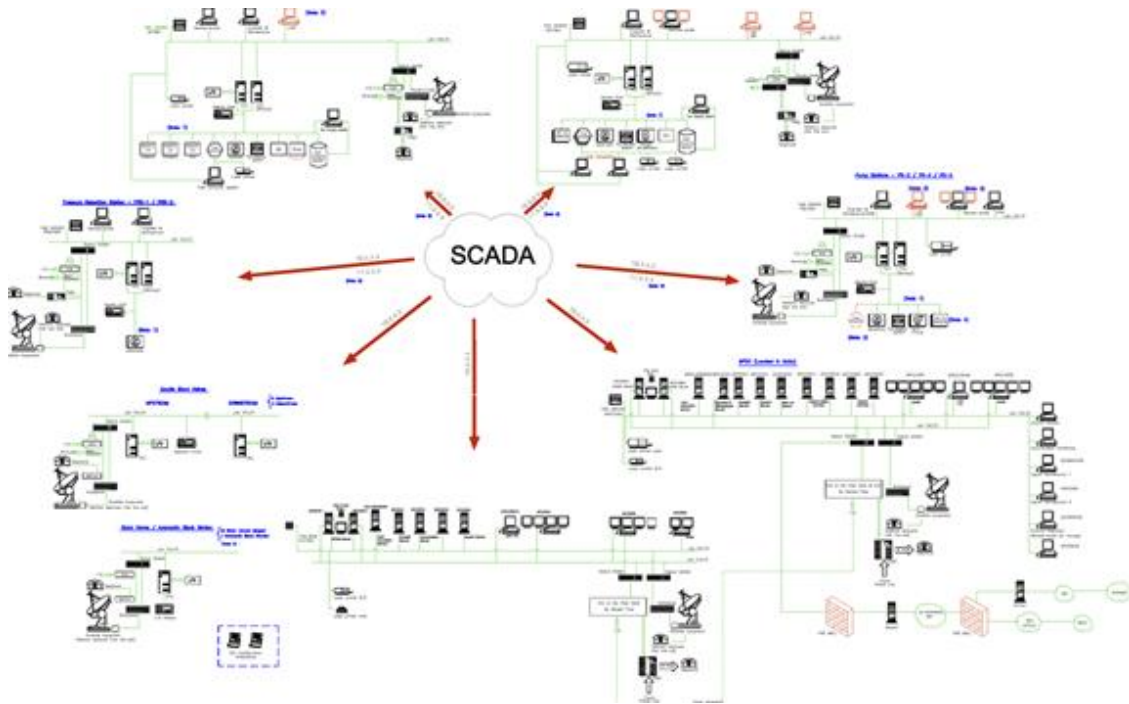


**Figura25-1:** LHM de Páramo

Fuente: (OCP, 2013)

Todas las instalaciones remotas se conectarán al MPCC y el ECC mediante fibra óptica y sistema satelital siendo el primero método de comunicación el principal, adicionalmente todos los sitios tendrán comunicación telefónica entre sí para poder coordinar el transporte del crudo pesado entre las estaciones y la sala de control y que el corte en las comunicaciones no sea considerado una perturbación crítica, su estructura de red se observa en la Figura 26-1.





**Figura 26-1: SCADA de OCP**

Fuente:(OCP, 2014, p.38)

### **Variables Controladas**

Las diferentes estaciones que conforman el oleoducto son controlados mediante tecnología blanda “software” independiente del SCADA, en la estación de bombeo “Amazonas” se especifica el caudal del producto que se va a transportar.

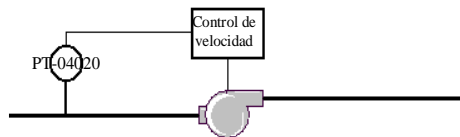
La función de cada estación de bombeo es la de controlar la velocidad de las bombas, mientras que de las estaciones reductoras es la de reducir la presión por medio de sus válvulas de control, todo esto con el objetivo de enviar aguas abajo del oleoducto el mismo caudal recibido aguas arriba del pipeline.

Para aumentar la presión de entrada se reduce temporalmente el caudal de la estación y eventualmente puede llegar a cero, en cambio que para disminuir la presión se aumenta temporalmente el caudal de la estación eventualmente este puede llegar a su límite máximo, si la presión de descarga alcanza un valor máximo de seteo y el control por presión de succión predeterminado es sustituido por el control de descarga la cual no es una operación normal y requiere acción del operador.

## Presión de Entrada a las Estaciones de Bombeo

Las velocidades de las bombas principales en las estaciones PS-1, PS-2, PS-3 y PS-4 se usa para controlar la presión de ajuste que a su vez depende del caudal que se va a transportar, un elemento fundamental que influye al trasladar el hidrocarburo es la viscosidad que afecta en la caída de presión entre la estación transmisora y la brida de succión de la bombas de la estación receptora.

Un aumento de la presión de ajuste permite que exista mayor presión de succión en la bomba, imponiendo una mayor presión de descarga en estaciones aguas arriba, en la Figura 27-1 se observa cómo se da el control de velocidad de las bombas principales por succión.

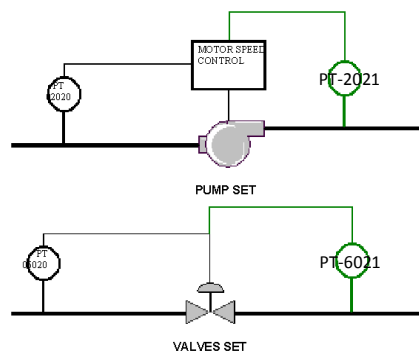


**Figura 27-1:** Control por presión de succión

Fuente:(OCP, 2014, p.48)

## Presión de Salida a las Estaciones

Las estaciones que conforma el oleoducto de crudos pesados con igual importancia adoptan un control de salida de máxima presión la cual se caracteriza por reemplazar en caso de que el control de presión de succión sobrepase sus límites con el objetivo principal de proteger contra sobrepresiones aguas abajo, en la Figura 28-1 se observa cómo se da el control de velocidad de las bombas principales por descarga y de las válvulas reductoras.



**Figura 28-1:** Control por presión de descarga

Fuente:(OCP, 2014, p.52)

## **Acciones de Emergencia y Puesta en Marcha**

El manual de operaciones del sistema del oleoducto describe ciertas acciones a tomarse en caso de puesta en marchas y acciones de emergencia que se den en operación de la tubería que se deben cumplir estrictamente por el operador.

### **Después de un Cierre Breve**

El principal problema que genera un cierre breve en la pérdida de temperatura lo que deriva en la variación de viscosidad del crudo los cuales especialmente en las estaciones PS-2 y PS-4 si exceden los 850 cP, los sellos mecánicos de las bombas principales pueden ser dañados por lo que se requiere calentamiento durante la puesta en marcha, otro factor muy importante es la presión a la entrada de las estaciones las cuales deben ser lo suficientemente altas para evitar cavitación.

Al estar parado el transporte del producto se genera flujo inverso que aumenta la presión a altos valores, lo cual es evitado con el cierre de las ESDVs de salida de la estación.

### **Después de un Cierre Prolongado**

Se describe como cierre prolongado cuando la temperatura haya caído lo suficiente para que la viscosidad supere los 850 cP, para lo que la puesta en marcha requiere que los hornos en las estaciones de bombeo PS-2 y PS-4 sean accionado para que el intercambiador de calor eleve la temperatura del crudo pesado disminuyendo la viscosidad para evitar daño en los sellos mecánicos.

Un cierre prolongado depende del tipo de crudo y del caudal al momento de que se da el mismo.

### **Parada Normal**

Al darse una parada normal la señal de control se da por SCADA cuando el operador envía la señal o automáticamente si el SCADA detecta el cierre de alguna estación o de alguna válvula de bloqueo.

Las acciones que se inician son las siguientes:

- En las estaciones bombeo los hornos salen fuera de servicio, los intercambiador cierran el flujo de aceite y se cierran las ESDVs de salida.
- Se abre el lazo de recirculación de las bombas principales y desciende la velocidad de las bombas a 450 rpm en “Amazonas” y “Cayagama” y a 500 rpm en la estación “Sardinas” y “Páramo”, el control de velocidad es cambiado a manual.
- En las estaciones reductoras se cierran las ESDVs de entrada y las PCVs.
- En las estaciones de “Bloqueo Automático” cierre de las ESDVs solo si el procedimiento de parada se inició por el cierre del “Terminal Marítimo” o de una válvula de bloqueo intermedia aguas abajo de la estación de “Bloqueo Automático”.
- En el “Terminal Marítimo” la intervención de presión se lo deja al controlador de entrada, las PCVs se cierran por lo que la última etapa del oleoducto queda gradualmente en vacío.
- Durante esta parada los buques pueden continuar cargándose.

### **Parada de Emergencia**

Los casos en lo que se puede ocasionar una parada de emergencia es cuando se pierde totalmente el control como ataques terroristas, incendio en la sala de control, desastres naturales, etc., por lo que para activar una parada de este tipo es necesario la activación de botones predeterminados. (La secuencia a seguir es la misma que la de una Parada Normal)

### **Fugas**

El oleoducto consta de un Sistema de Detección de Fugas (LDS) que revela al operador sobre algún tipo de escape del producto para obligar a este a tomar medidas para reducir daños al personal medio ambiente y equipos, a su vez cada equipo consta de instrumentación para percibir bajas presiones lo que alertara al personal.

## 1.9.2 *Estación de Bombeo Páramo de OCP*

### 1.9.2.1 *Generalidades*

La estación “Páramo” tiene como objetivo dar el último impulso al crudo pesado para poder superar su punto más alto: 4.064 metros en el sector de “La Virgen”. Esta es la última infraestructura de bombeo del sistema OCP.

Estos son algunos datos relevantes de PS-4:

- **Ubicación:** Papallacta/Napo. KM 186.
- **Altura:** 2862 msnm.
- **Capacidad de transporte:** 450.000 barriles por día

Los equipos que conforma la estación son:

- Un horno
- Seis grupos motor bomba
- Un intercambiador de calor
- Sistema contra incendio de agua y espuma
- Sistema de abierto y cerrado para controlar los fluidos que salen de la estación

### 1.9.2.2 *Funcionamiento de la Estación de Bombeo Páramo*

Las etapas principales de una estación de bombeo como “Páramo” se ha establecido en tres fases (OCP, 2013) :

- En su primera etapa el crudo es recibido en la estación de bombeo, pasa inicialmente por un proceso de filtrado a través del cual los sólidos que vienen en el fluido son separados del mismo con la finalidad que no afecten los diferentes equipos con los que entrará en contacto durante su recorrido.
- Posteriormente, de ser necesario, el crudo es calentado a través de los intercambiadores de calor (hornos), con objetivo de reducir su viscosidad.
- Finalmente en su último estado, el crudo ingresa a las bombas centrífugas que le dan la energía necesaria para que el fluido sea desplazado hasta la siguiente estación de bombeo. Estas bombas centrífugas funcionan a través de motores de combustión interna que usan como combustible: petróleo.

### 1.9.2.3 Condiciones Operativas

Los siguientes datos de los diferentes parámetros son condiciones a los cuales la estación de bombeo Páramo se encuentra para operar.

En caudal estas son algunas características:

- El caudal máximo de diseño es de 517,300 BPD (18 °API a 24 °API).
- El caudal sostenible es de 450,000 BPD (18 °API a 24 °API).

Las propiedades de crudo transportadas por OCP deben tener las siguientes características que se identifican en la Tabla 16-1:

**Tabla 16-1:** Propiedades del crudo pesado

Propiedades del Crudo	
Densidad relativa	a 60 °F entre 18°API y 24°API
Maxima viscosidad	a 100 °F en 475 cSt y a 15°F a 111 cSt
Presión de vapor Reid	≤ 6 PSI
Maximo de impurezas	0,50%
Comportamiento	Newtoniano

**Realizado por:** Ojeda, 2017

**Fuente:** (OCP, 2014, pp.2-85)

Las condiciones operativas en la variable temperaturas deben estar entre el rango de los valores pertenecientes a la Tabla 17-1:

**Tabla 17-1:** Condiciones de Temperatura

Temperatura	
Máxima admisible para el recubrimiento del caño	176 °F
Máxima a la salida de la estación	167 °F
Mínima en la salida a bajo caudal	68 °F

**Realizado por:** Ojeda, 2017

**Fuente:** (OCP, 2014, pp.2-85)

La variable de control de PS-4 es la presión por lo que sus valores deben encontrarse entre estos rangos determinados en la Tabla 18-1:

**Tabla 18-1:** Condiciones de Presión

Estación	Presión de salida a caudal máximo de diseño	Máxima presión estática admisible	Presión atmosférica	Mínima presión de succión	Máximo ajuste de control de presión	Ajuste de máxima presión de cierre
PS-4	1740 PSI	1790 PSI	10.2 PSIA	50.9 PSI	1760 PSI	1805

Realizado por: Ojeda, 2017

Fuente: (OCP, 2014, pp.2-85)

Al tratarse de un sistema dinámico las variables como temperatura, caudal, presión y °API pueden generar diferentes escenarios de operación para lo cual es necesario tener en cuenta las siguientes condiciones de operación que se detallan en la tabla 19-1:

**Tabla 19-1:** Escenarios de Operación

API		18	19	20	21	21	23	24	18
Caudal		450000	450000	450000	450000	450000	450000	450000	90000
PS-4 Entrada Páramo	Presión (PSI)	100	100	100	100	100	100	100	100
	Temperatura (°F)	151	151	126	126	106	101	85	137
PS-4 Salida Páramo	Presión (PSI)	1785	1754	1768	1754	1792	1726	1743	1663
	Temperatura (°F)	155	154	130	130	110	107	91	143

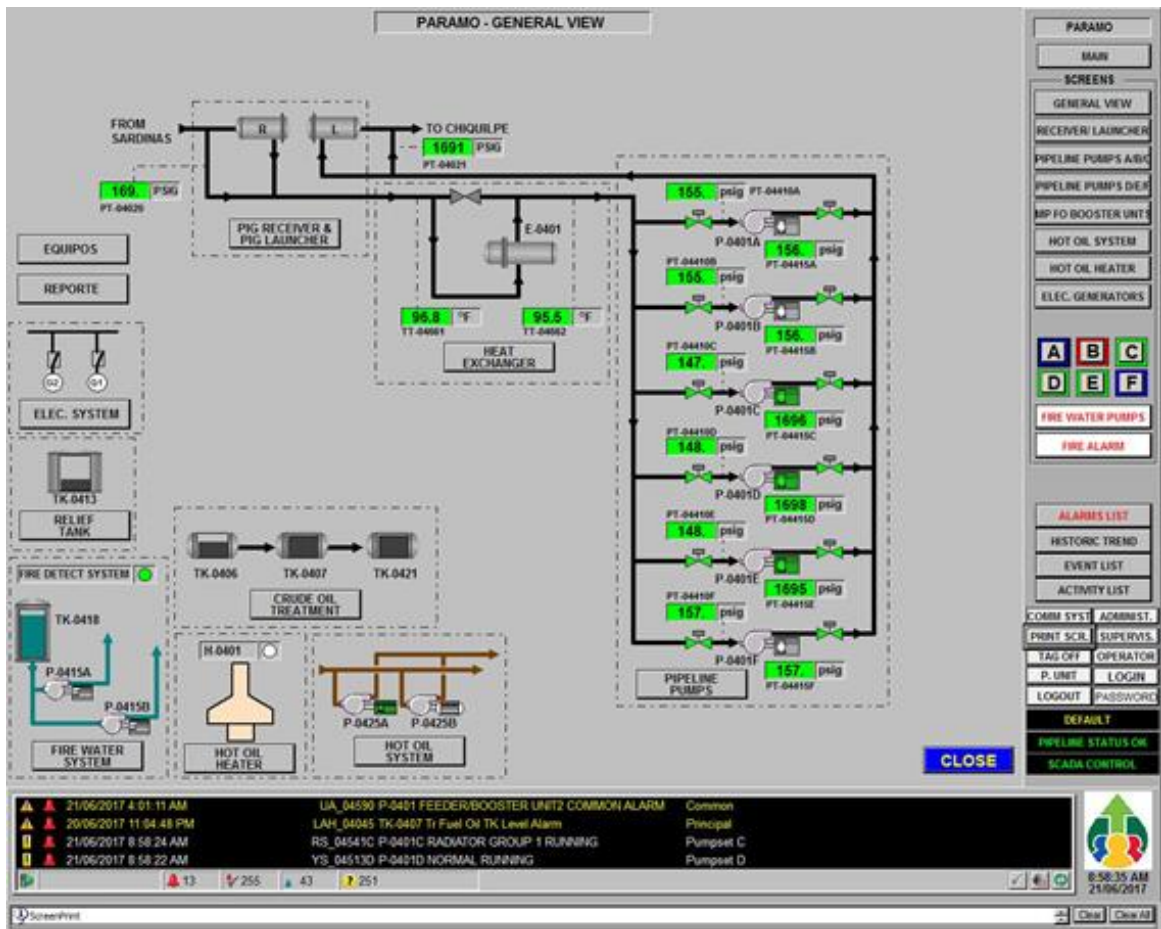
Realizado por: Ojeda, 2017.

Fuente: (OCP, 2014, p.53)

### 1.9.3 Detalle de los Procesos de la Estación de Bombeo Páramo

La estación PS-4 consta de varios sistemas principales y auxiliares para su correcto funcionamiento, los cuales deben ser operados y mantenidos en óptimas condiciones para mantener un alto rendimiento de la planta.

En la Figura 29-1 se observan los sistemas principales y auxiliares que se operan y monitorean desde el LHMI del cuarto de control de la estación PS-4.



**Figura 29-1:** LHMI general de la estación de bombeo Páramo

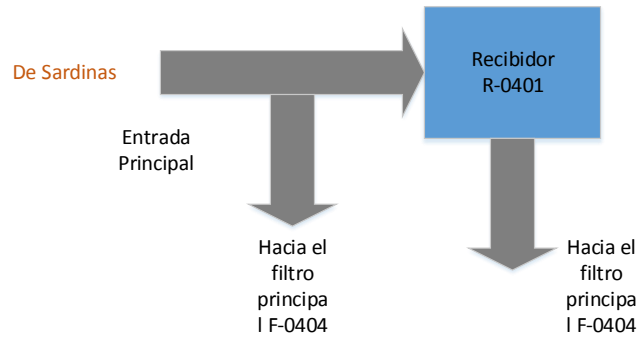
Fuente: Ojeda, 2017

### 1.9.3.1 Recibidor y Lanzador de chanchos

Es la entrada y salida principal del crudo pesado en la estación PS-4, en su etapa inicial se encarga de recibir el chanco enviado desde la estación de bombeo “Sardinas” (PS-3) en la trampa receptora de chanco R-0401 lo cual en operación normal no se encuentra habilitada, por otro lado también es la salida del hidrocarburo a una alta presión hacia la siguiente estación reductora de presión “Chiquilpe” (PRS-1) por lo que se ha instalado el lanzador R-0401 el cual solo se habilita el momento de enviar un raspador.



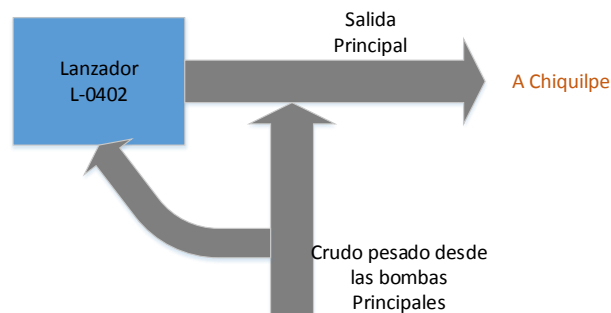
En la Figura 30-1 se observa el diagrama de bloques de etapa de entrada del crudo a la estación y del receptor de raspadores.



**Figura 30-1:** Diagrama de bloques Receptor

Realizado por: Ojeda, 2017.

En la Figura 31-1 se observa el diagrama de bloques de la salida del hidrocarburo de PS-4 hacia Cayagama y el lanzador de raspadores.

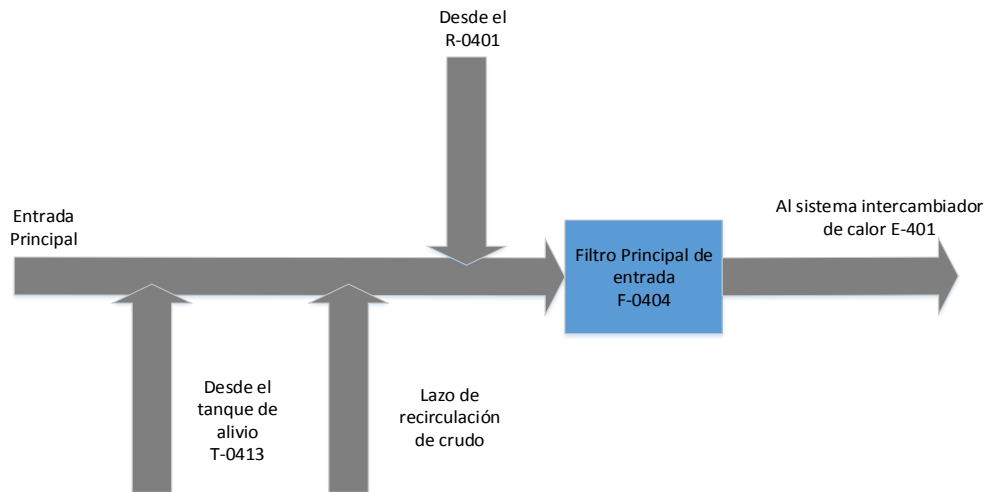


**Figura 31-1:** Diagrama de bloques Lanzador

Realizado por: Ojeda, 2017.

### 1.9.3.2 Filtro Principal de Entrada

La función principal del filtro principal de entrada F-0404 es la de proteger a los sistemas contra partículas sólidas mayores a 3.2 mm, el mismo que es monitoreado mediante un transmisor de presión diferencial para verificar que está funcionando correctamente, mediante la Figura 32-2 se observa el diagrama del sistema.



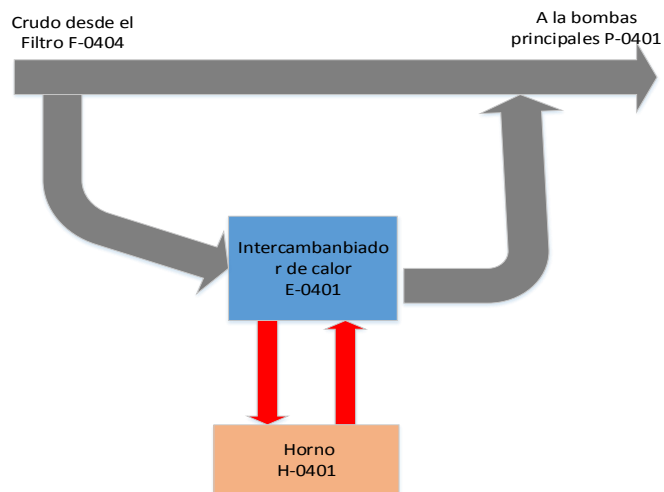
**Figura 32-1:** Diagrama de bloques Filtro principal

Realizado por: Ojeda, 2017.

### 1.9.3.3 Sistema de Aceite Caliente (Hot Oil System)

Este sistema recibe el crudo desde la entrada principal que ha sido filtrado con el objetivo trascendental de aumentar la temperatura del crudo para reducir la viscosidad en caso de que sea necesario, específicamente se realiza este proceso con el uso del intercambiador de calor E-401 que usa aceite caliente para el intercambio de calor.

Durante una operación normal el crudo pasa directamente hacia la línea de las bombas principales aislando el E-401, solo en caso de necesitar aumentar la temperatura el producto se desvía por el intercambiador, este comportamiento se observa en la Figura 33-1.



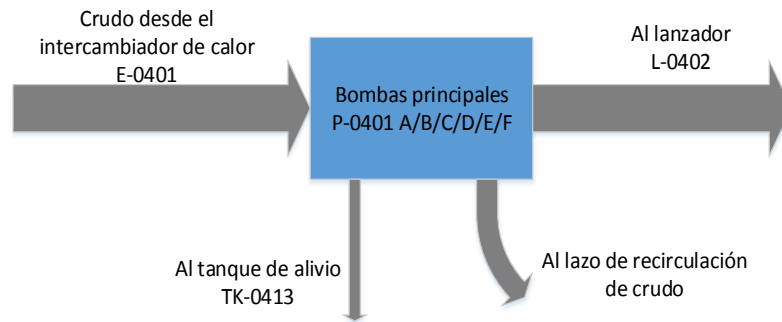
**Figura 33-1:** Diagrama de bloques Sistema de Aceite Caliente

Realizado por: Ojeda, 2017.

#### 1.9.3.4 Bombas Principales

Esta etapa está conformada por seis bombas centrífugas P-0401 A/B/C/D/E/F, de 4526 BPH con una presión de 1686 PSI para un crudo de 18 °API, accionados por motores de crudo/diésel con un potencia de 4629 HP cada uno, su objetivo es la aumentar la presión en el hidrocarburo para su transporte.

Cinco maquinas trabajan para una operación normal mientras que una permanece de respaldo, la velocidad de las bombas es controlada como función de un transmisor de presión en la succión y del transmisor de presión en la descarga, en caso de falla de los mismos se selecciona los transmisores de presión ubicados en la entrada y salida de PS-4.El esquema de funcionamiento de esta etapa se aprecia en la Figura 34-1.



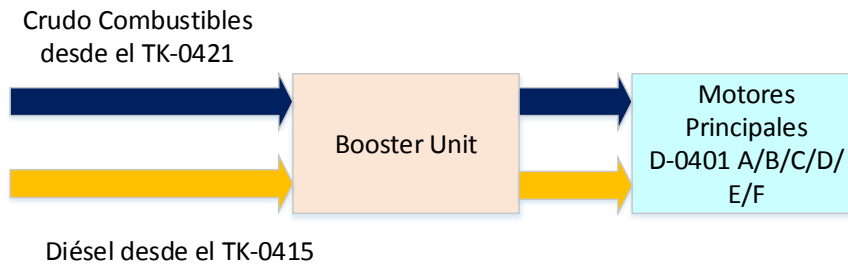
**Figura 34-1:** Diagrama de bloques Bombas Principales

Realizado por: Ojeda, 2017.

#### 1.9.3.5 Unidades de aumento de presión de combustible (Booster Units)

Esta unidad de encarga de elevar la presión del combustible que usan los motores Wartsila D-0401 A/B/C/D/E/F que pertenecen a las bombas principales P-0401 A/B/C/D/E/F desde el tanque TK-0421 que contiene el crudo de línea ya tratado para ser utilizado y del tanque TK-0415 que es diésel de uso diario.

En la Figura 35-1 se observa la representación del funcionamiento de esta unidad.

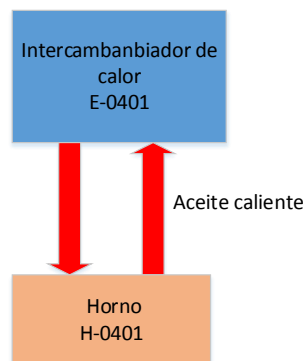


**Figura 35-1:** Diagrama de bloques Booster Units

Realizado por: Ojeda, 2017.

#### 1.9.3.6 Calentador de Aceite Térmico (Hot Oil Heater)

Este sistema está formado por un horno H-0401 que trabaja a gas/diésel y se encarga de calentar el aceite térmico que es enviado al sistema de Hot Oil, lo cual se observa en la Figura 36-1.



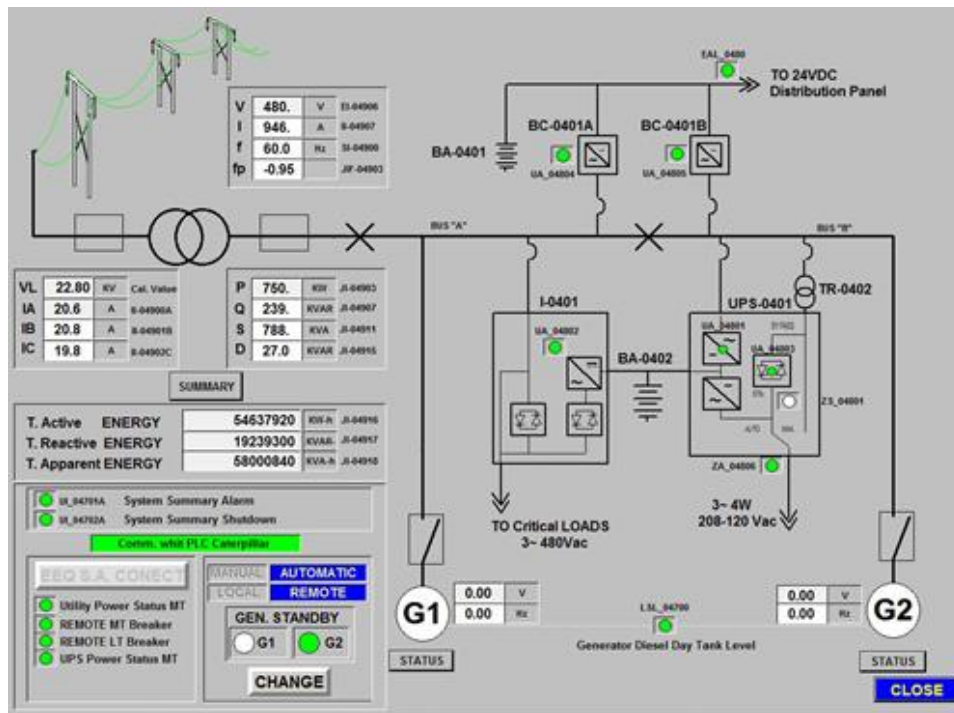
**Figura 36-1:** Diagrama de bloques Calentador de Aceite Térmico

Realizado por: Ojeda, 2017.

#### 1.9.3.7 Generadores Eléctricos

La estación está acoplado al “Sistema Interconectado de Energía Eléctrica Ecuatoriano”, pero consta de tres generadores de respaldo G-0401, G-402 y G-0403 en caso de cortes de energía, los cuales funcionan a diésel, aparte para las cargas críticas tienes subsistemas como un inversor, UPS y bancos de baterías.

En la Figura 37-1 se presenta el LHMI de cómo está conformado el sistema de suministro eléctrico de la estación PS-4.

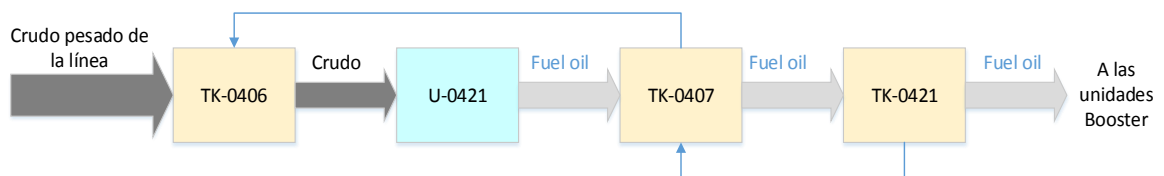


**Figura 37-1:** LHMI de suministro eléctrico

Realizado por: Ojeda, 2017.

#### 1.9.3.8 Almacenamiento de Combustible (Fuel Oil Storage TK)

El crudo pesado es tomado directamente de la línea principal y almacenado en el tanque TK-0406, posteriormente el mismo es tratado en la unidad U-0421 para eliminar el agua que el hidrocarburo pueda contener hasta niveles óptimos para su uso como combustible de los motores Wartsila D-0401 A/B/C/D/E/F el cual se almacena inicialmente en el TK-0407 y por último en el TK-0421 para ir a las unidades Booster. Los tres tanques tienen un overflow para mantener la temperatura del “Fuel oil”, este comportamiento se observa en la Figura 38-1.

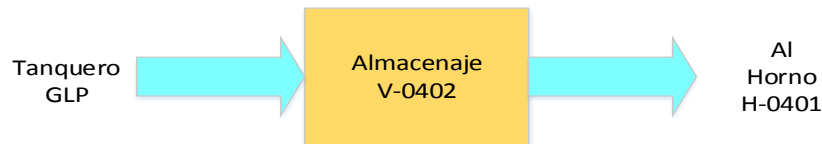


**Figura 38-1:** Diagrama de bloque Almacenamiento de Combustible

Realizado por: Ojeda, 2017.

### 1.9.3.9 Almacenamiento de Gas Licuado de Petróleo (GLP)

Un Tanquero transporta hacia la estación PS-4 en donde el Gas Licuado de Petróleo (GLP) es almacenado en el V-0402 para ser usado en el horno H-0401 que calienta el aceite térmico para el intercambiador, como se observa en la Figura 39-1.

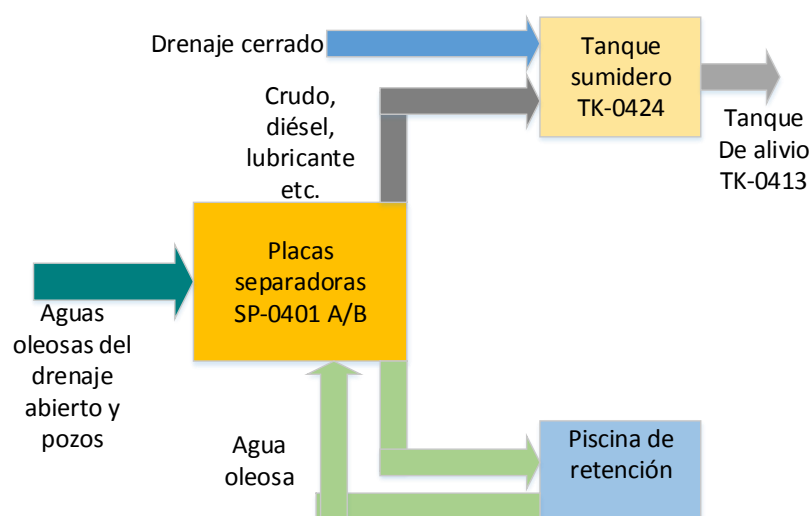


**Figura 39-1:** Diagrama de bloque Almacenamiento de GLP

Realizado por: Ojeda, 2017.

### 1.9.3.10 Tratamiento de Drenaje

Las tuberías de drenaje abierto y de pozos recoge las aguas oleosas de la estación las cuales son llevadas hacia el sistema de placas separadoras de crudo SP-0401 A/B, las mismas separan el petróleo, aceites, diésel etc. del agua, el líquido que resulta del tratamiento es oxigenado en una piscina de retención y para seguir eliminando los hidrocarburos cierra el lazo regresando a las placas separadoras, por el contrario lo restante y lo que proviene del drenaje cerrado es almacenado en el tanque sumidero TK-0424, cuando este alcanza un alto nivel con ayuda de un bomba se traslada el producto en al tanque de alivio TK-0413, en la Figura 40-1 se determina el funcionamiento de este sistema.

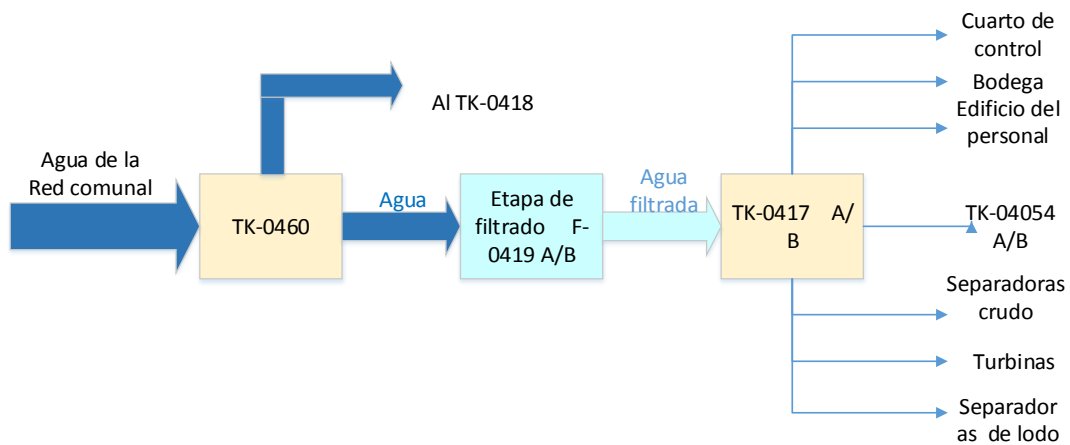


**Figura 40-1:** Diagrama de bloque Tratamiento de Drenaje

Realizado por: Ojeda, 2017.

### 1.9.3.11 Sistema de Agua de Servicio

Este sistema capta el agua proveniente de la red comunal para almacenarlo en el tanque TK-0460, seguidamente el agua sin filtrar es enviada directamente al TK-0418 para ser usada en otras actividades mientras que la filtrada es acopiada en los tanques de agua no bebible TK-0417 A/B que posteriormente es repartida a los cuartos del campamento, al cuarto del control, bodega, a las turbinas, a los TK-0454 A/B, a las unidad separadora para combustible y de lodo del aceite de los motores principales, en la Figura 41-1 se observa el comportamiento del mismo.

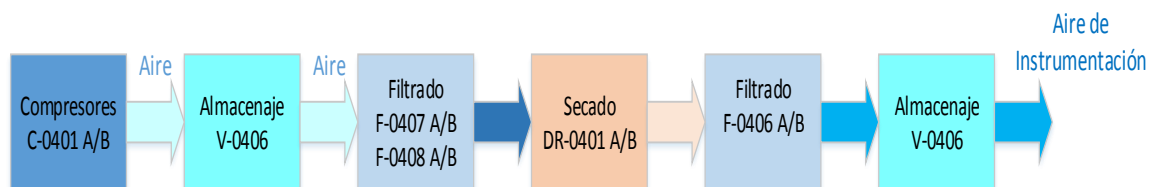


**Figura 41-1:** Diagrama de bloques Sistema de Agua de Servicio

Realizado por: Ojeda, 2017.

### 1.9.3.12 Sistema de Compresores de Aire

Este procedimiento consta de dos compresores de aire uno siempre de respaldo en caso de falla del principal, el aire inicialmente es almacenado en el V-0406 de ahí es purificado por los F-0407 A/B y F0408 A/B y secado por los DR-0401 A/B, para estar listo para ser consumido como aire de instrumentación pasa por unos últimos filtros F-0406 A/B antes de ser guardado en el V-0405, en la Figura 42-2 se muestra el diagrama de bloques de este proceso.

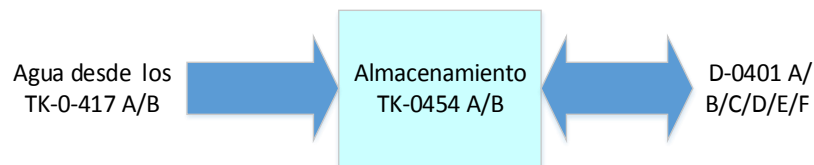


**Figura 42-1:** Diagrama de bloque Sistema de Compresores de Aire

Realizado por: Ojeda, 2017.

### 1.9.3.13 Tanques de Agua de Enfriamiento (Cooling Water TK)

Este sistema adquiere el elemento del sistema de agua de servicio y lo almacena en los tanques TK-0454 A/B que usa la misma para completar o reducir los niveles de los tanques de HT y LT de enfriamiento de los motores principales D-0401 A/B/C/D/E/F como se identifica en la Figura 43-1.

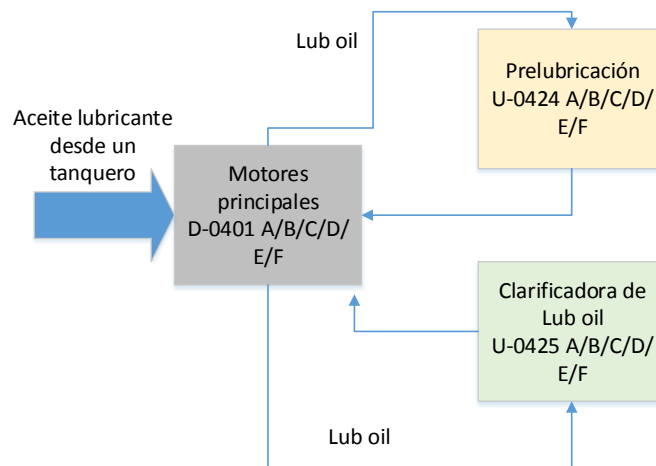


**Figura 43-1:** Diagrama de bloques Tanques de Agua de Enfriamiento

Realizado por: Ojeda, 2017.

### 1.9.3.14 Tanques de Aceite Lubricante (Lub Oil TK)

En la Figura 44-1 se aprecia que tanquero trae el suministro necesario de aceite lubricante que usan los motores principales, en la unidad U-0424 A/B/C/D/E/F es la etapa de pre lubricación del motor y la unidad U-0425 A/B/C/D/E/F que clarifica el Lub oil usado en la máquina de partículas.



**Figura 44-1:** Diagrama de bloque Tanques de Aceite Lubricante

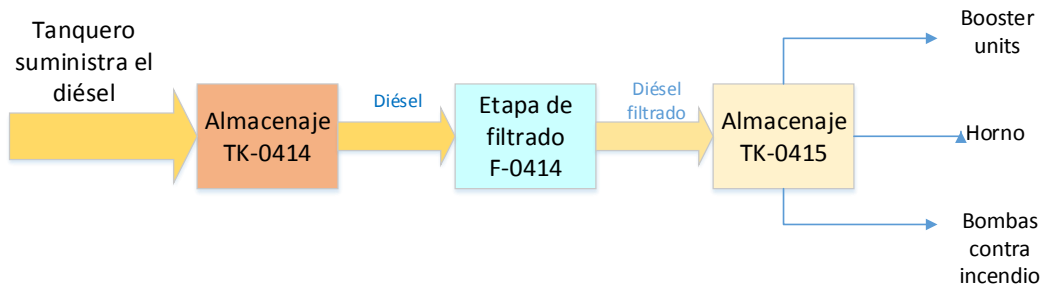
Realizado por: Ojeda, 2017.

### 1.9.3.15 Sistema de Aceite Diésel (Diésel Oil System)

Un tanquero llena el tanque de almacenamiento de diésel TK-0414, con ayuda de unas bombas pasa por un filtrado en el F-0415, el mismo es enviado para que se almacene en el tanque de diésel



diario TK-0415 y es usado en las unidades Booster, en las bombas contra incendio y en el horno. En la Figura 45-1 se considera el diagrama de bloques del sistema de almacenamiento de diésel.

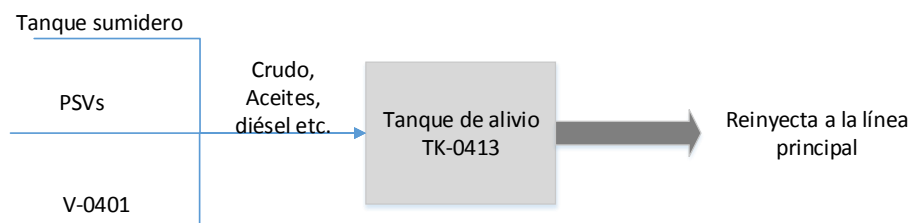


**Figura 45-1:** Diagrama de bloque Sistema de Aceite Diésel

Realizado por: Ojeda, 2017.

### 1.9.3.16 Tanque de Alivio (Relief Tank)

La estación consta de un tanque de alivio TK-0413 como se observa en la Figura 46-1 el cual siempre debe mantener cierto nivel establecido para poder recibir crudo desde el tanque sumidero, de las válvulas de alivio y del V-04012 del sistema de aceite térmico, el mismo que posteriormente es reinyectado a la línea principal para su transporte.



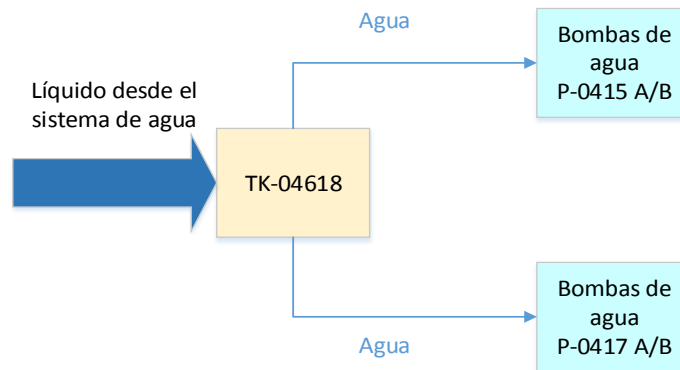
**Figura 46-1:** Diagrama de bloque Tanque de alivio

Realizado por: Ojeda, 2017.

### 1.9.3.17 Bombas de Agua contra Incendio

Este es el sistema de bombas de agua contra incendio el cual se activara en caso de detectar alguna ignición, el líquido es almacenado en el tanque TK-0418 que proviene del sistema de agua de servicio la cual será rociada por las bombas a diésel P-0415 A/B o las bombas eléctricas P-0417 A/B.

En la Figura 47-2 se muestra el diagrama de bloques que representa el comportamiento del sistema de agua contra incendios de la estación de bombeo Páramo



**Figura 47-2:** Diagrama de bloque Bombas de Agua contra Incendio

Realizado por: Ojeda, 2017.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO METODOLÓGICO

#### 2.1 Introducción

El presente capítulo está orientado a la implementación de metodologías de identificación y mitigación de riesgo mediante el Análisis de riesgo y Operabilidad (HAZOP) y el Análisis de Capas de Protección (LOPA) las mismas que pertenecen al Ciclo de Vida de la Seguridad Funcional (CVSF) según la IEC: 61511, a los efectos de estos se realiza el diseño de un Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) para la Estación de Bombeo “Páramo” (PS-4) perteneciente a Oleoductos de Crudos Pesados (OCP) de manera que se encargue de monitorear el proceso de transporte de crudo pesado a través de los sistemas críticos de la estación “Páramo” para mantener los niveles de seguridad de los procesos de acuerdo a estándares mundiales instituidos específicamente por la Comisión de Electrotecnia Internacional (IEC).

##### 2.1.1 Premisas

A lo largo del actual capítulo se tomaron como base las siguientes premisas:

- La Estación de Bombeo “Páramo” (PS-4) no cuenta actualmente con un Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) y funcionalmente independiente del Sistema de Control Básico de Procesos (BPCS).
- Los operadores con competentes, están entrenados y conocen los procedimientos operacionales para la toma de decisiones ante la activación de alarmas generadas por desviaciones del proceso.
- El Análisis de Riesgo y Operabilidad (HAZOP) y el Análisis de Capas de Protección (LOPA) se realizó con un grupo de operadores experimentados y conocedores del diseño, la operación y el mantenimiento de la estación de bombeo “Páramo” (PS-4).
- Para el diseño del Sistema instrumentado de Seguridad (SIS) se tomaron en cuenta los procesos que intervienen directamente en el transporte de crudo pesado.
- En el Análisis de riesgo y Operabilidad (HAZOP) la calificación de riesgos se realizó mediante la matriz de riesgo de OCP.

- En el Análisis de Capas de Protección (LOPA) se tomaron en cuenta los riesgos categorizados como personal, medio ambiente y activos pertenecientes a la matriz de riesgos de OCP.
- El valor de tasa de fallos usado en el Análisis de Capas de Protección (LOPA) fue calculado a partir de una base datos (Anexo F) correspondiente a 5 años de experiencia de OCP, la misma que fue obtenida con el manejo de su software de Gestión de Activos Empresariales (EAM) (Anexo G) y mediante el uso del libro “Offshore of Reliability Data” (OREDA, 2002).
- Para el diseño de los lazos de seguridad se ha tomado algunos valores de Probabilidad de Falla en Demanda Promedio ( $PFD_{avg}$ ) que han sido determinado por experiencia de la empresa y por datos de fábrica.
- Los valores de Probabilidad de Falla en Demanda (PFD) de las Capas de Protección Independiente (IPL) fueron tomados de valores genéricos de la industria (Anexo J).

### **2.1.2 Método de Investigación**

El método deductivo es una herramienta que mediante análisis de estudios previos, metodologías establecidas y estándares internacionales nos facilita obtener una solución al desarrollo de la fase uno del PMBOK para un Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) en el control de procesos de la estación “Páramo” de OCP.

### **2.1.3 Técnica de Investigación**

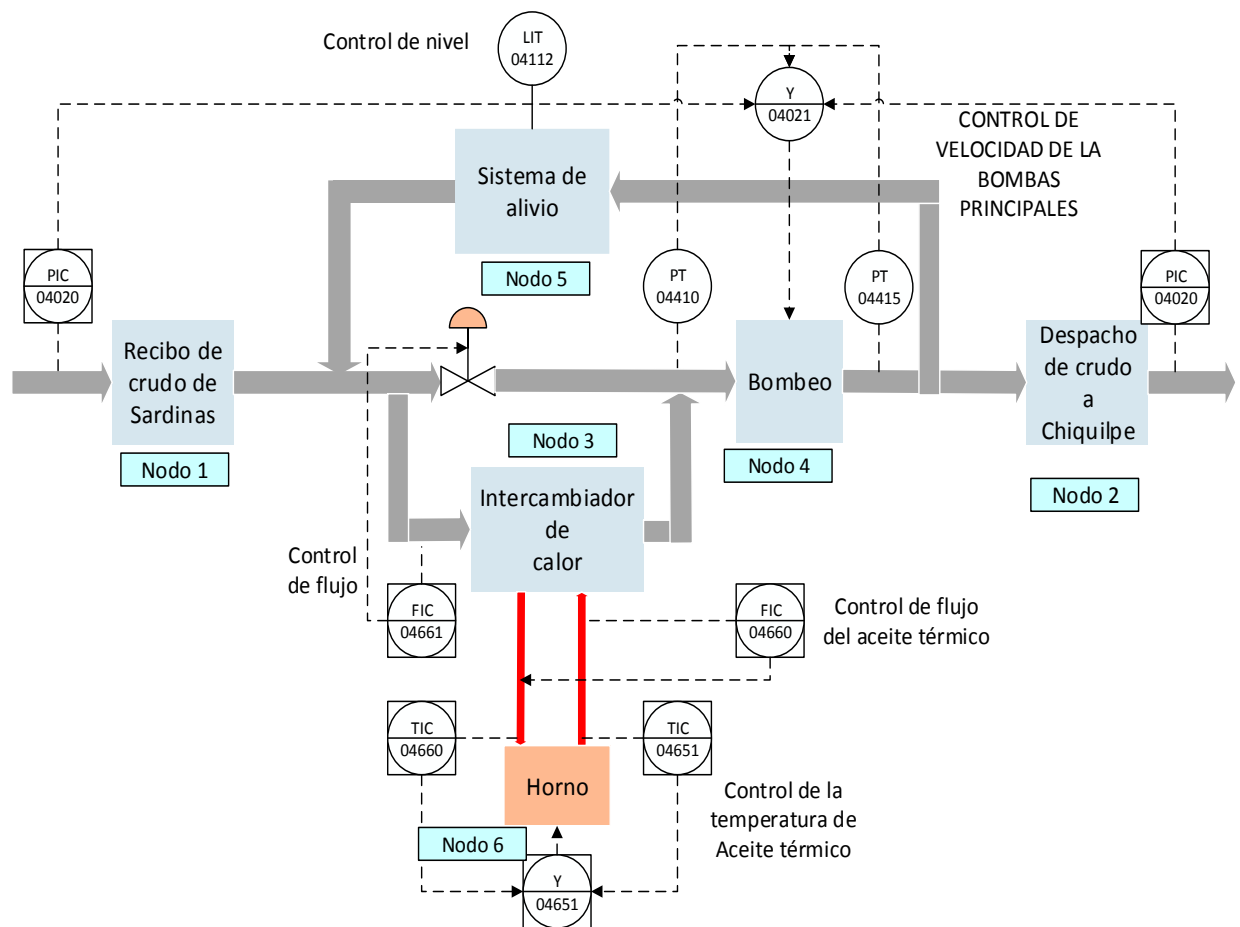
Las técnica de investigación aplicada es la entrevista la cual es elemental para la obtención de información sobre el proceso de la estación de bombeo “Páramo”, para lo cual se procedió a trabajar conjuntamente con el personal de mantenimiento y operaciones, de igual manera se aplicó la técnica de observación la cual nos permite examinar, razonar y proceder a generar una solución óptima, el Departamento de Operaciones y Mantenimiento (O&M) de Oleoductos de Crudos Pesados (OCP) y el director del trabajo de titulación el Ing. Jesús Alberto Rodríguez Flores Ph.D evaluaron las técnicas de investigación implementadas.

## 2.2 Diseño de Nodos de la Estación Páramo

Se realiza el estudio de un total de 26 P&ID de los cuales son separados en 6 nodos principales que intervienen directamente en el transporte de crudo, los mismos que fueron examinados a través de varias desviaciones típicas a la intensidad de diseño del proceso para delimitar su extensión.

### 2.2.1 Desarrollo del Diagrama de Bloques General de la Estación Páramo

Del análisis de los veinte y seis (26) Diagramas de Tuberías e Instrumentación (P&ID) pertenecientes a la estación "Páramo" se ha diseñado un diagrama de bloques en los cuales se logra identificar los procesos críticos y las variables de control principales que intervienen en el transporte del producto, para los que particularmente se desarrollara el Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) lo cual se puede evidenciar en la Figura 1-2, posteriormente se recurre a limitar los tramos pertenecientes a cada uno de los nodos.



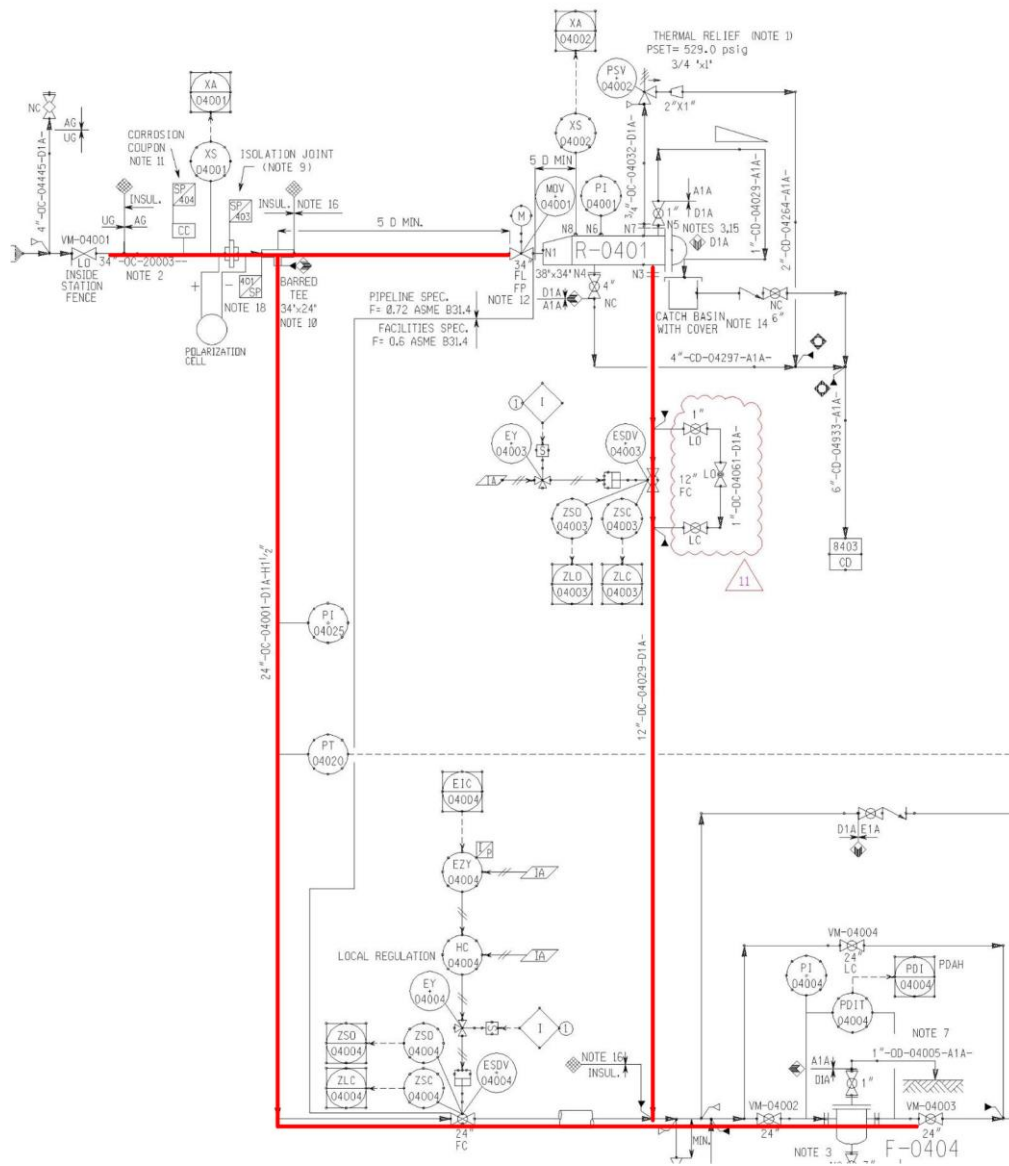
**Figura 1-2:** Diagrama de bloques de nodos de la estación Páramo

Realizado por: Ojeda, 2017.

### 2.2.1.1 Nodo 1 “Recibo de crudo de Sardinas”

El nodo 1 “Recibo de crudo de Sardinas” comprende lo que viene a ser la etapa inicial de los procesos en la estación “Páramo” ya que se acoge el crudo enviado desde la estación “Sardinas”, el nodo inicia desde la válvula manual VM-04001 hasta aguas arriba de la válvula manual VM-04003.

En el plano de referencia con numeración 2745-R-DP- 04001 (Anexo A) se ha modelado el trayecto correspondiente al nodo 1 el cual se observa en la Figura 2-2 en el cual se aprecia el trayecto del nodo 1.



**Figura 2-2: Nodo 1 “Recibo del crudo de Sardinas”**

Realizado por: Ojeda, 2017.

En la Tabla 1-2 se muestra la consolidación del desarrollo de investigación de manuales, planos y LHMI, por consecuencia se obtuvo las condiciones de diseño para diferentes variables, y los equipos que abarca el nodo 1.

**Tabla 1-2:** Condiciones de diseño, operación y equipos del Nodo 1

# Nodo	Nombre nodo	Condiciones de diseño/parámetros	Tag equipos	Planos P&ID
1	Recibo crudo de sardinas	Presión de diseño: 59 PSI Presión de operación: 1753 PSIG Temperatura de diseño: 68 F A 167 F Temperatura de operación: 151 F Flujo de diseño: 90,000 BPD - 471,300 BPD Flujo de operación: 450,000 BPD Diámetro externo de tubería: 34" Grado API Crudo: Entre 18 API y 24 API	R-0401: Tamaño de 38" , T/P 176 F/1378 PSIG F-0404: Capacidad 22400 BPH, T/P 167F/1378 PSIG , <40 PSI PSV-04002: Set 529 PSIG	2745-R-DP-04001

**Realizado por:** Ojeda, 2017

En el análisis del nodo 1 se identificó que la desviación típica a la intensidad de diseño principal es la existencia de “Más Presión” como se puede observar en la Tabla 2-2.

**Tabla 2-2:** Desviaciones del Nodo 1

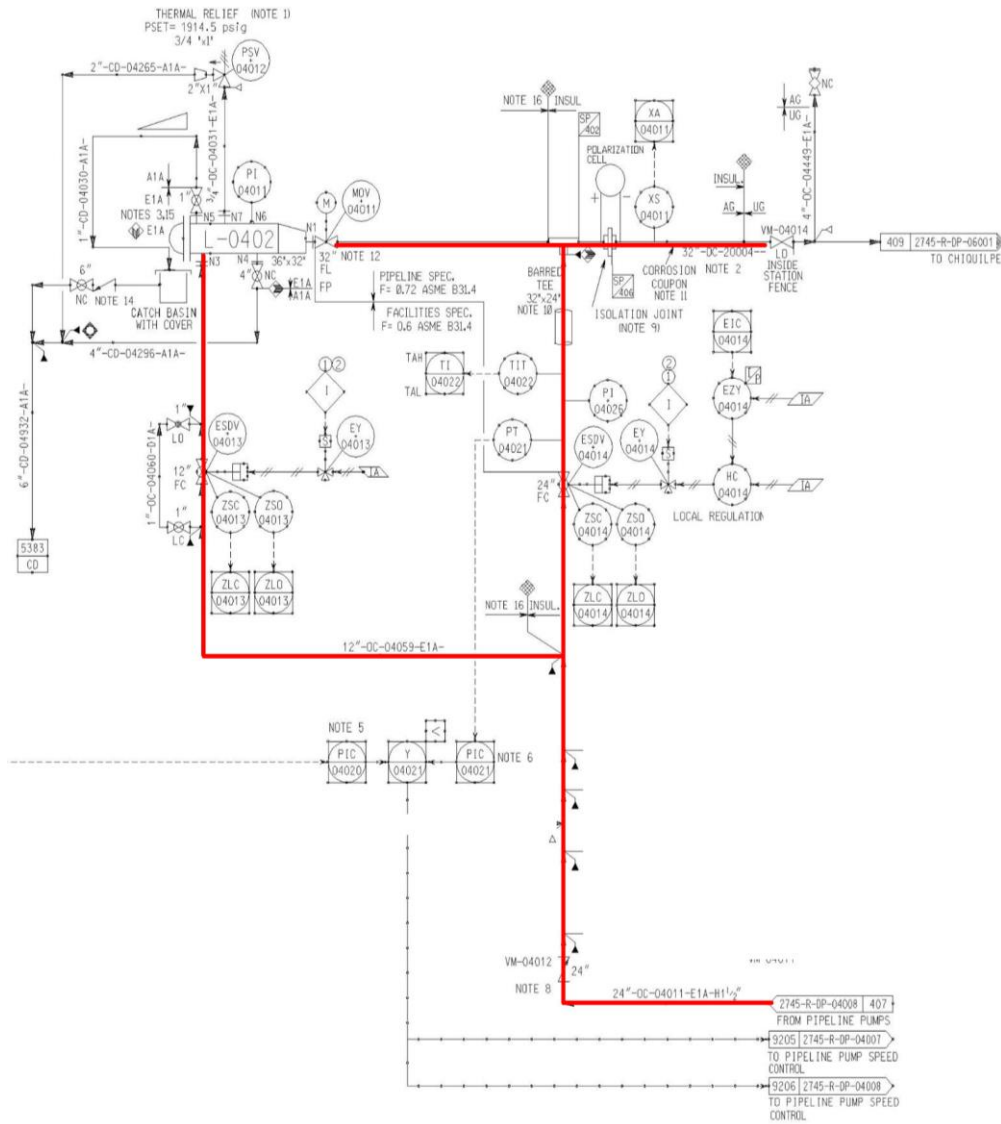
Desviaciones	Palabra guía	Parámetro	Intención de diseño
Más presión	Más	Presión	Recibir crudo desde la estación Sardinas con un flujo de 450,000 BPD y a una presión de 1753 PSIG.

**Realizado por:** Ojeda, 2017

### 2.2.1.2 *Nodo 2 “Despacho de Crudo a Chiquilpe”*

El nodo 2 “Despacho de Crudo a Chiquilpe” comprende lo que viene a ser la última etapa de los procesos en la estación Páramo puesto que el crudo bombeado por las bombas principales es enviado hacia la estación “Chiquilpe” (PRS-1), el nodo inicia desde la válvula check VM-04012 de 24" hasta aguas arriba de la válvula manual VM-4014 de 32".

En el plano de referencia con numeración 2745-R-DP- 04001 (Anexo A) se ha modelado el trayecto correspondiente al nodo 2 el cual se observa en la Figura 3-2.



**Figura 3-2:** Nodo 2 “Despacho de Crudo a Chiquilpe”

Realizado por: Ojeda, 2017.

En la Tabla 3-2 se muestran las condiciones de diseño y operación para diferentes variables, del mismo modo los equipos que comprenden el nodo 2.

**Tabla 3-2:** Condiciones de diseño, operación y equipos del Nodo 2

# Nodo	Nombre nodo	Condiciones de diseño/parámetros	Tag equipos	Planos P&ID
2	Despacho crudo a Chiquilpe	Presión de diseño: 1970 PSIG Presión de operación: 1790 Temperatura de diseño: 68 F A 167 F Temperatura de operación: 103 F Flujo de diseño: 90,000 BPD - 471,300 BPD Flujo de operación: 450000 BPD Rating de tubería: 32" Grado API Crudo: 18 API A 24 API	L-402: Tamaño 36", T/P 194 F/1378 PSIG PSV-4012: Set 1914.5 PSIG PSV-4015 A/B: Set 1912 PSIG PSV-4015 C/D: Set 1970 PSIG	2745-R-DP-04001

Realizado por: Ojeda, 2017



En el análisis del nodo 2 se identificó que las desviaciones típicas a la intención de diseño principal son la existencia de “Más Presión” y “Más temperatura” como se puede observar en la Tabla 4-2.

**Tabla 4-2:** Desviaciones del Nodo 2

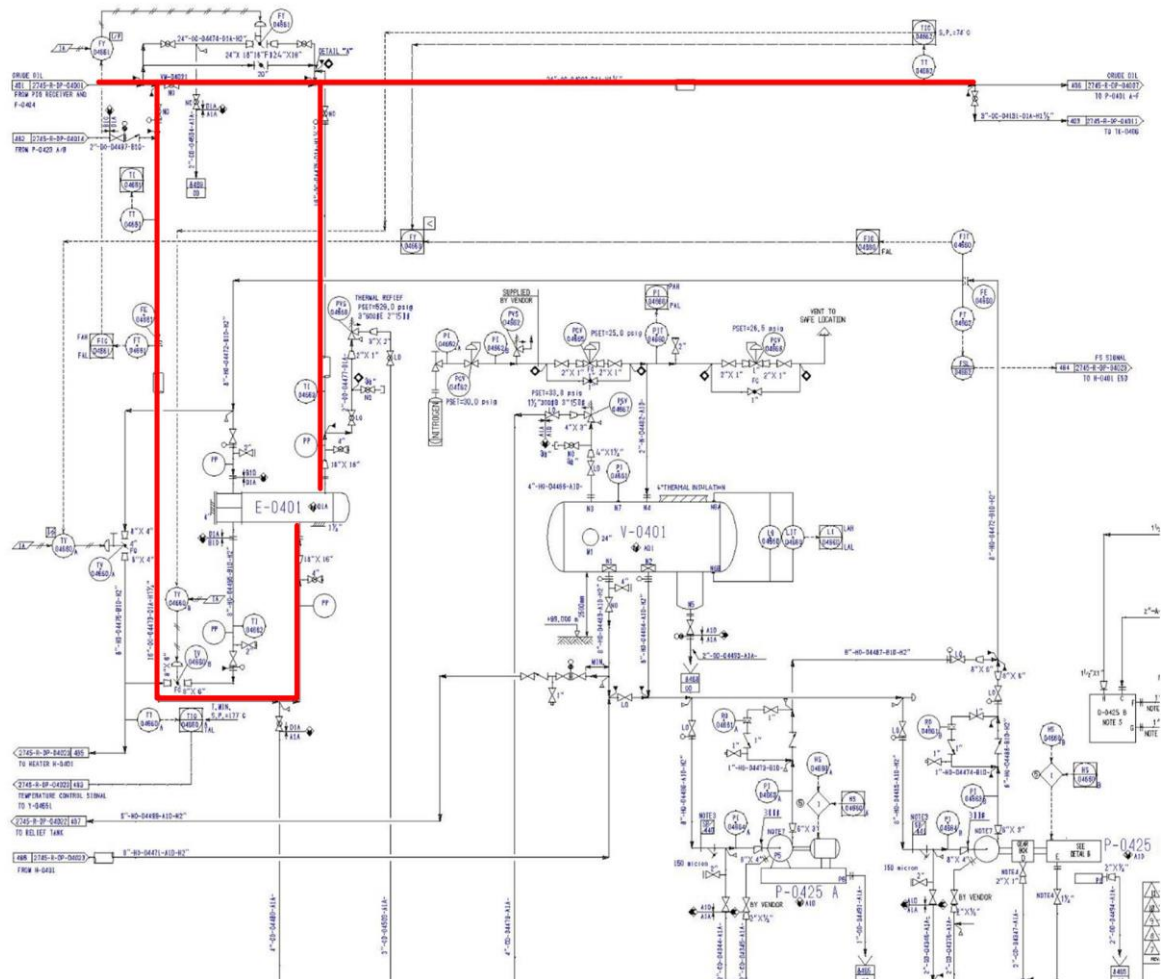
Desviaciones	Palabra guía	Parámetro	Intención de diseño
Más presión	Más	Presión	Despacho de crudo a la estación Chiquilpe de 450000 BPD a una presión de 1790 PSIG.
Más Temperatura	Más	Temperatura	

**Realizado por:** Ojeda, 2017

### 2.2.1.3 *Nodo 3 “Intercambiador de calor”*

En el diseño del nodo 3 “Intercambiador de calor” básicamente se tomó en cuenta en operación normal como el paso del crudo pesado en cierto porcentaje directamente hacia las bombas principales y lo restante por el intercambiador de calor E-0401, el nodo inicia aguas abajo de la válvula manual VM-04003 hasta aguas arriba de las Mov-04410 A/F pertenecientes a las bombas principales.

En el plano de referencia con numeración 2745-R-DP- 04019 (Anexo A) se ha modelado el trayecto correspondiente al nodo 3 el cual se observa en la Figura 4-2.



**Figura 4-2:** Nodo 3 “Intercambiador de calor”

Realizado por: Ojeda, 2017.

En la Tabla 5-2 se muestran las condiciones de diseño y operación para diferentes variables, del mismo modo los equipos que comprenden el nodo 3.

**Tabla 5-2:** Condiciones de diseño, operación y equipos del Nodo 3

# Nodo	Nombre nodo	Condiciones de diseño/parámetros	Tag equipos	Planos P&ID
3	Intercambiador de calor	Presión de diseño: 1378 PSIG A 500 F Presión de operación: 100 PSIG Temperatura de diseño: 150F a 195.3 F Temperatura de operación: 150 F Flujo de diseño: 150,000 BPD Flujo de operación: 6450 BBL/H - 800 BBL/H Rating de tubería: 16" Grado API Crudo: 18 API a 24 API	E-0401: Potencia 9378 Kw, Casco 500 F/ 1378 PSIG, Tubo 572 F/1060 PSIG. V-0401: T/P 554 F/ 33.8PSIG	2725-R-DP-4019

Realizado por: Ojeda, 2017

En el análisis del nodo 3 se identificó que las desviaciones típicas a la intensidad de diseño principal son la existencia de “Más Presión” y “Menos temperatura” como se puede observar en la Tabla 6-2.

**Tabla 6-2:** Desviaciones del Nodo 3

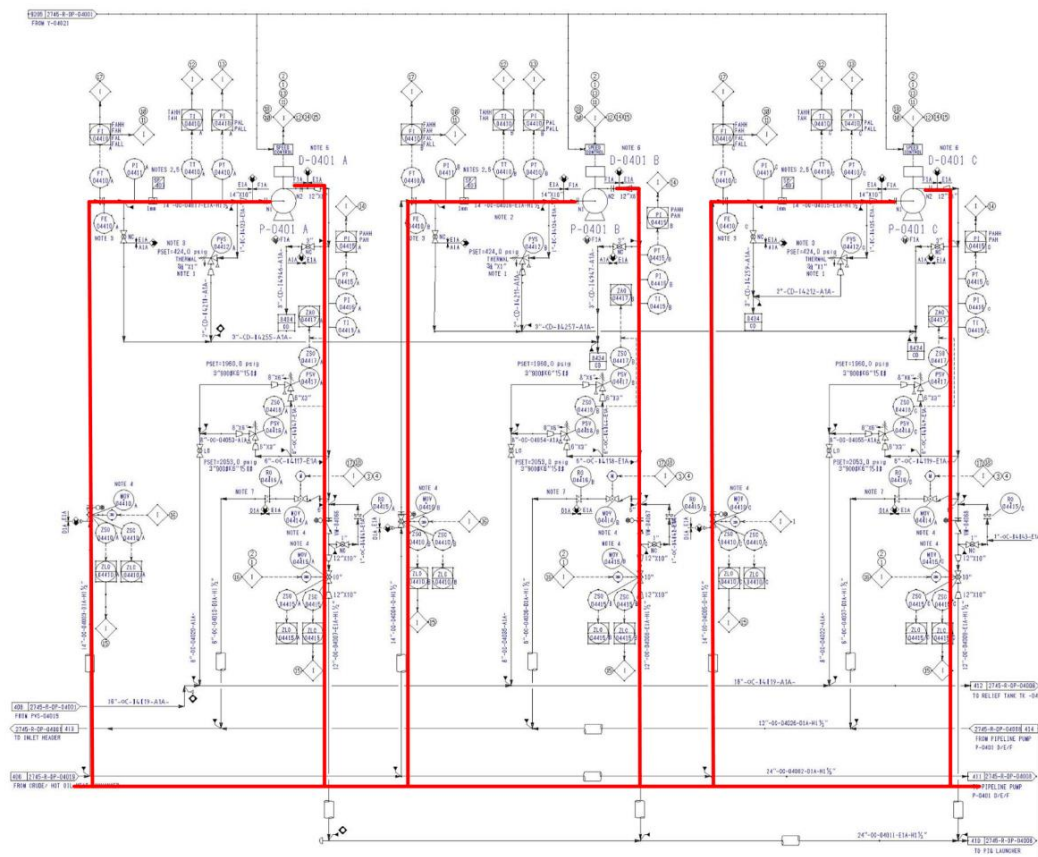
Desviaciones	Palabra guía	Parámetro	Intención de diseño
Más presión	Más	Presión	Eleva la temperatura del crudo en rango de 150 F y 195.3 F para disminuir la viscosidad.
Menos Temperatura	Menos	Temperatura	

Realizado por: Ojeda, 2017

### 2.2.1.4 Nodo 4 “Bombeo”

De igual manera el nodo 4 “Bombeo” se ha esquematizado de tal manera que inicia aguas abajo de las Mov-04410 A/F hasta la válvula check VM-04012 de 24”.

En los planos de referencia con numeración 2745-R-DP- 04007 y 2745-R-DP- 04008 (Anexo A) se ha modelado el trayecto correspondiente al nodo 3 el cual se observa en la Figura 5-2 y Figura 6-2.



**Figura 5-2:** Nodo 4 “Bombeo” etapa 1

Realizado por: Ojeda, 2017

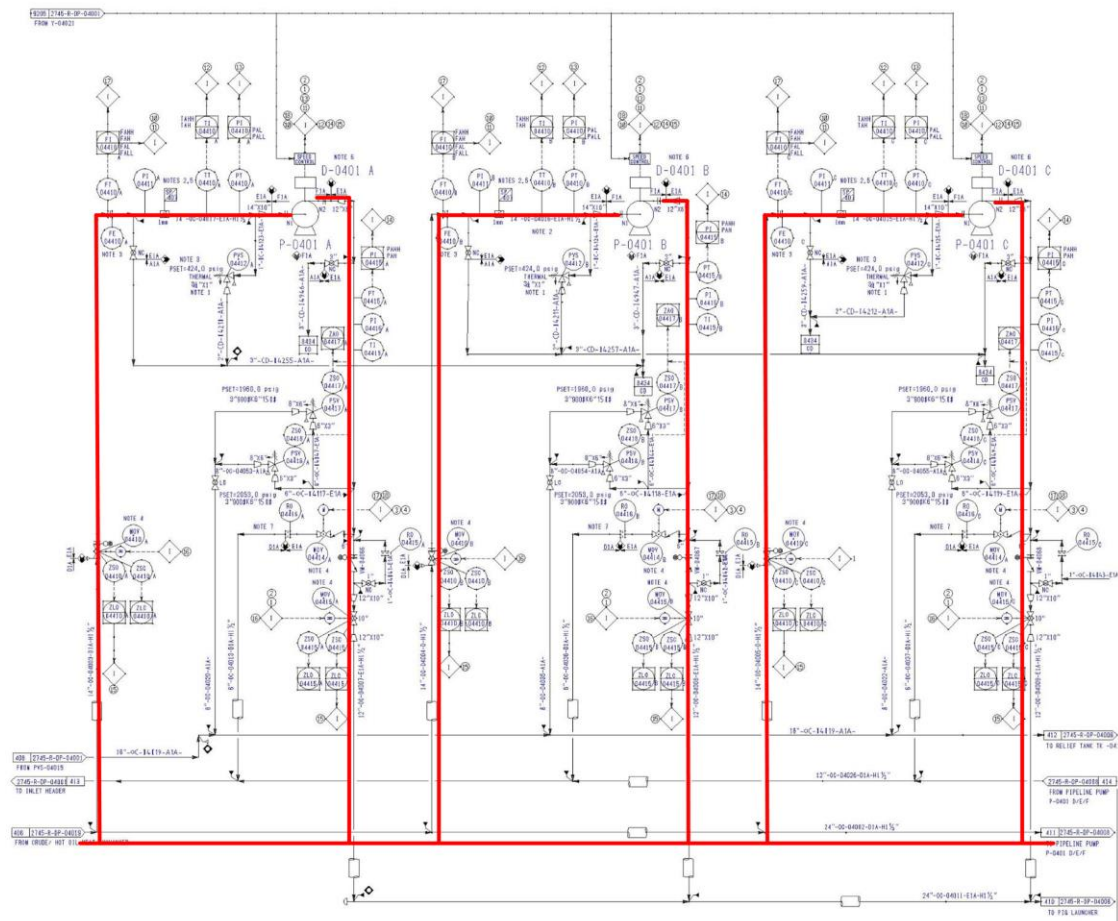


Figura 6-2: Nodo 4 “Bombeo” etapa 2

Realizado por: Ojeda, 2017.

En la Tabla 7-2 se muestran las condiciones de diseño y operación para diferentes variables, del mismo modo los equipos que comprenden el nodo 4.

Tabla 7-2: Condiciones de diseño, operación y equipos del Nodo 4

# Nodo	Nombre nodo	Condiciones de diseño/parámetros(succion)	Tag equipos	Planos P&ID
4	Bombeo	Presión de diseño: 90 PSIG - 1760 PSI Presión de operación suc: 408 PSIG - 74 PSIG Presión de operación des: 1790 Temperatura de diseño: 161 F Temperatura de operación: 167 F - 80 F Flujo de diseño: 820.3 M3HR Flujo de operación: 5000 BBL/H - 2100 BBL/H Rating de tubería: 14" Grado API Crudo: 18 API - 24 API	<b>P-0401 A/F:</b> Tasa de flujo 4526 BPH. <b>D-0401 A/F:</b> Power 3028 HP	2745-R-DP-04007 2745-R-DP-04008

Realizado por: Ojeda, 2017

En el análisis del nodo 4 se identificó que las desviaciones típicas a la intensidad de diseño principal son la existencia de “Más Presión” y “No flujo” como se puede observar en la Tabla 8-2.

**Tabla 8-2:** Desviaciones del Nodo 4

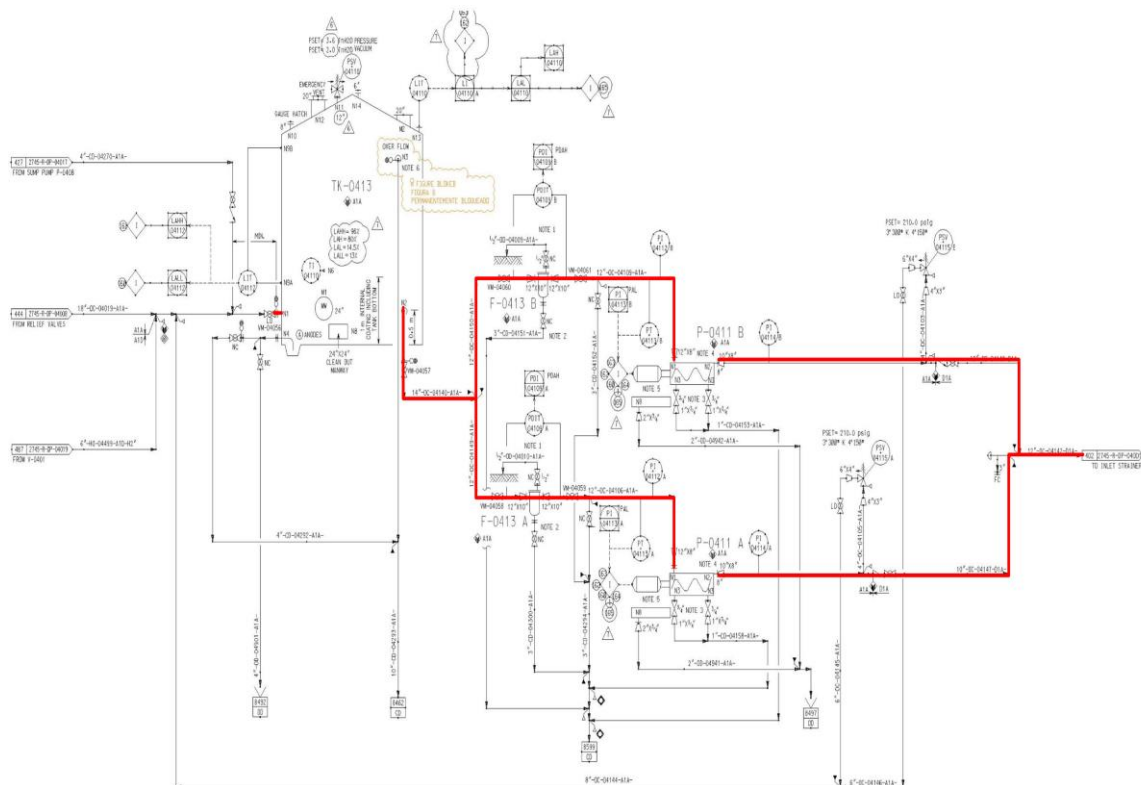
Desviaciones	Palabra guía	Parámetro	Intención de diseño
Más presión	Más	Presión	Elevar la presión del crudo de entrada de 90 PSIG a una presión de salida de 1760 PSIG para transferencia de la estación.
No flujo	No	Flujo	

Realizado por: Ojeda, 2017

### 2.2.1.5 Nodo 5 “Sistema de Alivio”

El diseño del nodo 5 “Sistema de Alivio” comprende una etapa de retroalimentación del crudo pesado hacia la línea principal, por lo que el mismo inicia desde aguas abajo de la válvula de bola VM-04056 hasta la reinyección del crudo aguas arriba de la válvula check VM-04016

En los planos de referencia con numeración 2745-R-DP- 04022 (Anexo A) se ha modelado el trayecto correspondiente al nodo 5 el cual se observa en la Figura 7-2.



**Figura 7-2:** Nodo 5 “Sistema de Alivio”

Realizado por: Ojeda, 2017

En la Tabla 9-2 se muestran las condiciones de diseño y operación para diferentes variables, del mismo modo los equipos que comprenden el nodo 5.

**Tabla 9-2:** Condiciones de diseño, operación y equipos del Nodo 5

# Nodo	Nombre nodo	Condiciones de diseño/parámetros	Tag equipos	Planos P&ID
5	Sistema de alivio	Presión diferencial de diseño: 210 PSIG Presión de operación: 160 PSIG A F Temperatura de diseño: 167 F Flujo de diseño: 517,300 BPD Rating de tubería: 18" Grado API Crudo: 18 API - 24 API	<b>Tk-413:</b> Capacidad 6000 <b>BBL F-413 A/B:</b> Capacidad 410 BPH <b>P-411 A/B:</b> Capacidad 409 BPH, DP 210 PSIG, Power 121HP	247-R-DP-04022

Realizado por: Ojeda, 2017

En el análisis del nodo 5 se identificó que las desviaciones típicas a la intensidad de diseño principal son la existencia de “Más Presión” y “No flujo” como se puede observar en la Tabla 10-2.

**Tabla 10-2:** Desviaciones del Nodo 5

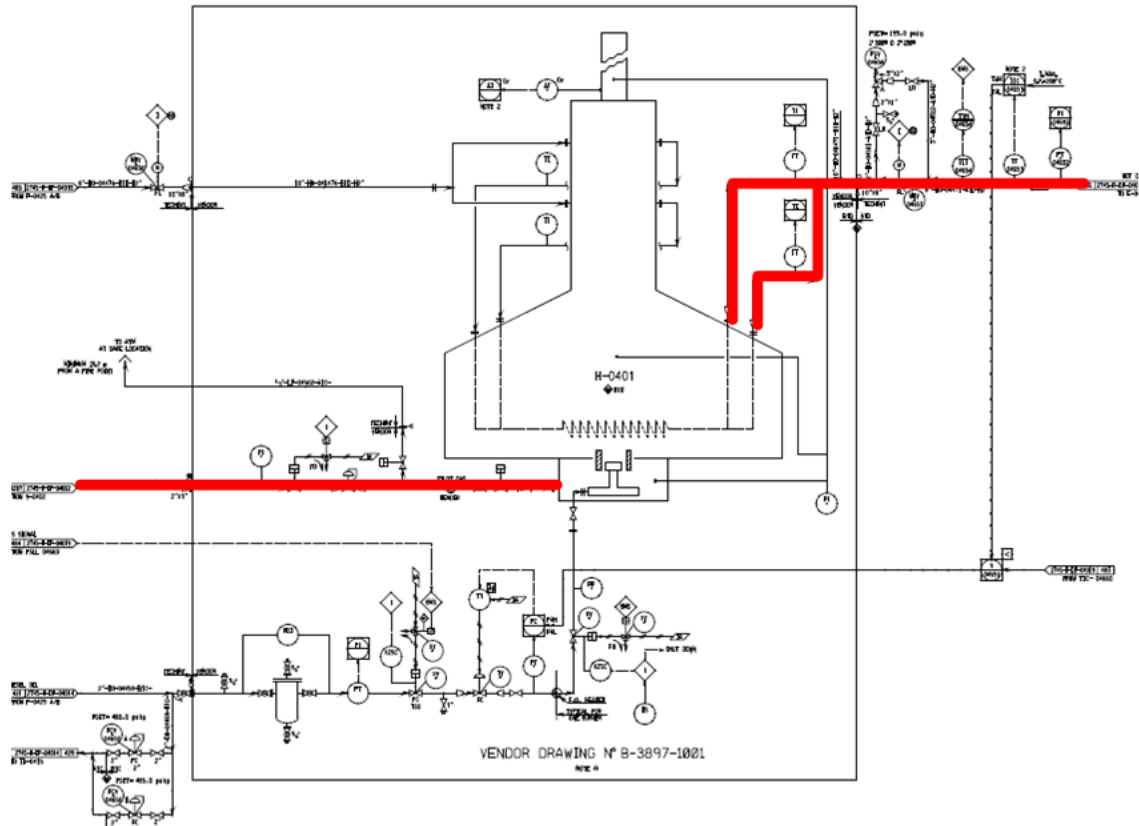
Desviaciones	Palabra guía	Parámetro	Intención de diseño
Más presión	Más	Presión	Aliviar la presión de las tuberías de crudo a una presión diferencial de diseño de 210 PSIG para reinyectar a la línea.
Menos Presión	Menos	Presión	
Más nivel	Más	Nivel	
Menos nivel	Menos	Nivel	
No flujo	No	Flujo	

Realizado por: Ojeda, 2017

#### 2.2.1.6 Nodo 6 “Horno”

En el diseño del nodo 6 “Horno” se tomó en cuenta que en operación normal este se encuentra fuera de servicio pero en una para del oleoducto de larga duración al aumentar la viscosidad del crudo pesado es necesario, el nodo inicia aguas debajo de la MOV-04650 hasta aguas arriba de tambor de almacenamiento V-0401.

En el plano de referencia con numeración 2745-R-DP- 04023 (Anexo A) se ha modelado el trayecto correspondiente al nodo 6 el cual se observa en la Figura 8-2.



**Figura 8-2:** Nodo 6 “Horno”

Realizado por: Ojeda, 2017.

En la Tabla 11-2 se muestran las condiciones de diseño y operación para diferentes variables, del mismo modo los equipos que comprenden el nodo 6.

**Tabla 11-2:** Condiciones de diseño, operación y equipos del Nodo 6

# Nodo	Nombre nodo	Condiciones de diseño/parámetros	Tag equipos	Planos P&ID
6	Horno	Presión de diseño: 153 PSIG Temperatura de diseño: 784 F Temperatura de operación: 500 F Flujo de operación: 1900 BBL/H - 1300 BBL/H	H-401: 9378 KW, T/P 784F/ 153 PSIG	2745-R-DP-04023

Realizado por: Ojeda, 2017

En el análisis del nodo 6 se identificó que las desviaciones típicas a la intención de diseño principal son la presencia de “Más Presión” y “No flujo” como se puede observar en la Tabla 12-2.

**Tabla 12-2:** Desviaciones del Nodo 6

Desviaciones	Palabra guía	Parámetro	Intención de diseño
Más presión	Más	Presión	Eleva la temperatura de aceite térmico que se usa en la transferencia de calor a una temperatura de diseño de 784 F.
Menos presión	Menos	Presión	
Más temperatura	Más	Temperatura	
Menos temperatura	Menos	Temperatura	
Más flujo	Más	Flujo	
Menos flujo	Menos	Flujo	

Realizado por: Ojeda, 2017

### 2.3 HAZOP de la Estación de Bombeo Páramo

#### 2.3.1 Antecedentes

OCP Ecuador S.A en el año 2008 con el objetivo de aumentar su seguridad implementó la metodología HAZOP que ha sido bien aceptada por la industria petrolera y petroquímica en las estaciones de “Amazonas”, “Cayagama”, “Sardinas”, “Páramo”, “Chiquilpe”, “ABS”, “Puerto Quito” y las facilidades de entrada del “Terminal Marítimo” de OCP, las condiciones de evaluación que se establecieron se encuentran en operación normal, a su vez los peligros y problemas operacionales que fueron detallados son los de sistemas principales que intervienen en el transporte a diferencia de los servicios alternos que se evaluaron de manera genérica.

#### 2.3.2 Selección de Causas de la Estación de Bombeo Páramo del HAZOP

Como parte de la metodología HAZOP se diseñaron previamente los 6 nodos pertenecientes a PS-4 a fin de limitar el Análisis de Riesgos y Operabilidad (HAZOP) a la estación de bombeo “Páramo”, por lo que se procede a continuación a seleccionar las causas que originan las diferentes desviaciones típicas a la intención de diseño del proceso.



En la Tabla 13-2 se identifican las diferentes causas identificadas que ocasionan desviaciones típicas en el nodo 1 “Recibo de crudo de sardinas”.

**Tabla 13-2:** Causas de desviaciones típicas en el Nodo 1

#Nodo	#Causa	Desviación	Causa
1	1	Más Presión	Bloqueo de la válvula manual de 34" VM-04001 de entrada a la estación páramo.
	2	Más Presión	Falla en la cerrada de la ESDV-04004
	3	Más Presión	Taponamiento del Filtro F-0404
	4	Más Presión	Bloqueo de cualquiera de las válvulas manuales (VM-04002; VM-04003) asociadas al filtro F-404
	5	Menos presión	Rotura de la línea adentro del nodo a causa de pérdida de integridad mecánica
	6	Más Presión	Atascamiento del marrano por error operativo al realizar proceso de alineación.
	7	Más Presión	Error operativo al equalizar las presiones durante la preparación de la trampa R-0401 para recibir marrano.

Realizado por: Ojeda, 2017

En la Tabla 14-2 se identifican las diferentes causas identificadas que ocasionan desviaciones típicas en el nodo 2 “Recibo de crudo de sardinas”.

**Tabla 14-2:** Causas de desviaciones típicas en el Nodo 2

#Nodo	#Causa	Desviación	Causa
2	1	Más Presión	Falla cerrada de la ESDV-04014
	2	Más Presión	Bloqueo de la válvula manual de 32" VM-04014 ubicada aguas abajo de la trampa de envío L-0402 a la salida de la estación Páramo
	3	Más Presión	Falla spuria en la cerrada de las ESDV-04013/4 durante la operación de corrida del marrano
	4	Más Temperatura	Expansión térmica durante parada de Oleoducto

Realizado por: Ojeda, 2017

En la Tabla 15-2 se identifican las diferentes causas identificadas que ocasionan desviaciones típicas en el nodo 3 “Intercambiador de calor”.

**Tabla 15-2:** Causas de desviaciones típicas en el Nodo 3

#Nodo	#Causa	Desviación	Causa
3	1	Más presión	Bloqueo de la válvula manual de 16" de entrada de crudo al E-0401
	2	Más presión	Bloqueo de la válvula manual de 16" de salida de crudo al E-0401
	3	Más presión	Falla de la cerrada de la FV-04661.
	4	Menos Temperatura	Apertura de la válvula manual de desvío del intercambiador E-0401.

Realizado por: Ojeda, 2017

En la Tabla 16-1 se identifican las diferentes causas identificadas que ocasionan desviaciones típicas en el nodo 4 “Bombeo”.

**Tabla 16-2:** Causas de desviaciones típicas en el Nodo 4

#Nodo	#Causa	Desviación	Causa
4	1	Más Presión	Cierre de la Mov-04410 A/F
	2	Más Presión	Taponamiento del filtro cono de bruja de succión de la bomba P-0401 A/F
	3	Más Presión	Parada de la bomba P-0401 A/F.
		No flujo	
	4	Más Presión	Cierre de la Mov-04415 A/F.
		No flujo	
	5	Más Presión	Apertura de la Mov-04414 A/F.
		No flujo	

Realizado por: Ojeda, 2017

En la Tabla 17-2 se identifican las diferentes causas identificadas que ocasionan desviaciones típicas en el nodo 5 “Sistema de Alivio”.

**Tabla 17-2:** Causas de desviaciones típicas en el Nodo 5

#Nodo	#Causa	Desviación	Causa
5	1	Más Presión	Reinyección de crudo a la línea de salida del Tk-0413 por medio de las bombas P-0411A/B cuando la presión del ducto es superior a la descarga de dichas bombas.
	2	Menos Presión	Filtros F-0413 A/B taponados.
	3	Más Nivel	Alivio de PSV-04015 A/D por mas de 35 minutos.
	4	Menos Nivel	Falla del sistema de control de nivel LIT-04110 al no apagar las bombas P-0411 A/B cuando existe menos nivel.

Realizado por: Ojeda, 2017

En la Tabla 18-2 se identifican las diferentes causas identificadas que ocasionan desviaciones típicas en el nodo 6 “Horno”.

**Tabla 18-2:** Causas de desviaciones típicas en el Nodo 6


#Nodo	#Causa	Desviación	Causa
6	1	Más presión	No se ha identificado
	2	Menos presión	No se ha identificado
	3	Más temperatura	No se ha identificado
	4	Menos temperatura	No se ha identificado
	5	Más flujo	No se ha identificado
	6	Menos flujo	No se ha identificado

Realizado por: Ojeda, 2017

### 2.3.3 Jerarquización de los riesgos del Análisis de Riesgos y Operabilidad (HAZOP)

Identificado las causas que producen las desviaciones típicas en los nodos específicos, es necesario plantear las consecuencias que estos ocasionarían en caso de suceder por lo que es imperioso la jerarquización de cada uno de los riesgos presentes en el Análisis de Riesgos y Operabilidad desarrollado por OCP, se diseñó un modelo tabla HAZOP el cual cumpla con el manejo de la matriz de riesgos de OCP (Anexo B) para que de manera cualitativa recurriendo al juicio de los operadores de la estación Páramo desarrollar la Tabla 19-2, Tabla 20-2, Tabla 21-2, Tabla 22-2, Tabla 23-2, Tabla 24-2 las cuales nos facilitan su posterior transferencia para el desarrollo del Análisis de Capas de Protección (LOPA).

Tabla 19-2: Desarrollo de hoja HAZOP Nodo 1

 <b>HAZOP ESTACIÓN DE BOMBEO PARAMO-OCPECUADOR</b>																
Nodo:	1		Recibo de crudo de sardinas		Parámetros de diseño	Presión de diseño: 59 PSI Presión de operación: 1753 PSIG Temperatura de diseño: 68 F A 167 F Temperatura de operación: 151 F Flujo de diseño: 90,000 BPD - 471,300 BPD Flujo de operación: 450,000 BPD					P&ID:	2745-R-DP-04001		<u>COMENTARIOS:</u>		
Desde:	La válvula manual VM-	A:	Aguas arriba de la válvula manual VM-	Equipos:		R-401, F-404, PSV-4002										
Diseño:	Recibir crudo desde la estación Sardinas con un flujo de 450,000 BPD y a una presión de 1753 PSIG.															
ID	EVENTO PELIGROSO				CONSECUENCIA (SEVERIDAD)						SALVAGUARDIAS		FRECUENCIA		RIESGO	Recomendaciones
#Causa	Desvío	Causa	Consecuencia	Persona	Activo	Operac	Amb	Clie	Comun	Imag	Valor	Rango	Nivel			
1	Más Presión	Bloqueo de la válvula manual de 34" VM-04001 de entrada a la estación páramo.	Sobrepresión aguas arriba de la estación Páramo, con incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad mecánica de la misma y posible afectación del sistema de tubería.	4	1	1	1	1	1	1	1	2	Poco probable	M	54. Identificar la necesidad de que la VM-04001 ubicada aguas arriba de R-0401 funcione como una válvula de parada de emergencia para permitir sectorizar la estación Páramo del Oleoducto.	
2	Más Presión	Falla en la cerrada de la ESDV-04004	Sobrepresión aguas arriba de la estación Páramo, con incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad mecánica de la misma y posible afectación del sistema de tubería.	4	2	1	1	1	1	1	1	3	Probable	M	55. Declarar las ESDV-04004 y ESDV-04003 como válvulas operacionales que serán demandadas durante la actividad de corrida de herramienta.  56. Determinar en función del SIL la necesidad de incluir una ESDV en la línea de 34" de llegada del oleoducto en la estación Páramo y determinar la necesidad de las ESDV-04004 y ESDV-04003.	

**Tabla 19-2:**


ID	EVENTO PELIGROSO			CONSECUENCIA (SEVERIDAD)							SALVAGUARDIAS	FRECUENCIA		RIESGO	Recomendaciones	
	#Causa	Desvío	Causa	Consecuencia	Persona	Activo	Operac	Amb	Clien	Comun		Imag	Valor	Rango		Nivel
3	Más Presión	Taponamiento del Filtro F-0404	Sobrepresión aguas arriba de la estación Páramo, con incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad mecánica de la misma y posible afectación del sistema de tubería.	4	2	1	1	1	1	1	1	1. PSV-03015 A/D (Estación Sardinias) 2. Control de presión de descargar (control override) de las bombas P-0301 A/F. 3. Alarma de alta presión diferencial PDAH-04004+ acción del operador.	4	Muy Probable	A	57. Evaluar el destino de los residuales productos de las corridas de herramienta de forma de identificar la posibilidad de derivarlo a un sistema alterno tal que la afectación de filtros, sellos de bombas y arrastres de sedimentos hacia los tanques finales del terminal Marítimo.  58. Evaluar el perfil hidráulico para el transporte del fluido a lo largo del oleoducto de forma de identificar los factores que generan deposición de sólidos, formación de tapones y separación de fases en el oleoducto tal que se incorporen las acciones correctivas necesarias para reducir este evento así como sus consecuencias sobre los equipos de proceso.
4	Más Presión	Bloqueo de cualquiera de las válvulas manuales (VM-04002; VM-04003) asociadas al filtro F-404	Sobrepresión aguas arriba de la estación Páramo, con incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad mecánica de la misma y del sistema de tubería.	4	2	1	1	1	1	1	1	1. PSV-03015 A/D (Estación Sardinias) 2. Control de presión de descargar (control override) de las bombas P-0301 A/F. 3. Alarma de alta presión diferencial PDAH-04004+ operador.	2	Poco probable	M	1. No se sugieren recomendaciones
5	Menos presión	Rotura de la línea adentro del nodo a causa de pérdida de integridad mecánica	Derrame ocasionando liberación de crudo al ambiente con potencial incendio y afectación de las personas	3	3	1	1	1	1	1	1	1. Plan e integridad con protección catódica, monitoreo de espesores. 2. Rondas operativas diurnas	2	Poco probable	M	

**Tabla 19-2:**

ID	EVENTO PELIGROSO			CONSECUENCIA (SEVERIDAD)							SALVAGUARDIAS	FRECUENCIA		RIES GO	Recomendaciones	
	#Causa	Desvío	Causa	Consecuencia	Persona	Activo	Operac	Amb	Clien	Comun		Imag	Valor	Rango		Nivel
6	Mas Presión	Atascamiento del marrano por error operativo al realizar proceso de alineación.	N/A	1	1	1	1	1	1	1	1	N/A	3	Probable	B	C: Escenario poco probable y a que existen varios procedimientos y controles operacionales que se ejecutan antes de enviar la herramienta.
7	Mas Presión	Error operativo al ecualizar las presiones durante la preparación de la trampa R-0401 para recibir marrano.	Daño mecánico a la trampa de recibo ocasionando liberación de crudo al ambiente con potencial incendio y afectación a las personas.	5	3	3	2	1	3	3	1. Procedimiento operacional de recepción de herramientas inteligentes	4	Muy probable	A	R: Evaluar en el LOPA para determinar si estamos en un riesgo aceptable o no.  R: Evaluar la inclusión de permisivo que no permita la apertura de la ESDV-04003 cuando no exista alta diferencial de presión.	

Realizado por: Ojeda, 2017

Tabla 20-2: Desarrollo de hoja HAZOP Nodo 2

 <b>HAZOP ESTACIÓN DE BOMBEO PARAMO-OCP ECUADOR</b>																	
Nodo:		2 Despacho de crudo a Chiquilpe			Parámetros de diseño	Presión de diseño: 59 PSI Presión de operación: 1753 PSIG Temperatura de diseño: 68 F A 167 F Temperatura de operación: 151 F Flujo de diseño: 90,000 BPD - 471,300 BPD Flujo de operación: 450,000 BPD Diámetro externo de tubería: 34"					P&ID:		2745-R-DP-04001		<b>COMENTARIOS:</b>		
Desde:		La válvula check VM-04012 de 24"	A:	La válvula manual VM-4014 de 32"		Equipos:		L-402, PSV-4012, PSV-4015 C/D									
Diseño:		Despacho de crudo a la estación Chiquilpe de 450000 BPD a una presión de 1790 PSIG.															
ID	EVENTO PELIGROSO				CONSECUENCIA (SEVERIDAD)						SALVAGUARDIAS		FRECUENCIA		RIES GO	Recomendaciones	
#Causa	Desvío	Causa	Consecuencia	Persona	Activo	Operac	Amb	Clie	Comun	Imag	Valor	Rango	Nivel				
1	Más Presión	Falla cerrada de la ESDV-04014	Sobrepresion aguas arribas de la estación Páramo, con incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad ,mecánica de la misma y posible afectación del sistema de tubería.	4	2	1	1	1	1	1	1	4	Muy probable	A	64.Declarar las ESDV-04014 y ESDV-04013 como válvulas operacionales que serán demandadas durante la actividad de corrida de herramienta. 65. Determinar en función del SIL la necesidad de incluir una ESDV en la línea de 34" de salida del oleoducto en la estación Páramo y determinar la necesidad de las ESDV-04014 y ESDV-04013. 66. Identificar la necesidad de que la VM-04014 de 32" ubicada aguas abajo de L-0402 funcione como una válvula de parada de emergencia para permitir sectorizar la estación Páramo del Oleoducto.		




**Tabla 20-2:**

ID	EVENTO PELIGROSO			CONSECUENCIA (SEVERIDAD)							SALVAGUARDIAS	FRECUENCIA		RIESGO	Recomendaciones	
	#Causa	Desvío	Causa	Consecuencia	Persona	Activo	Operac	Amb	Clie	Comun		Imag	Valor	Rango		Nivel
2	Más Presión	Bloqueo de la válvula manual de 32" VM-04014 ubicada aguas abajo de la trampa de envío L-0402 a la salida de la estación Páramo	Sobrepresion aguas arribas de la estación Páramo, con incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad ,mecánica de la misma y posible afectación del sistema de tubería.	4	1	1	1	1	1	1	1	1. Lazo de control PIC-04021. 2. PSV-04015 A/D.	2	Poco probable	M	66. Identificar la necesidad de que la VM-04014 de 32" ubicada aguas abajo de L-0402 funcione como una válvula de parada de emergencia para permitir sectorizar la estación Páramo del Oleoducto.
3	Más Presión	Falla spuria en la cerrade de las ESDV-04013/4 durante la operación de corrida del marráno.	Sin concecuencias considerables	4	2	1	1	1	1	1	1	1. Lazo de control PIC-04021. 2. PSV-04015 A/D. 3. ZSC-04014	3	Probable	M	
4	Más Temperatura	Expansión térmica durante parada de Oleoducto	Derrame de crudo ocasionando liberación de crudo al ambiente con potencial incendio y afectacion a las personas	4	1	1	1	4	4	4	4	1. PSV-04015 A/D	2	Poco probable	M	

Realizado por: Ojeda, 2017

**Tabla 21-2:** Desarrollo de hoja HAZOP Nodo 3


 <b>HAZOP ESTACIÓN DE BOMBEO PARAMO-OCP ECUADOR</b>																	
<b>Nodo:</b>		3 Intercambiador de calor		<b>Parámetros de diseño</b>	Presión de diseño: 1378 PSIG A 500 F Presión de operación: 100 PSIG Temperatura de diseño: 150F a 195.3 F Temperatura de operación: 150 F Flujo de diseño: 150,000 BPD Flujo de operación: 6450 BBL/H - 800 BBL/H Rating de tubería: 16"						<b>P&amp;ID:</b>	27-45-R-DP-04019	<b>COMENTARIOS:</b>				
<b>Desde:</b>		Aguas abajo de la válvula manual VM- 04003	<b>A:</b>		Aguas arriba de las Mov-04410 A/F							<b>Equipos:</b>				E-0401, V-0401	
<b>Diseño:</b>		Elevar la temperatura del crudo en rango de 150 F y 195.3 F para disminuir la viscosidad.															
<b>ID</b>	<b>EVENTO PELIGROSO</b>			<b>CONSECUENCIA (SEVERIDAD)</b>							<b>SALVAGUARDIAS</b>			<b>FRECUENCIA</b>		<b>RIES GO</b>	<b>Recomendaciones</b>
<b>#Causa</b>	<b>Desvío</b>	<b>Causa</b>	<b>Consecuencia</b>	<b>Persona</b>	<b>Activo</b>	<b>Operac</b>	<b>Amb</b>	<b>Clie</b>	<b>Comun</b>	<b>Imag</b>	<b>Valor</b>	<b>Rango</b>	<b>Nivel</b>				
1	Más presión	Bloqueo de la válvula manual de 16" de entrada de crudo al E-0401	Incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad, mecánica de la misma	3	2	1	1	1	1	1	1. Lazo de control FIC-04661	2	Poco probable	M	59. Considerar modificar el esquema de operación de forma que el crudo no pase a través del intercambiador de calor E-0401 sino sea direccionado a través del desvío a la succión de las bombas P-0401. En caso de que esta condición pueda afectar al sistemas de HOT OIL incluir las variantes necesarias en dicho sistemas para asegurar la calidad del servicio (para prevenir la humedad en el aceite térmico)		
2	Más presión	Bloqueo de la válvula manual de 16" de salida de crudo al E-0401	Incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad, mecánica de la misma	3	2	1	1	1	1	1	1. Lazo de control FIC-04661	2	Poco probable	M			

**Tabla 21-2:**

ID	EVENTO PELIGROSO			CONSECUENCIA (SEVERIDAD)							SALVAGUARDIAS	FRECUENCIA		RIESGO	Recomendaciones	
	#Causa	Desvío	Causa	Consecuencia	Persona	Activo	Operac	Amb	Clien	Comun		Imag	Valor	Rango		Nivel
3	Más Presión	Falla de la FV-04661	Incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad , mecánica de la misma.	4	2	1	1	1	1	1	1	N/A	3	Probable	M	59.Considerar modificar el esquema de operación de forma que el crudo no pase a través del intercambiador de calor E-0401 sino sea direccionado a través del desvío a la succión de las bombas P-0401. En caso de que esta condición pueda afectar al sistemas de HOT OIL incluir las variantes necesarias en dicho sistemas para asegurar la calidad del servicio (para prevenir la humedad en el aceite térmico)
4	Menos Temperatura	Apertura de la válvula manual de desvío del intercambiador E-0401	No se identificaron consecuencias relevantes en el proceso aún cuando pudiera afectarse la calidad del aceite térmico debido a la disminución de Temperatura.	1	1	1	1	1	1	1	1	N/A	1	Improbable	MB	

Realizado por: Ojeda, 2017

**Tabla 22-2:** Desarrollo de hoja HAZOP Nodo 4

 <span style="float: right;">HAZOP ESTACIÓN DE BOMBEO PARAMO-OCPECUADOR</span>																	
Nodo:		4		Bombeo		Parámetros de diseño	Presión de diseño: 90 PSIG - 1760 PSI Presión de operación suc:408 PSIG - 74PSIG Presión de operación des: 1790 Temperatura de diseño: 161 F Temperatura de operación: 167 F - 80 F Flujo de diseño: 820.3 M3HR Flujo de operación: 5000 BBL/H - 2100 BBL Rating de tubería: 14" Grado API Crudo: 18 API - 24 API				P&ID:		27-45-R-DP-04007 ; 2745-R-DP-04008		<u>COMENTARIOS:</u>		
Desde:		Aguas abajo de las Mov-04410 A/F		A: La válvula check VM-04012 de 24"			Equipos:		P-0401 A/F ; D-401 A/F								
Diseño:		Elevar la presión del crudo de entrada de 90 PSIG a una presión de salida de 1760 PSIG para transferencia de la estación.															
ID	EVENTO PELIGROSO			CONSECUENCIA (SEVERIDAD)							SALVAGUARDIAS		FRECUENCIA		RIESGO	Recomendaciones	
#Causa	Desvío	Causa	Consecuencia	Persona	Activo	Operac	Amb	Clieñ	Comun	Imag	Valor	Rango	Nivel				
1	Más Presión	Cierre de la Mov-04410 A/F	Sobrepresion aguas arribas de la estación Páramo, con incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad ,mecánica de la misma y posible afectación del sistema de tubería.	4	2	2	1	1	1	1	1	1.Control de presión del PIC-04020 2.ZSC-04410		3	Probable	M	60. Configurar enclavamiento para parada de la bomba P-0401 A/F por posición de la MOV-04410 A/F de tal forma que esta siempre este abierta.
2	Más Presión	Taponamiento del filtro cono de bruja de succión de la bomba P-0401 A/F	Sobrepresion aguas arribas de la estación Páramo, con incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad ,mecánica de la misma y posible afectación del sistema de tubería.	4	2	2	1	1	1	1	1	1.Control de presión del PIC-04020. 2. Plan de mantenimiento.		1	Improbable	B	1. No se sugieren recomendaciones.

**Tabla 22-2:**


ID	EVENTO PELIGROSO			CONSECUENCIA (SEVERIDAD)							SALVAGUARDIAS	FRECUENCIA		RIESGO	Recomendaciones	
	#Causa	Desvío	Causa	Consecuencia	Persona	Activo	Operac	Amb	Clie	Comun		Imag	Valor	Rango		Nivel
3	Más Presión	Parada de la bomba P-0401 A/F.	Incremento de la presión aguas arriba de la bomba con afectación de la estaciones de Sardinas, Cayagama y Amazonas.	4	2	2	1	1	1	1	1	1. Monitoreo constante de las presiones del oleoducto.	3	Probable	M	61. Evaluar el sistema de bombeo de Páramo de forma de incrementar en la medida de lo posible la presión de descarga con la finalidad de prevenir bajas presiones en el trayecto Páramo-Chiquilpe tal que se origine flashing de producto.
	No flujo		Corte en la tranferencia del fluido a través del oleoducto de OCP hacia el terminal Marítimo.	1	2	1	1	1	1	1	1	1. PT-04410 con alarmas por PAL, PALL y enclavamiento para parada de la bomba. 1. FT-04410 con alarma por bajo flujo y muy bajo flujo y enclavamiento para las bombas. 1. Bomba en condición de respaldo.	3	Probable	B	59. Considerar modificar el esquema de operación de forma que el crudo no pase a través del intercambiador de calor E-0401 sino sea direccionado a través del desvío a la succión de las bombas P-0401. En caso de que esta condición pueda afectar al sistemas de HOT OIL incluir las variantes necesarias en dicho sistemas para asegurar la calidad del servicio (para prevenir la humedad en el aceite térmico)
	Más Presión		Incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0401A con posible afectación de la integridad, mecánica de la misma.	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1. PT-04415 A con alarma de alta y muy alta presión de descarga y enclavamiento para la bomba. 2. ZCS-04415A/F.	3	Probable	M
4	Más Presión	Cierre de la Mov-04415 A/F.	Incremento de la presión aguas arriba de la bomba con afectación de la estaciones de Paramo, Sardinas, Cayagama y Amazonas.	4	2	1	1	1	1	1	1	1. PSV-4417A y PSV-4418A. 2. ZCS-04415A/F.	3	Probable	M	62. Configurar enclavamiento para parada de la bomba P-0401 A/F por posición de la MOV-04415 A/F de forma tal que siempre esten totalmente abiertas.
	No flujo		Corte en la tranferencia del fluido a través del oleoducto de OCP hacia el terminal Marítimo.	1	2	1	1	1	1	1	1	1. Protecciones asociadas a las estaciones de rebombeo de agua. 2. Protecciones asociadas al oleoducto de Perenco. 3. ZCS-04415A/F.	3	Probable	B	

Tabla 22-2:

ID		EVENTO PELIGROSO		CONSECUENCIA (SEVERIDAD)							SALVAGUARDIAS	FRECUENCIA		RIESGO	Recomendaciones
#Causa	Desvío	Causa	Consecuencia	Persona	Activo	Operac	Amb	Clie	Comun	Imag		Valor	Rango	Nivel	
5	Más Presión	Apertura de la Mov-04414 A/F.	Recirculación continua de las bombas P-0401 A/F con incremento de presión.	2	1	1	1	1	1	1	1. FT-04410 con alarma por alto flujo y muy alto flujo y enclavamiento para las bombas.	3	Probable	M	63. Configurar enclavamiento en la descarga de las bombas de las estaciones Amazonas, Cayagama, Sardinias y Páramo para que las válvulas de recirculación solo puedan operarse (energizarse) cuando la bomba esté en condición de arranque.
	Más Presión		Incremento de presión aguas arriba de la bomba con afectaciones de las estaciones Páramo, Sardinias, Cayagama y Amazonas.	2	1	1	1	1	1	1	1. TT-4410A con alarma por alta y muy alta temperatura enclavamiento para para la parada de la bomba.	3	Probable	M	
	No flujo		Corte en la transferencia del fluido a través del oleoducto de OCP hacia el terminal Marítimo	1	1	1	1	1	1	1	1	1. PT-4415 con alarma por alta y muy alta presión en la descarga. 2. FT-04410 con alarma por alto flujo y muy alto flujo y enclavamiento para las bombas.	3	Probable	

Realizado por: Ojeda, 2017

**Tabla 23-2:** Desarrollo de hoja HAZOP Nodo 5

 <b>HAZOP ESTACIÓN DE BOMBEO PARAMO-OCPECUADOR</b>																
Nodo:		SISTEMA DE ALIVIO				Parámetros de diseño	Presión diferencial de diseño: 210 PSI Presión de operación: 160 PSIG Temperatura de diseño: 167 F Flujo de diseño: 517,300 BPD Rating de tubería: 18" Grado API Crudo: 18 API - 24 API					P&ID: 27-45-R-DP-04022		<b>COMENTARIOS:</b>		
Desde:		La válvula de de bola VM-04056		A: La reinyección del crudo a la entrada de la válvula check VM-			Equipos:	Tk-413: Capacidad 6000 BBL F-413 A/B: Capacidad 410 BPH P-411 A/B: Capacidad 409 BPH, DP 210 PSIG, Power 121HP								
Diseño:		Aliviar la presión de las tuberías de crudo a una presión diferencial de diseño de 210 PSIG para reinyectar a la línea.														
ID	EVENTO PELIGROSO				CONSECUENCIA (SEVERIDAD)						SALVAGUARDIAS		FRECUENCIA		RIESGO	Recomendaciones
#Causa	Desvío	Causa		Consecuencia	Persona	Activo	Operac	Amb	Clie	Comun	Imag	Valor	Rango	Nivel		
1	Más Presión	Reinyección de crudo a la línea de salida del Tk-0413 por medio de las bombas P-0411A/B cuando la presión del ducto es superior a la descarga de dichas bombas.		Daño de las bombas P-0411 A/B(elementos internos de la bomba).	1	1	1	1	1	1	1	3	Probable	B		
2	Menos Presión	Filtros F-0413 A/B taponados.		Daño total de las bombas P-0411 A/B.	1	2	1	1	1	1	1	4	Muy Probable	M		

**Tabla 23-2:**

ID		EVENTO PELIGROSO		CONSECUENCIA (SEVERIDAD)							SALVAGUARDIAS	FRECUENCIA		RIES GO	Recomendaciones
#Causa	Desvío	Causa	Consecuencia	Persona	Activo	Operac	Amb	Clien	Comun	Imag		Valor	Rango	Nivel	
3	Más Nivel	Alivio de PSV-04015 A/D por más de 35 minutos.	Sobrellenado del tanque de alivio TK-0413 con potencial derrame y contaminación ambiental.	4	2	1	2	1	1	1	1. Dique de contención. 2. Alarma de nivel muy alto por el LAHH-04112 + acción del operador.	2	Probable	M	
4	Menos Nivel	Falla del sistema de control de nivel LIT-04110 al no apagar las bombas P-0411 A/B cuando existe menos nivel.	Daño total de las bombas P-0411 A/B.	1	2	1	1	1	1	1	1. Procedimiento operativo para reinyección de crudo 2. Bomba de respaldo. 3. Dique.	3	Probable	M	

Realizado por: Ojeda, 2017



**Tabla 24-2:** Desarrollo de hoja HAZOP Nodo 6

<b>Nodo:</b>		HORNO		<b>Parámetros de diseño</b>	Presión diferencial de diseño: 210 PSIG    Presión de operación: 160 PSIG Temperatura de diseño: 167 F Flujo de diseño: 517,300 BPD Rating de tubería: 18" Grado API Crudo: 18 API - 24 API						<b>P&amp;ID:</b>	27-45-R-DP-04023	<b>COMENTARIOS:</b>				
<b>Desde:</b>	La MOV-04650	<b>A:</b>	La entrada del V-0401		<b>Diseño:</b>	Elevar la temperatura de aceite termico que es usa en la tranferencia de calor a una temperatura de diseño de 784 F.						<b>Equipos:</b>	H-401: 9378 KW, T/P 784F/ 153 PSIG				
<b>ID</b>	<b>EVENTO PELIGROSO</b>					<b>CONSECUENCIA (SEVERIDAD)</b>							<b>SALVAGUARDIAS</b>		<b>FRECUENCIA</b>		<b>RIESGO</b>
<b>#Causa</b>	<b>Desvío</b>	<b>Causa</b>	<b>Consecuencia</b>	<b>Persona</b>	<b>Activo</b>	<b>Operad</b>	<b>Amb</b>	<b>Clien</b>	<b>Comun</b>	<b>Imag</b>	<b>Valor</b>	<b>Rango</b>	<b>Nivel</b>				
1	Más Presión	No se identificaron	-----	1	1	1	1	1	1	1		1	Improbable	MB			
2	Menos Presión	No se identificaron	-----	1	1	1	1	1	1	1		2	Poco probable	MB			
3	Más temperatura	No se identificaron	-----	1	1	1	1	1	1	1		1	Improbable	MB			
4	Menos temperatura	No se identificaron	-----	1	1	1	1	1	1	1		1	Improbable	MB			
5	Más flujo	No se identificaron	-----	1	1	1	1	1	1	1		2	Poco probable	MB			
6	Menos flujo	No se identificaron	-----	1	1	1	1	1	1	1		2	Poco probable	MB			

**Realizado por:** Ojeda, 2017

## 2.4 Desarrollo del LOPA para el cálculo del SIL objetivo

### 2.4.1 Introducción

El Análisis de Capas de Protección (LOPA) concebido para la estación de bombeo Páramo se basa en el escenario de riesgos identificados y la valoración realizada previamente en el Análisis de Riesgos y Operabilidad (HAZOP), hay que hacer notar que adicionalmente se tomaron en cuenta otros escenarios de riesgo que se consideró pertinente evaluar.

Para la ejecución del LOPA se usó como guía el estándar IEC: 61511-3, en consecuencia se implementó una tabla de Excel como plantilla la cual corresponde a la Tabla 9-1 desarrollada conforme con los lineamientos de los estándares de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC).

### 2.4.2 Cálculo del Factor de Ocupación

En cuanto al desarrollo del factor de ocupación para la estación “Páramo” fue ejecutado para diferentes áreas de proceso y condiciones operacionales, haciendo uso de la Ecuación 4-1 se generó una plantilla de Excel para la sistematización del cálculo de los diferentes factores de ocupación que se conceptuaron pertinentes.

#### Factor de Ocupación Estación Páramo en Operación Normal

En este caso el factor de ocupación es cuando la estación está trabajando en operación normal, por lo que en PS-4 los operadores, personal de mantenimiento y otros ocupan las distintas zonas de “Páramo”, para lo que se ha tomado en cuenta las consecuentes características obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 25-2:

**Tabla 25-2:** Factor de Ocupación Operación Normal

Factor de Ocupación PS-4 en Operación Normal	#Personas	Duración (min)	# Veces al día	Horas (Al año)
Operador	2	60	4	2920
Mantenimiento	2	90	1	1095
Otros	3	60	1	1095
<b>Horas exposición por año</b>				5110
<b>Factor de Ocupación</b>				0,58333333

Realizado por: Ojeda, 2017

### Factor de Ocupación Estación Páramo en Lanzamiento de Marrano

El factor de ocupación en lanzamiento de marrano se desarrolla cuando existe presencia de operadores en el lanzador L-0402, para lo que se ha tomado en cuenta las consecuentes características obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 26-2:

**Tabla 26-2:** Factor de Ocupación Lanzamiento de Marrano

<i>Factor de Ocupación PS-4 en Lanzamiento de Marrano</i>	#Personas	Duración (min)	# Veces al año	Horas (Al año)
Operador	2	240	12	96
<b>Horas_exposición_por_año</b>				96
<b>Factor de Ocupación</b>				0,0109589

Realizado por: Ojeda, 2017

### Factor de Ocupación Estación Páramo en Recepción de Marrano

El factor de ocupación en recepción de marrano se explica cuando existe presencia de personal de operación y de limpieza en el receptor R-0401, para lo que se ha tomado en cuenta las consecuentes características obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 27-2:

**Tabla 27-2:** Factor de Ocupación en Recepción de Marrano

<i>Factor de Ocupación PS-4 en Recepción de Marrano</i>	#Personas	Duración (min)	# Veces al año	Horas (Al año)
Operador y auxiliar	2	240	24	192
Personal de limpieza	1	360	24	144
<b>Horas_exposición_por_año</b>				336
<b>Factor de Ocupación</b>				0,03835616

Realizado por: Ojeda, 2017

### Factor de Ocupación en las Bombas de la Estación Sardinas

El factor de ocupación de la estación “Sardinas” para la zona de las bombas principales P-0301 A/B/C/D/E/F está ocupada por el operador y las personas de mantenimiento, para lo que se ha tomado en cuenta las consecuentes características obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 28-2:

**Tabla 28-2:** Factor de Ocupación en las Bombas de Sardinas

<i>Factor de Ocupación en las Bombas de la Estación Sardinas</i>	#Personas	Duración (min)	# Veces al día	Horas (Al año)
Operador	1	20	8	973
			#Veces al mes	
Mantenimiento normal	1	120	1	24
			#Veces al año	
Mantenimiento predictivo	1	180	4	12
			#Veces al año	
Grupo de mantenimiento mayor	8	5400	1	720
<b>Horas exposición por año</b>				1729
<b>Factor de Ocupación</b>				0,197412481

Realizado por: Ojeda, 2017

### Factor de Ocupación Estación Páramo en las Bombas

El factor de ocupación de PS-4 para la zona de las bombas principales P-0401 A/B/C/D/E/F está ocupada por el operador y las personas de mantenimiento, para lo que se ha tomado en cuenta las consecuentes características obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 29-2:

**Tabla 29-2:** Factor de Ocupación en las Bombas de Páramo

<i>Factor de Ocupación PS-4 en las Bombas Principales</i>	#Personas	Duración (min)	# Veces al día	Horas (Al año)
Operador	1	60	8	2920
			#Veces al mes	
Mantenimiento normal	1	120	1	24
			#Veces al año	
Mantenimiento predictivo	1	180	4	12
			#Veces al año	
Grupo de mantenimiento mayor	8	5400	1	720
<b>Horas exposición por año</b>				3676
<b>Factor de Ocupación</b>				0,4196347

Realizado por: Ojeda, 2017

## Factor de Ocupación de Páramo en Parada General del Oleoducto

El factor de ocupación de PS-4 en una parada general del oleoducto ha tomado en cuenta las consecuentes características obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 30-2:

**Tabla 30-2:** Factor de Ocupación en Parada General del Oleoducto

<i>Factor de Ocupación de PS-4 en Parada General del Oleoducto</i>	<b>#Personas</b>	<b>Duración (min)</b>	<b># Veces al año</b>	<b>Horas (Al año)</b>
Parada general	4	360	1	24
<b>Horas exposición por año</b>				24
<b>Factor de Ocupación</b>				0,00273973

Realizado por: Ojeda, 2017

### 2.4.3 Probabilidad de Ignición

En el desarrollo del Análisis de Capas de Protección (LOPA) se utilizaron valores genéricos de la industria de proceso para la probabilidad de ignición (Anexo D).

### 2.4.4 Capas de Protección Independientes (IPLs)

La Probabilidad de Falla en Demanda Promedio ( $PFD_{avg}$ ) de las Capas Independientes de Protección (IPLs) fue tomada de valores genéricos de la industria de proceso (Anexo E).

### 2.4.5 Desarrollo de las Hojas de Trabajo LOPA del Nodo 1

#### Cálculo del Nivel de Integridad de Seguridad (SIL objetivo) de la Causa 1

El valor de la frecuencia iniciante para el bloqueo de la válvula manual VM-04001 (Anexo K) ha sido tomado de la tabla perteneciente al libro “Offshore Reliability Data” (OREDA, 2002, p. 618) (Anexo I) con las siguientes características:

VM-04001:

#de\_fallas= 4

#de\_equipos= 24

#de\_años= 5

De la jerarquización realizada en el HAZOP se ha obtenido los siguientes valores:

*Nivel de Severidad:*

AFO (Personal)=0,0001

AFO (Ambiente)=0,1

AFO (Activos)=0,1

Mediante el cálculo del factor de ocupación realizado en la Tabla 28-2 se ha obtenido el siguiente valor:

*Modificador Condicional:*

O=0,197412

No aplica=1

La probabilidad de falla en demanda (PFD) de las Capas de Protección Independiente (IPL) son (Anexo J):

PSV= 0,01

Control Override= 0,1

Empleando la Ecuación 3-1 para el cálculo de la frecuencia de evento iniciante, se obtiene el siguiente resultado:

$$yr = \frac{(\#de\_fallas)}{(\#de\_años)*(\#de\_equipos)}$$

$$yr = \frac{4}{(5)*(24)}$$

$$yr = 0,033333$$

Para el cálculo de la frecuencia sin mitigar se ha utilizado la Ecuación 5-1:

$$\omega r = (yr)*(Mc)$$

$$\omega r(Personal) = (0,033333)*(0,197412)$$

$$\omega r(Personal) = 0,006580$$

$$\omega r(Ambiente) = (0,033333)*(1)$$

$$\omega r(Ambiente) = 0,033333$$

$$\omega r(Activo) = \omega r(Ambiente)$$

Para el cálculo de la probabilidad de eventos intermedios se ha utilizado la *Ecuación 6-1*:

$$\beta r(Personal) = [0,006580] * [0,01]$$

$$\beta r(Personal) = (0,000066)$$

$$\beta r(Ambiente) = [0,033333] * [0,1]$$

$$\beta r(Ambiente) = (0,003333)$$

$$\beta r(Activo) = [0,033333] * [1]$$

$$\beta r(Activo) = (0,03333)$$

Al recurrir a la *Ecuación 7-1* obtenemos los valores de Factor de Reducción de Riesgo (FRR) los cuales han sido contrastados en la Tabla 6-1 para verificar el nivel SIL objetivo correspondiente:

$$FRR = \frac{1}{PFD} = \frac{1}{\frac{(AFO)}{\beta r}}$$

$$FRR(Personal) = \frac{1}{\frac{(0,0001)}{(0,000066)}}$$

$$FRR(Personal) = 0,660000$$

$$SIL(objetivo) = 0$$

$$FRR(Ambiente) = \frac{1}{\frac{(0,1)}{(0,003333)}}$$

$$FRR(Ambiente) = 0,033330$$

$$SIL(objetivo) = 0$$

$$FRR(Activos) = \frac{1}{\frac{(0,1)}{(0,033333)}}$$

$$FRR(Activos) = 0,333333$$

$$SIL(objetivo) = 0$$

En la Tabla 31-2 se muestra la hoja de trabajo LOPA para ilustrar al nodo 1 causa 1.

**Tabla 31-2:** Hoja de trabajo LOPA Nodo 1- Causa 1

#Nodo-Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Salvaguarda	# Causa	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)
1-1	Más Presión	Sobrepresion aguas arribas de la estación Páramo, con incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad ,mecánica de la misma y posible afectación del sistema de tubería	Personal	4	1,00E-04	1. PSV-03015 A/D (Estación Sardinias)  2.Control de presión de descargar(control override) de las bombas P-0301 A/F	1	Bloqueo de la válvula manual de 34" VM-04001 de entrada a la estación páramo	3,33E-02
			Ambiente	1	1,00E-01				
			Activos	1	1,00E-01				
				0	1,00E+00				

Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar (or)	Capas Independientes de Protección (IPL)				Prob. de Eventos Intermedios (Re)	SIL(Objetivo)	FRR	SIF		
Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR	PFD				Tag	Nombre	Descripción
Factor ocupación	1,97E-01	6,58E-03		PSV-03015 A/D (Estación Sardinias)	100	1,00E-02	6,580E-05	SIL 0	1	NA	NA	NA
NA	1,00E+00	3,33E-02		Control de presión de descargar(control override) de las bombas P-0301 A/F	10	1,00E-01	3,333E-03	SIL 0	0			
NA	1,00E+00	3,33E-02			1	1,00E+00	3,333E-02	SIL 0	0			

Realizado por: Ojeda, 2017



## **Cálculo de la Frecuencia del Evento Iniciante de la Causa 2**

El valor de la frecuencia iniciante para la falla en la cerrada de la ESDV-04004 (Anexo K) ha sido calculado a partir de valores adquiridos de la generación de la base de datos históricos de OCP (Anexo F), con las siguientes características:

*ESDV-04004:*

#de\_fallas= 13

#de\_equipos= 32

#de\_años= 5

Empleando la *Ecuación 3-1* para el cálculo de la frecuencia de evento iniciante, se obtiene el siguiente resultado:

$$yr = \frac{(\#de\_fallas)}{(\#de\_años)*(\#de\_equipos)}$$

$$yr = \frac{13}{(5)*(32)}$$

$$yr = 0,081250$$

La hoja de trabajo LOPA para ilustrar al nodo 1 y su causa 2 se ha desarrollado en la plantilla de Excel generada la cual pertenece a la Tabla 32-2 y se puede identificar el SIL objetivo calculado:

**Tabla 32-2:** Hoja de trabajo LOPA Nodo 1- Causa 2

#Nodo-Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Salvaguarda	# Causa	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)
1-2	Más Presión	Sobrepresion aguas arribas de la estación Páramo, con incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad ,mecánica de la misma y posible afectación del sistema de tubería	Personal	4	1,00E-04	1. PSV-03015 A/D (Estación Sardinas)  2.Control de presión de descargar(control override) de las bombas P-0301 A/F  3.Proteccion del oleoducto por cierre inadvertido de las ESDV-06004, dettectado por el ZCS-06004	1	Falla en la cerrada de la ESDV-04004	8,13E-02
			Ambiente	1	1,00E-01				
			Activos	2	1,00E-02				
				0	1,00E+00				

Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar (or)	Capas Independientes de Protección (IPL)				Prob. de Eventos Intermedios ( $\beta_r$ )	SIL (Objetivo)	FRR	SIF		
Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR	PFD				Tag	Nombre	Descripción
Factor ocupación	1,97E-01	1,60E-02		PSV-03015 A/D	100	1,00E-02	1,60E-04	SIL 0	2			
	1,00E+00	8,13E-02		Control de presión de descargar(control override) de las bombas P-0301 A/F	10	1,00E-01	8,13E-03	SIL 0	0	NA	NA	NA
	1,00E+00	8,13E-02		Proteccion del oleoducto por cierre inadvertido de las ESDV-06004, dettectado por el ZCS-06004	10	1,00E-01	8,13E-03	SIL 0	1			

Realizado por: Ojeda, 2017

### **Cálculo de la Frecuencia del Evento Iniciante de la Causa 3**

El valor de la frecuencia iniciante para la falla ocasionada por un taponamiento del Filtro F-0404 (Anexo K) ha sido calculado a partir de valores adquiridos de la generación de la base de datos históricos de OCP (Anexo F), con las siguientes características:

*F-04004:*

#de\_fallas= 11

#de\_equipos= 15

#de\_años= 5

Empleando la *Ecuación 3-1* para el cálculo de la frecuencia de evento iniciante, se obtiene el siguiente resultado:

$$yr = \frac{(\#de\_fallas)}{(\#de\_años)*(\#de\_equipos)}$$

$$yr = \frac{11}{(5)*(15)}$$

$$yr = 0,146667$$

La hoja de trabajo LOPA para ilustrar al nodo 1 y la causa 3 se ha desarrollado en la plantilla de Excel generada la cual pertenece a la Tabla 33-2 y se puede identificar el SIL objetivo calculado:

**Tabla 33-2:** Hoja de trabajo LOPA Nodo 1- Causa 3

#Nodo-Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Salvaguarda	# Causa	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)
1-3	Más Presión	Sobrepresion aguas arribas de la estación Páramo, con incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad ,mecánica de la misma y posible afectación del sistema de tubería	Personal	4	1,00E-04	1. PSV-03015 A/D (Estación Sardinas)  2.Control de presión de descargar(control override) de las bombas P-0301 A/F  3.Alarma de alta presión diferencial PDAH-04004+ accion del operador  4.PT-04410A	1	Taponamiento del Filtro F-0404.	1,47E-01
			Ambiente	1	1,00E-01				
			Activos	2	1,00E-02				

Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar (or)	Capas Independientes de Protección (IPL)				Prob. de Eventos Intermedios (br)	SIL (Objetivo)	FRR	SIF		
Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR	PFD				Tag	Nombre	Descripción
Factor de ocupación	5,83E-01	8,56E-02		Alarma de alta presión diferencial PDAH-04004+ accion del operador	10	1,00E-01	8,56E-03	SIL 1	86	AHH	SIF-01	Alta alta presión medida a la entrada de la estación Páramo, causada po el taponamiento del F-0404, con un nivel de integridad SIL=1.
	1,00E+00	1,47E-01		PSV-03015 A/D	100	1,00E-02	1,47E-03	SIL 0	0			
	1,00E+00	1,47E-01		Control de presión de descargar(control override) de las bombas P-0301 A/F	10	1,00E-01	1,47E-02	SIL 0	1			

Realizado por: Ojeda, 2017

#### **Cálculo de la Frecuencia del Evento Iniciante de la Causa 4**

El valor de la frecuencia iniciante para la falla ocasionada por un bloqueo de cualquiera de las válvulas manuales VM-04002 y VM-04003 (Anexo K) asociadas al filtro F-0404 ha sido calculado a partir de valores adquiridos de la generación de la base de datos históricos de OCP (Anexo F), con las siguientes características:

*VM-04002 y VM-04003:*

#de\_fallas= 4

#de\_equipos= 27

#de\_años= 5

Empleando la *Ecuación 3-1 para el cálculo de la frecuencia de evento iniciante, se obtiene el siguiente resultado:*

$$yr = \frac{(\#de\_fallas)}{(\#de\_años)*(\#de\_equipos)}$$

$$yr = \frac{4}{(5)*(27)}$$

$$yr = 0,029630$$

La hoja de trabajo LOPA para ilustrar al nodo 1 y la causa 4 se ha desarrollado en la plantilla de Excel generada, la cual pertenece a la Tabla 34-2 y se puede identificar el SIL objetivo calculado:

**Tabla 34-2:** Hoja de trabajo LOPA Nodo 1- Causa 4

#Nodo-Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Salvaguarda	# Causa	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)
1-4	Más Presión	Sobrepresion aguas arribas de la estación Páramo, con incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad ,mecánica de la misma y posible afectación del sistema de tubería	Personal	4	1,00E-04	1. PSV-03015 A/D (Estación Sardinas)  2.Control de presión de descargar(control override) de las bombas P-0301 A/F  3.Alarma de alta presión diferencial PDAH-04004+ accion del operador.	1	Bloqueo de cualquiera de las válvulas manuales(VM-04002;VM-04003) asociadas al filtro F-0404	2,96E-02
			Ambiente	1	1,00E-01				
			Activos	2	1,00E-02				
				0	1,00E+00				

Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar ( <i>or</i> )	Capas Independientes de Protección (IPL)				Prob. de Eventos Intermedios ( <i>βr</i> )	SIL (Objetivo)	FRR	SIF		
Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR	PFD				Tag	Nombre	Descripción
Factor de ocupación	5,83E-01	1,73E-02		PSV-03015 A/D	10	1,00E-02	1,73E-04	SIL 0	2	NA	NA	NA
	1	2,96E-02		Alarma de alta presión diferencial PDAH-04004+ accion del operador	100	1,00E-01	2,96E-03	SIL 0	0			
	1	2,96E-02		Control de presión de descargar(control override) de las bombas P-0301 A/F	10	1,00E-01	2,96E-03	SIL 0	0			

Realizado por: Ojeda, 2017

### **Cálculo de la Frecuencia del Evento Iniciante de la Causa 5**

El valor de la frecuencia iniciante por una rotura de la línea adentro del nodo a causa de pérdida de integridad mecánica ha sido tomado de un valor genérico a la industria (Anexo L).

$$yr=0,001$$

La hoja de trabajo LOPA para ilustrar al nodo 1 y la causa 5 se ha desarrollado en la plantilla de Excel generada, la cual pertenece a la Tabla 35-2 y se puede identificar el SIL objetivo calculado:

**Tabla 35-2:** Hoja de trabajo LOPA Nodo 1- Causa 5

#Nodo-Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Salvaguarda	# Causa	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)
1-5	Menos Presión	Derrame ocasionando liberación de crudo al ambiente con potencial incendio y afectación de las personas	Personal	3	1,00E-03	1. Plan e integridad con protección catódica, monitoreo de espesores.  2. Rondas operativas diurnas	1	Rotura de la línea adentro del nodo a causa de pérdida de integridad mecánica	1,00E-03
			Ambiente	1	1,00E-01				
			Activos	3	1,00E-03				
				0	1,00E+00				

Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar ( $\omega_r$ )	Capas Independientes de Protección (IPL)				Prob. de Eventos Intermedios ( $\beta_r$ )	SIL (Objetivo)	FRR	SIF		
Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR	PFD				Tag	Nombre	Descripción
Factor de ocupación	5,83E-01	5,83E-04			1	1,00E+00	5,83E-04	SIL 0	1			
	1,00E+00	1,00E-03			1	1,00E+00	1,00E-03	SIL 0	0			
	1,00E+00	1,00E-03			1	1,00E+00	1,00E-03	SIL 0	1			

Realizado por: Ojeda, 2017



### **Cálculo de la Frecuencia del Evento Iniciante de la Causa 6**

El valor de la frecuencia iniciante por atascamiento del marrano por error operativo al realizar proceso de alineación en L-0402 ha sido tomado de un valor genérico a la industria (Anexo L).

$$yr=0,1$$

La hoja de trabajo LOPA para ilustrar al nodo 1 y la causa 6 se ha desarrollado en la plantilla de Excel generada, la cual pertenece a la Tabla 36-2 y se puede identificar el SIL objetivo calculado:

**Tabla 36-2:** Hoja de trabajo LOPA Nodo 1- Causa 6

#Nodo-Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Salvaguarda	# Causa	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)
1-6	Más Presión	N/A	Personal	1	1,00E-01	N/A	1	Atascamiento del marrano por error operativo al realizar proceso de alineacion en L-0402	1,00E-01
			Ambiente	1	1,00E-01				
			Activos	1	1,00E-01				
				0	1,00E+00				

Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar ( <i>or</i> )	Capas Independientes de Protección (IPL)				Prob. de Eventos Intermedios ( <i>βr</i> )	SIL (Objetivo)	FRR	SIF		
Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR	PFD				Tag	Nombre	Descripción
Factor de ocupación	1,10E-02	1,10E-03			1	1,00E+00	1,10E-03	SIL 0	0	NA	NA	NA
	1,00E+00	1,00E-01			1	1,00E+00	1,00E-01	SIL 0	1			
	1,00E+00	1,00E-01			1	1,00E+00	1,00E-01	SIL 0	1			

Realizado por: Ojeda, 2017

### **Cálculo de la Frecuencia del Evento Iniciante de la Causa 7**

El valor de la frecuencia iniciante por error operativo al ecualizar las presiones durante la preparación de la trampa R-0401 para recibir marrano ha sido tomado de un valor genérico a la industria (Anexo L).

$$yr=0,01$$

La hoja de trabajo LOPA para ilustrar al nodo 1 y la causa 7 se ha desarrollado en la plantilla de Excel generada, la cual pertenece a la Tabla 37-2 y se puede identificar el SIL objetivo calculado:

**Tabla 37-2:** Hoja de trabajo LOPA Nodo 1- Causa 7

#Nodo-Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Salvaguarda	# Causa	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)			
1-7	Más Presión	Daño mecánico a la trampa de recibo ocasionando liberación de crudo al ambiente con potencial incendio y afectación a las personas	Personal	5	1,00E-05	1. Procedimiento operacional de recepción de herramientas inteligentes	1	Error operativo al ecualizar las presiones durante la preparación de la trampa R-0401 para recibir marrano	1,00E-02			
			Ambiente	2	1,00E-02							
			Activos	3	1,00E-03							
				0	1,00E+00							
Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar ( <i>ωr</i> )	Capas Independientes de Protección (IPL)			Prob. de Eventos Intermedios ( <i>βr</i> )	SIL (Objetivo)	FRR	SIF			
Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR	PFD			Tag	Nombre	Descripción	
Factor de Ocupación	3,84E-02	3,84E-04			1	1,00E+00	3,84E-04	SIL 1	38	AHH	SIF-02	Alta alta presión diferencial la EDV-04003 y MOV-04001, con un nivel de integridad SIL=1.
	1,00E+00	1,00E-02			1	1,00E+00	1,00E-02	SIL 0	1			
	1,00E+00	1,00E-02			1	1,00E+00	1,00E-02	SIL 0	10			

Realizado por: Ojeda, 2017

#### 2.4.6 Desarrollo de las Hojas de Trabajo LOPA del Nodo 2

##### Cálculo de la Frecuencia del Evento Iniciante de la Causa 1

El valor de la frecuencia iniciante para la falla en la cerrada de la ESDV-04014 (Anexo K) asociadas al filtro F-0404 ha sido calculado a partir de valores adquiridos de la generación de la base de datos históricos de OCP (Anexo F), con las siguientes características:

#de\_fallas= 13

#de\_equipos= 32

#de\_años= 5

Empleando la Ecuación 3-1 para el cálculo de la frecuencia de evento iniciante, se obtiene el siguiente resultado:

$$yr = \frac{(\#de\_fallas)}{(\#de\_años)*(\#de\_equipos)}$$

$$yr = \frac{13}{(5)*(32)}$$

$$yr = 0,081250$$

La hoja de trabajo LOPA para ilustrar al nodo 2 y la causa 1 se ha desarrollado en la plantilla de Excel generada, la cual pertenece a la Tabla 38-2 y se puede identificar el SIL objetivo calculado:

**Tabla 38-2:** Hoja de trabajo LOPA Nodo 2- Causa 1

#Nodo-Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Salvaguarda	# Causa	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)				
2-1	Más Presión	Sobrepresion aguas arribas de la estación Páramo, con incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad ,mecánica de la misma y posible afectación del sistema de tubería	Personal	4	1,00E-04	1. Lazo de control PIC-04021. 2. PSV-04015 A/D. 3. ZSC-04014	1	Falla cerrada de la ESDV-04014	8,13E-02				
			Ambiente	1	1,00E-01								
			Activos	2	1,00E-02								
				0	1,00E+00								
Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar (or)	Capas Independientes de Protección (IPL)			Prob. de Eventos Intermedios (βr)	SIL (Objetivo)	FRR	SIF				
Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR				PFD	Tag	Nombre	Descripción	
Factor ocupación	4,20E-01	3,41E-02	PSV-04015 A/D			100	1,00E-02	3,41E-04	SIL 0	3			
	1,00E+00	8,13E-02	Lazo de control PIC-04021			10	1,00E-01	8,13E-03	SIL 0	0	NA	NA	NA
	1,00E+00	8,13E-02	ZSC-04014			10	1,00E-01	8,13E-03	SIL 0	1			

Realizado por: Ojeda, 2017

## Cálculo de la Frecuencia del Evento Iniciante de la Causa 2

El valor de la frecuencia iniciante para el bloqueo de la válvula manual de 32" VM-04014 ubicada aguas abajo de la trampa de envío L-0402 ha sido tomado de la tabla perteneciente al libro "Offshore Reliability Data" (OREDA, 2002, p. 618) (Anexo I) con las siguientes características:

VM-04001:

#de\_fallas= 4

#de\_equipos= 24

#de\_años= 5

Empleando la Ecuación 3-1 para el cálculo de la frecuencia de evento iniciante, se obtiene el siguiente resultado:

$$yr = \frac{(\#de\_fallas)}{(\#de\_años)*(\#de\_equipos)}$$

$$yr = \frac{4}{(5)*(24)}$$

$$yr = 0,033333$$

La hoja de trabajo LOPA para ilustrar al nodo 2 y la causa 2 se ha desarrollado en la plantilla de Excel generada, la cual pertenece a la Tabla 39-2 y se puede identificar el SIL objetivo calculado:

**Tabla 39-2:** Hoja de trabajo LOPA Nodo 2- Causa 2

#Nodo-Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Salvaguarda	# Causa	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)
2-2	Más Presión	Sobrepresion aguas arribas de la estación Páramo, con incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad ,mecánica de la misma y posible afectación del sistema de tubería	Personal	4	1,00E-04	1. Lazo de control PIC-04021.  2. PSV-04015 A/D.	1	Bloqueo de la válvula manual de 32" VM-04014 ubicada aguas abajo de la trampa de envío L-0402 a la salida de la estación Páramo	3,33E-02
			Ambiente	1	1,00E-01				
			Activos	1	1,00E-01				
				0	1,00E+00				

Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar ( <i>or</i> )	Capas Independientes de Protección (IPL)			Prob. de Eventos Intermedios ( <i>br</i> )	SIL (Objetivo)	FRR	SIF			
Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR				PFD	Tag	Nombre	Descripción
Factor ocupación	4,20E-01	1,40E-02		PSV-04015 A/D	100	1,00E-02	1,40E-04	SIL 0	1			
	1,00E+00	3,33E-02		Lazo de control PIC-04021.	10	1,00E-01	3,33E-03	SIL 0	0	NA	NA	NA
	1,00E+00	3,33E-02			1	1,00E+00	3,33E-02	SIL 0	0			

Realizado por: Ojeda, 2017



### **Cálculo de la Frecuencia del Evento Iniciante de la Causa 3**

El valor de la frecuencia iniciante de la falla espuria en la cerrada de las ESDV-04013/4 durante la operación de corrida del marrano de las ESDV-04013/14 durante la operación de corrida del marrano (Anexo K) ha sido calculado a partir de valores adquiridos de la generación de la base de datos históricos de OCP (Anexo F), con las siguientes características:

*ESDV-04014/3:*

#de\_fallas= 13

#de\_equipos= 32

#de\_años= 5

Empleando la *Ecuación 3-1 para el cálculo de la frecuencia de evento iniciante, se obtiene el siguiente resultado:*

$$yr = \frac{(\#de\_fallas)}{(\#de\_años)*(\#de\_equipos)}$$

$$yr = \frac{13}{(5)*(32)}$$

$$yr = 0,081250$$

La hoja de trabajo LOPA para ilustrar al nodo 2 y su causa 3 se ha desarrollado en la plantilla de Excel generada la cual pertenece a la Tabla 40-2 y se puede identificar el SIL objetivo calculado:

**Tabla 40-2:** Hoja de trabajo LOPA Nodo 2- Causa 3

#Nodo-Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Salvaguarda	# Causa	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)
2-3	Más Presión	Sin consecuencias considerables	Personal	4	1,00E-04	1. Lazo de control PIC-04021. 2. PSV-04015 A/D. 3. ZSC-04014	1	Falla espuria en la cerrada de las ESDV-04013/14 durante la operación de corrida del marrano	8,13E-02
			Ambiente	1	1,00E-01				
			Activos	2	1,00E-02				
				0	1,00E+00				

Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar ( <i>or</i> )	Capas Independientes de Protección (IPL)			Prob. de Eventos Intermedios ( <i>βr</i> )	SIL (Objetivo)	FRR	SIF			
Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR				PFD	Tag	Nombre	Descripción
Factor ocupación	1,10E-02	8,90E-04		PSV-04015 A/D	100	1,00E-02	8,90E-06	SIL 0	0	NA	NA	NA
	1,00E+00	8,13E-02		Lazo de control PIC-04021.	10	1,00E-01	8,13E-03	SIL 0	0			
	1,00E+00	8,13E-02		ZSC-04014	1	1,00E+00	8,13E-02	SIL 0	8			

Realizado por: Ojeda, 2017

#### **Cálculo de la Frecuencia del Evento Iniciante de la Causa 4**

El valor de la frecuencia iniciante por expansión térmica durante parada de Oleoducto ha sido tomado de un valor genérico a la industria (Anexo L).

$$yr=0,1$$

La hoja de trabajo LOPA para ilustrar al nodo 2 y la causa 4 se ha desarrollado en la plantilla de Excel generada, la cual pertenece a la Tabla 41-2 y se puede identificar el SIL objetivo calculado:

**Tabla 41-2:** Hoja de trabajo LOPA Nodo 2- Causa 4

#Nodo-Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Salvaguarda	# Causa	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)
2-4	Más Temperatura	Derrame de crudo ocasionando liberación de crudo al ambiente con potencial incendio y afectación a las personas	Personal	4	1,00E-04	1. PSV-04015 A/D.	1	Expansión térmica durante parada de Oleoducto	0,1
			Ambiente	1	1,00E-01				
			Activos	1	1,00E-01				
		0	1,00E+00						

Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar ( $\omega_r$ )	Capas Independientes de Protección (IPL)				Prob. de Eventos Intermedios ( $\beta_r$ )	SIL (Objetivo)	FRR	SIF		
Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR	PFD				Tag	Nombre	Descripción
Factor ocupación	2,74E-03	2,74E-04	PSV-04015 A/D		100	1,00E-02	2,74E-06	SIL 0	0	NA	NA	NA
	1,00E+00	1,00E-01			10	1,00E-01	1,00E-02	SIL 0	0			
	1,00E+00	1,00E-01			1	1,00E+00	1,00E-01	SIL 0	1			

Realizado por: Ojeda, 2017

### 2.4.7 Desarrollo de las Hojas de Trabajo LOPA del Nodo 3

#### Cálculo de la Frecuencia del Evento Iniciante de la Causa 1

El valor de la frecuencia iniciante para la falla ocasionada por bloqueo de la válvula manual de 16" de entrada de crudo al E-0401 ha sido tomado de la tabla perteneciente al libro "Offshore Reliability Data" (OREDA, 2002, p. 586) (Anexo I) con las siguientes características:

*Válvula manual de 16"*:

#de\_fallas= 10

#de\_equipos= 48

#de\_años= 5

Empleando la *Ecuación 3-1 para el cálculo de la frecuencia de evento iniciante, se obtiene el siguiente resultado:*

$$yr = \frac{(\#de\_fallas)}{(\#de\_años)*(\#de\_equipos)}$$

$$yr = \frac{10}{(5)*(48)}$$

$$yr = 0,041667$$

La hoja de trabajo LOPA para ilustrar al nodo 3 y la causa 1 se ha desarrollado en la plantilla de Excel generada, la cual pertenece a la Tabla 42-2 y se puede identificar el SIL objetivo calculado:

**Tabla 42-2:** Hoja de trabajo LOPA Nodo 3- Causa 1

#Nodo-Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Salvaguarda	# Causa	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)
3-1	Más Presión	Incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad, mecánica de la misma	Personal	2	1,00E-02	1. Lazo de control FIC-04661	1	Bloqueo de la válvula manual de 16" de entrada de crudo al E-0401	4,17E-02
			Ambiente	1	1,00E-01				
			Activos	2	1,00E-02				
				0	1,00E+00				

Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar (or)	Capas Independientes de Protección (IPL)			Prob. de Eventos Intermedios (βr)	SIL (Objetivo)	FRR	SIF			
Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR				PFD	Tag	Nombre	Descripción
Factor ocupación	5,83E-01	2,43E-02		Lazo de control FIC-04661	10	1,00E-01	2,43E-03	SIL 0	0	NA	NA	NA
	1,00E+00	4,17E-02				1,00E+00	4,17E-02	SIL 0	0			
	1,00E+00	4,17E-02				1,00E+00	4,17E-02	SIL 0	4			

Realizado por: Ojeda, 2017

## **Cálculo de la Frecuencia del Evento Iniciante de la Causa 2**

El valor de la frecuencia iniciante para la falla ocasionada por Bloqueo de la válvula manual de 16" de salida de crudo al E-0401 ha sido tomado de la tabla perteneciente al libro "Offshore Reliability Data" (OREDA, 2002, p. 586) (Anexo I) con las siguientes características:

*Válvula manual de 16":*

#de\_fallas= 10

#de\_equipos= 48

#de\_años= 5

Empleando la *Ecuación 3-1* para el cálculo de la frecuencia de evento iniciante, se obtiene el siguiente resultado:

$$yr = \frac{(\#de\_fallas)}{(\#de\_años)*(\#de\_equipos)}$$

$$yr = \frac{10}{(5)*(48)}$$

$$yr = 0,041667$$

La hoja de trabajo LOPA para ilustrar al nodo 3 y la causa 2 se ha desarrollado en la plantilla de Excel generada, la cual pertenece a la Tabla 43-2 y se puede identificar el SIL objetivo calculado:

**Tabla 43-2:** Hoja de trabajo LOPA Nodo 3- Causa 2

#Nodo-Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Salvaguarda	# Causa	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)
3-2	Más Presión	Incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad , mecánica de la misma	Personal	3	1,00E-03	1. Lazo de control FIC-04661	1	Bloqueo de la válvula manual de 16" de salida de crudo al E-0401	4,17E-02
			Ambiente	1	1,00E-01				
			Activos	2	1,00E-02				
				0	1,00E+00				

Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar (or)	Capas Independientes de Protección (IPL)				Prob. de Eventos Intermedios (βr)	SIL (Objetivo)	FRR	SIF		
Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR	PFD				Tag	Nombre	Descripción
Factor ocupación	5,83E-01	2,43E-02		Lazo de control FIC-04661	10	1,00E-01	2,43E-03	SIL 0	2	NA	NA	NA
	1,00E+00	4,17E-02				1,00E+00	4,17E-02	SIL 0	0			
	1,00E+00	4,17E-02				1,00E+00	4,17E-02	SIL 0	4			

Realizado por: Ojeda, 2017



### **Cálculo de la Frecuencia del Evento Iniciante de la Causa 3**

El valor de la frecuencia iniciante para falla de la FV-04661 (Anexo K) ha sido calculado a partir de valores adquiridos de la generación de la base de datos históricos de OCP (Anexo F), con las siguientes características:

*FV-04661:*

#de\_fallas= 2

#de\_equipos= 4

#de\_años= 5

Empleando la *Ecuación 3-1* para el cálculo de la frecuencia de evento iniciante, se obtiene el siguiente resultado:

$$yr = \frac{(\#de\_fallas)}{(\#de\_años)*(\#de\_equipos)}$$

$$yr = \frac{2}{(5)*(4)}$$

$$yr = 0,100000$$

La hoja de trabajo LOPA para ilustrar al nodo 3 y su causa 3 se ha desarrollado en la plantilla de Excel generada la cual pertenece a la Tabla 44-2 y se puede identificar el SIL objetivo calculado:

**Tabla 44-2:** Hoja de trabajo LOPA Nodo 3- Causa 3

#Nodo-Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Salvaguarda	# Causa	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)
3-3	Más Presión	Incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad , mecánica de la misma	Personal	4	1,00E-04	NA	1	Falla de la FV-04661	0,1
			Ambiente	1	1,00E-01				
			Activos	2	1,00E-02				
				0	1,00E+00				

Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar (ω)	Capas Independientes de Protección (IPL)				Prob. de Eventos Intermedios (β)	SIL (Objetivo)	FRR	SIF		
Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR	PFD				Tag	Nombre	Descripción
Factor ocupación	5,83E-01	5,83E-02			1	1,00E+00	5,83E-02	SIL 2	583	AHH	SIF-03	Alta alta presión medida a la entrada de crudo por el E-0401, causada por falla de la cerrada de la FV-04661, con un nivel de integridad SIL=2.
	1,00E+00	1,00E-01			1	1,00E+00	1,00E-01	SIL 0	1			
	1,00E+00	1,00E-01			1	1,00E+00	1,00E-01	SIL 0	10			

Realizado por: Ojeda, 2017

#### **Cálculo de la Frecuencia del Evento Iniciante de la Causa 4**

El valor de la frecuencia iniciante para la falla ocasionada por la apertura de la válvula manual de desvío del intercambiador E-0401 ha sido calculado a partir de valores adquiridos de la generación de la base de datos históricos de OCP (Anexo F), con las siguientes características:

*Válvula manual:*

#de\_fallas= 4

#de\_equipos= 27

#de\_años= 5

Empleando la *Ecuación 3-1* para el cálculo de la frecuencia de evento iniciante, se obtiene el siguiente resultado:

$$yr = \frac{(\#de\_fallas)}{(\#de\_años)*(\#de\_equipos)}$$

$$yr = \frac{4}{(5)*(27)}$$

$$yr = 0,029630$$

La hoja de trabajo LOPA para ilustrar al nodo 3 y la causa 4 se ha desarrollado en la plantilla de Excel generada, la cual pertenece a la Tabla 45-2 y se puede identificar el SIL objetivo calculado:

**Tabla 45-2:** Hoja de trabajo LOPA Nodo 3- Causa 4

#Nodo-Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Salvaguarda	# Causa	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)
3-4	Menos Temperatura	No se identificaron consecuencias relevantes en el proceso aún cuando pudiera afectarse la calidad del aceite térmico debido a la disminución de Temperatura	Personal	1	1,00E-01	NA	1	Apertura de la válvula manual de desvío del intercambiador E-0401	2,96E-02
			Ambiente	1	1,00E-01				
			Activos	1	1,00E-01				
			0	1,00E+00					

Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar ( $\omega$ )	Capas Independientes de Protección (IPL)				Prob. de Eventos Intermedios ( $\beta$ )	SIL (Objetivo)	FRR	SIF		
Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR	PFD				Tag	Nombre	Descripción
Factor ocupación	5,83E-01	1,73E-02			1	1,00E+00	1,73E-02	SIL 0	0			
	1,00E+00	2,96E-02			1	1,00E+00	2,96E-02	SIL 0	0			
	1,00E+00	2,96E-02			1	1,00E+00	2,96E-02	SIL 0	0			

Realizado por: Ojeda, 2017

#### 2.4.8 Desarrollo de las Hojas de Trabajo LOPA del Nodo 4

##### Cálculo de la Frecuencia del Evento Iniciante de la Causa 1

El valor de la frecuencia iniciante para la falla ocasionada Cierre de la Mov-04410 A/F (Anexo K) ha sido calculado a partir de valores adquiridos de la generación de la base de datos históricos de OCP (Anexo F), con las siguientes características:

*MOV-04410 A/F:*

#de\_fallas= 11

#de\_equipos= 44

#de\_años= 5

Empleando la *Ecuación 3-1* para el cálculo de la frecuencia de evento iniciante, se obtiene el siguiente resultado:

$$yr = \frac{(\#de\_fallas)}{(\#de\_años)*(\#de\_equipos)}$$

$$yr = \frac{11}{(5)*(44)}$$

$$yr = 0,050000$$

La hoja de trabajo LOPA para ilustrar al nodo 4 y la causa 1 se ha desarrollado en la plantilla de Excel generada, la cual pertenece a la Tabla 46-2 y se puede identificar el SIL objetivo calculado:

**Tabla 46-2:** Hoja de trabajo LOPA Nodo 4- Causa 1

#Nodo-Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Salvaguarda	# Causa	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)
4-1	Más Presión	Sobrepresion aguas arribas de la estación Páramo, con incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad ,mecánica de la misma y posible afectación del sistema de tubería	Personal	4	1,00E-04	1.Control de presión del PIC-04020  2.ZSC-04410	1	Cierre de la Mov-04410 A/F	5,00E-02
			Ambiente	1	1,00E-01				
			Activos	2	1,00E-02				
				0	1,00E+00				

Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar (or)	Capas Independientes de Protección (IPL)				Prob. de Eventos Intermedios (Br)	SIL (Objetivo)	FRR	SIF		
Descripción	Probabilidad	Tag	Descripción	FRR	PFD	Tag				Nombre	Descripción	
Factor de ocupación	4,20E-01	2,10E-02		Control de presión del PIC-04020	10	1,00E-01	2,098E-03	SIL 1	21	ALL	SIF-04	Baja baja presión, mandando a cerrar la ESDV-04004, con un nivel de integridad SIL=1.
	1,00E+00	5,00E-02		ZSC-04410	10	1,00E-01	5,000E-03	SIL 0	0			
	1,00E+00	5,00E-02			1	1,00E+00	5,000E-02	SIL 0	5			

Realizado por: Ojeda, 2017

## **Cálculo de la Frecuencia del Evento Iniciante de la Causa 2**

El valor de la frecuencia iniciante taponamiento del filtro cono de bruja de succión de la bomba P-0401 A/F ha sido tomado de un valor usando la experiencia de OCP.

$$yr=0,1$$

La hoja de trabajo LOPA para ilustrar al nodo 4 y la causa 2 se ha desarrollado en la plantilla de Excel generada, la cual pertenece a la Tabla 47-2 y se puede identificar el SIL objetivo calculado:

**Tabla 47-2:** Hoja de trabajo LOPA Nodo 4- Causa 2

#Nodo-Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Salvaguarda	# Causa	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)
4-2	Más Presión	Sobrepresión aguas arriba de la estación Páramo, con incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad mecánica de la misma y posible afectación del sistema de tubería	Personal	4	1,00E-04	1. Control de presión del PIC-04020. 2. Plan de mantenimiento	1	Taponamiento del filtro cono de bruja de succión de la bomba P-0401 A/F	0,1
			Ambiente	1	1,00E-01				
			Activos	2	1,00E-02				
				0	1,00E+00				

Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin	Capas Independientes de Protección (IPL)				Prob. de Eventos Intermedios ( $\beta$ r)	SIL	FRR	SIF		
Descripción	Probabilidad	Mitigar ( $\omega$ r)	Tag	Descripción	FRR	PFD			Tag	Nombre	Descripción	
Factor ocupación	4,20E-01	4,20E-02		Control de presión del PIC-04020.	10	1,00E-01	4,20E-03	SIL 1	42	ALL	SIF-04	Baja baja presión, mandando a cerrar la ESDV-04004, con un nivel de integridad SIL=1.
	1,00E+00	1,00E-01			1	1,00E+00	1,00E-01	SIL 0	1			
	1,00E+00	1,00E-01			1	1,00E+00	1,00E-01	SIL 0	10			

Realizado por: Ojeda, 2017



### **Cálculo de la Frecuencia del Evento Iniciante de la Causa 3**

El valor de la frecuencia iniciante para una parada de la bomba P-0401 A/F (Anexo K) ha sido calculado a partir de valores adquiridos de la generación de la base de datos históricos de OCP (Anexo F), con las siguientes características:

*P-0401 A/F:*

#de\_fallas= 6

#de\_equipos= 22

#de\_años= 5

Empleando la *Ecuación 3-1* para el cálculo de la frecuencia de evento iniciante, se obtiene el siguiente resultado:

$$yr = \frac{(\#de\_fallas)}{(\#de\_años)*(\#de\_equipos)}$$

$$yr = \frac{6}{(5)*(22)}$$

$$yr = 0,054545$$

La hoja de trabajo LOPA para ilustrar al nodo 4 y la causa 3 se ha desarrollado en la plantilla de Excel generada, la cual pertenece a la Tabla 47-2 y se puede identificar el SIL objetivo calculado:

**Tabla 48-2:** Hoja de trabajo LOPA Nodo 4- Causa 3

#Nodo-Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Salvaguarda	# Causa	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)
4-3	Más Presión	Incremento de la presión aguas arriba de la bomba con afectación de la estaciones de Sardinas, Cayagama y Amazonas	Personal	4	1,00E-04	1.Monitorio constante de las presiones del oleoduto.	1	Parada de la bomba P-0401 A/F	0,054545
			Ambiente	1	1,00E-01				
			Activos	2	1,00E-02				
		0	1,00E+00						
	No Flujo	Corte en la tranferencia del fluido a través del oleoducto de OCP hacia el terminal Marítimo.	Personal	1	1,00E-01	1. FT-04410 con alarma por bajo flujo y muy bajo flujo y enclavamiento para las bombas.			
			Ambiente	1	1,00E-01				
Activos			2	1,00E-02					
	0	1,00E+00							

Tabla 48-2

Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar (or)	Capas Independientes de Protección (IPL)				Prob. de Eventos Intermedios (βr)	SIL (Objetivo)	FRR	SIF		
Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR	PFD				Tag	Nombre	Descripción
Factor ocupación	4,20E-01	2,29E-02		PSV-03015	100	1,00E-02	2,29E-04	SIL 0	2			
	1,00E+00	5,45E-02			1	1,00E+00	5,45E-02	SIL 0	1	NA	NA	NA
	1,00E+00	5,45E-02			1	1,00E+00	5,45E-02	SIL 0	5			
	1,00E+00	5,45E-02		FT-04410 con alarma por bajo flujo y muy bajo flujo y enclavamiento para las bombas	10	1,00E-01	5,45E-03	SIL 0	0			
	1,00E+00	5,45E-02			1	1,00E+00	5,45E-02	SIL 0	1	NA	NA	NA
	1,00E+00	5,45E-02			1	1,00E+00	5,45E-02	SIL 0	5			

Realizado por: Ojeda, 2017

#### **Cálculo de la Frecuencia del Evento Iniciante de la Causa 4**

El valor de la frecuencia iniciante para la falla ocasionada por el cierre de la Mov-04415 A/F (Anexo K) ha sido calculado a partir de valores adquiridos de la generación de la base de datos históricos de OCP (Anexo F), con las siguientes características:

*MOV-04415 A/F:*

#de\_fallas= 11

#de\_equipos= 44

#de\_años= 5

Empleando la *Ecuación 3-1* para el cálculo de la frecuencia de evento iniciante, se obtiene el siguiente resultado:

$$yr = \frac{(\#de\_fallas)}{(\#de\_años)*(\#de\_equipos)}$$

$$yr = \frac{11}{(5)*(44)}$$

$$yr = 0,050000$$

La hoja de trabajo LOPA para ilustrar al nodo 4 y la causa 4 se ha desarrollado en la plantilla de Excel generada, la cual pertenece a la Tabla 49-2 y se puede identificar el SIL objetivo calculado:

**Tabla 49-2:** Hoja de trabajo LOPA Nodo 4- Causa 4

#Nodo-Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Salvaguarda	# Causa	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)
4-4	Más Presión	Incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0401A con posible afectación de la integridad , mecánica de la misma	Personal	4	1,00E-04	1. PT-04415 A con alarma de alta y muy alta presión de descarga y enclavamiento apra la bomba. 2. ZCS-04415A/F	1	Cierre de la Mov-04415 A/F	5,00E-02
			Ambiente	1	1,00E-01				
			Activos	1	1,00E-01				
				0	1,00E+00				
	Más Presión	Incremento de la presión aguas arriba de la bomba con afectación de la estaciones de Paramo, Sardinas, Cayagama y Amazonas	Personal	4	1,00E-04	1. PSV-4417A y PSV-4418A 2. ZCS-04415A/F			
			Ambiente	1	1,00E-01				
			Activos	2	1,00E-02				
				0	1,00E+00				
	No Flujo	Corte en la tranferencia del fluido a través del oleoducto de OCP hacia el terminal Marítimo	Personal	1	1,00E-01	1. Protecciones asociadas a las estaciones de rebombeo de agua 2. Protecciones asociadas al oleoducto de Perenco 3. ZCS-04415A/F			
			Ambiente	1	1,00E-01				
Activos			2	1,00E-02					
			0	1,00E+00					

**Tabla 49-2**

Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar (or)	Capas Independientes de Protección (IPL)				Prob. de Eventos Intermedios (βr)	SIL (Objetivo)	FRR	SIF		
Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR	PFD				Tag	Nombre	Descripción
Factor de ocupación	4,20E-01	2,10E-02		PT-04415 A con alarma de alta y muy alta presión de descarga y enclavamiento apra la bomba.	10	1,00E-01	2,10E-03	SIL 1	21	AHH	SIF-04	Alta alta presión medida, mandando a cerrar la ESDV-04004, con un nivel de integridad SIL=1.
	1,00E+00	5,00E-02		ZCS-04415A/F.	10	1,00E-01	5,00E-03	SIL 0	0			
	1,00E+00	5,00E-02			1	1,00E+00	5,00E-02	SIL 0	1			
	1,00E+00	5,00E-02		PSV-4417A y PSV-4418A.	10	1,00E-01	5,00E-03	SIL 1	50			
	1,00E+00	5,00E-02		ZCS-04415A/F.	10	1,00E-01	5,00E-03	SIL 0	0			
	1,00E+00	5,00E-02			1	1,00E+00	5,00E-02	SIL 0	5			
	1,00E+00	5,00E-02		ZCS-04415A/F.	10	1,00E-01	5,00E-03	SIL 0	0			
	1,00E+00	5,00E-02			1	1,00E+00	5,00E-02	SIL 0	1			
	1,00E+00	5,00E-02			1	1,00E+00	5,00E-02	SIL 0	5			

Realizado por: Ojeda, 2017

### **Cálculo de la Frecuencia del Evento Iniciante de la Causa 5**

El valor de la frecuencia iniciante para la falla ocasionada por la apertura de la Mov-04414 A/F (Anexo K) ha sido calculado a partir de valores adquiridos de la generación de la base de datos históricos de OCP (Anexo F), con las siguientes características:

*MOV-04414 A/F:*

#de\_fallas= 1

#de\_equipos= 22

#de\_años= 5

Empleando la *Ecuación 3-1* para el cálculo de la frecuencia de evento iniciante, se obtiene el siguiente resultado:

$$yr = \frac{(\#de\_fallas)}{(\#de\_años)*(\#de\_equipos)}$$

$$yr = \frac{1}{(5)*(22)}$$

$$yr = 0,009091$$

La hoja de trabajo LOPA para ilustrar al nodo 4 y la causa 5 se ha desarrollado en la plantilla de Excel generada, la cual pertenece a la Tabla 49-2 y se puede identificar el SIL objetivo calculado:

**Tabla 50-2:** Hoja de trabajo LOPA Nodo 4- Causa 5

#Nodo-Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Salvaguarda	# Causa	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)
4-5	Más Presión	Recirculación continua de las bombas P-0401 A/F con incremento de presión	Personal	2	1,00E-02	1. PT-04415 con alarma por alta presión y muy alta presión y enclavamiento para las bombas.	1	Apertura de la Mov-04414 A/F	9,09E-03
			Ambiente	1	1,00E-01				
			Activos	1	1,00E-01				
				0	1,00E+00				
	Más Presión	Incremento de presión aguas arriba de la bomba con afectaciones de las estaciones Páramo, Sardinas, Cayagama y Amazonas	Personal	2	1,00E-02	-			
			Ambiente	1	1,00E-01				
			Activos	1	1,00E-01				
				0	1,00E+00				
	No Flujo	Corte en la tranferencia del fluido a través del oleoducto de OCP hacia el terminal Marítimo	Personal	1	1,00E-01	1.FT-04410 con alarma por alto flujo y muy alto flujo y enclavamiento para las bombas.			
			Ambiente	1	1,00E-01				
			Activos	1	1,00E-01				
				0	1,00E+00				



**Tabla 50-2:**

Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar (or)	Capas Independientes de Protección (IPL)			Prob. de Eventos Intermedios (br)	SIL (Objetivo)	FRR	SIF		
Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR				PFD	Tag	Nombre
Factor de ocupación	1,00E+00	9,09E-03	PT-04415 A con alarma de alta y muy alta presión de descarga y enclavamiento para la bomba	10	1,00E-01	9,09E-04	SIL 0	0	NA	NA	NA
	1	9,09E-03	ZCS-04415A/F	10	1,00E-01	9,09E-04	SIL 0	0			
	1	9,09E-03		1	1,00E+00	9,09E-03	SIL 0	0			
	1,00E+00	9,09E-03	PSV-4417A y PSV-4418A	10	1,00E-01	9,09E-04	SIL 0	0	NA	NA	NA
	1	9,09E-03	ZCS-04415A/F	10	1,00E-01	9,09E-04	SIL 0	0			
	1	9,09E-03		1	1,00E+00	9,09E-03	SIL 0	0			
	1,00E+00	9,09E-03	ZCS-04415A/F	10	1,00E-01	9,09E-04	SIL 0	0	NA	NA	NA
	1	9,09E-03		1	1,00E+00	9,09E-03	SIL 0	0			
	1	9,09E-03		1	1,00E+00	9,09E-03	SIL 0	0			

Realizado por: Ojeda, 2017

## **2.4.9 Desarrollo de las Hojas de Trabajo LOPA del Nodo5**

### *2.4.9.1 Cálculo de la Frecuencia del Evento Iniciante de la Causa 1*

El valor de la frecuencia iniciante por una falla en la reinyección de crudo a la línea de salida del Tk-0413 por medio de las bombas P-0411A/B cuando la presión del ducto es superior a la descarga de dichas bombas ha sido tomado de un valor genérico a la industria (Anexo L).

$$yr=0,1$$

La hoja de trabajo LOPA para ilustrar al nodo 5 y la causa 1 se ha desarrollado en la plantilla de Excel generada, la cual pertenece a la Tabla 51-2 y se puede identificar el SIL objetivo calculado:

**Tabla 51-2:** Hoja de trabajo LOPA Nodo 5- Causa 1

#Nodo-Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Salvaguarda	# Causa	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)
5-1	Más Presión	Daño de las bombas P-0411 A/B(elementos internos de la bomba).	Personal	1	1,00E-01	1. Bomba de respaldo.  2. PSV-04115 A/B  3. Facilidad v	1	Reiny ección de crudo a la línea de salida del Tk-0413 por medio de las bombas P-0411A/B cuando la presión del ducto es superior a la descarga de dichas bombas	1,00E-01
			Ambiente	1	1,00E-01				
			Activos	1	1,00E-01				
				0	1,00E+00				

Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar (or)	Capas Independientes de Protección (IPL)				Prob. de Eventos Intermedios (βr)	SIL (Objetivo)	FRR	SIF		
Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR	PFD				Tag	Nombre	Descripción
	1,00E+00	1,00E-01		PSV-04115 A/B	100	1,00E-02	1,000E-03	SIL 0	0			
	1,00E+00	1,00E-01			1	1,00E+00	1,000E-01	SIL 0	1	NA	NA	NA
	1,00E+00	1,00E-01			1	1,00E+00	1,000E-01	SIL 0	1			

Realizado por: Ojeda, 2017

## Cálculo de la Frecuencia del Evento Iniciante de la Causa 2

El valor de la frecuencia iniciante para la falla ocasionada Filtros F-04013 A/B taponados (Anexo K) ha sido calculado a partir de valores adquiridos de la generación de la base de datos históricos de OCP (Anexo F), con las siguientes características:

*F-04013 A/B:*

#de\_fallas= 3

#de\_equipos= 16

#de\_años= 5

Empleando la *Ecuación 3-1* para el cálculo de la frecuencia de evento iniciante, se obtiene el siguiente resultado:

$$yr = \frac{(\#de\_fallas)}{(\#de\_años)*(\#de\_equipos)}$$

$$yr = \frac{3}{(5)*(16)}$$

$$yr = 0,037500$$

La hoja de trabajo LOPA para ilustrar al nodo 5 y la causa 2 se ha desarrollado en la plantilla de Excel generada, la cual pertenece a la Tabla 52-2 y se puede identificar el SIL objetivo calculado:

**Tabla 52-2:** Hoja de trabajo LOPA Nodo 5- Causa 2

#Nodo-Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Salvaguarda	# Causa	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)
5-2	Menos Presión	Daño total de las bombas P-0411 A/B	Personal	1	1,00E-01	1. PDIT-04109 alarma por presión alta diferencial  2. Procedimiento operativo para reinyección de crudo al ducto	1	Filtros F-04013 A/B taponados	3,75E-02
			Ambiente	1	1,00E-01				
			Activos	2	1,00E-02				
				0	1,00E+00				

Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar (or)	Capas Independientes de Protección (IPL)				Prob. de Eventos Intermedios (βr)	SIL (Objetivo)	FRR	SIF		
Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR	PFD				Tag	Nombre	Descripción
	1,00E+00	3,75E-02		PDIT-04109 alarma por presión alta diferencial	10	1,00E-01	3,75E-03	SIL 0	0	NA	NA	NA
	1,00E+00	3,75E-02			1	1,00E+00	3,75E-02	SIL 0	0			
	1,00E+00	3,75E-02			1	1,00E+00	3,75E-02	SIL 0	4			

Realizado por: Ojeda, 2017

### **Cálculo de la Frecuencia del Evento Iniciante de la Causa 3**

El valor de la frecuencia iniciante por alivio de PSV-04015 A/D por más de 35 minutos ha sido tomado de un valor genérico a la industria (Anexo L).

$$yr=0,01$$

La hoja de trabajo LOPA para ilustrar al nodo 5 y la causa 3 se ha desarrollado en la plantilla de Excel generada, la cual pertenece a la Tabla 53-2 y se puede identificar el SIL objetivo calculado:

**Tabla 53-2:** Hoja de trabajo LOPA Nodo 5- Causa 3

#Nodo-Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Salvaguarda	# Causa	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)
5-3	Más Nivel	Sobrellenado del tanque de alivio TK-0413 con potencial derrame y contaminación ambiental	Personal	4	1,00E-04	1. Dique de contención  2. Alarma de nivel muy alto por el LAHH-04112 + acción del operador	1	Alivio de PSV-04015 A/D por mas de 35 minutos	0,01
			Ambiente	2	1,00E-02				
			Activos	2	1,00E-02				
				0	1,00E+00				

Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar (σ)	Capas Independientes de Protección (IPL)			Prob. de Eventos Intermedios (Br)	SIL (Objetivo)	FRR	Recomendación
Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR				
	1,00E+00	1,00E-02		Alarma de nivel muy alto por el LAHH-04112 + acción del operador	10	1,00E-01	1,00E-03	SIL 0	Transferir la señal del LALL-04112 y LAHH-04112 al Sistema instrumentado de seguridad con el objetivo de que genere una alarma para que el operador tome la decisión de arrancar o apagar las bombas P-0411
	1,00E+00	1,00E-02		Dique de contención.	100	1,00E-02	1,00E-04	SIL 0	
	1,00E+00	1,00E-02			10	1,00E-01	1,00E-03	SIL 0	

Realizado por: Ojeda, 2017

#### **Cálculo de la Frecuencia del Evento Iniciante de la Causa 4**

El valor de la frecuencia iniciante por falla del sistema de control de nivel LIT-04110 al no apagar las bombas P-0411 A/B cuando existe menos nivel ha sido tomado de un valor genérico a la industria (Anexo L).

$$yr=0,1$$

La hoja de trabajo LOPA para ilustrar al nodo 5 y la causa 4 se ha desarrollado en la plantilla de Excel generada, la cual pertenece a la Tabla 54-2 y se puede identificar el SIL objetivo calculado:



**Tabla 54-2:** Hoja de trabajo LOPA Nodo 5- Causa 4

#Nodo-Causa	Desviación	Consecuencia	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Salvaguarda	# Causa	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)
5-4	Menos Nivel	Daño total de las bombas P-0411 A/B	Personal	1	1,00E-01	1. Procedimiento operativo para reinyección de crudo  2. Bomba de respaldo  3. Dique	1	Falla del sistema de control de nivel LIT-04110 al no apagar las bombas P-0411 A/B cuando existe menos nivel	0,1
			Ambiente	1	1,00E-01				
			Activos	2	1,00E-02				
				0	1,00E+00				

Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar (or)	Capas Independientes de Protección (IPL)			Prob. de Eventos Intermedios (βr)	SIL (Objetivo)	FRR	Recomendación
Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR	PFD			
	1,00E+00	1,00E-01		Dique	100	1,00E-02	1,00E-03	SIL 0	0
	1,00E+00	1,00E-01			1	1,00E+00	1,00E-01	SIL 0	1
	1,00E+00	1,00E-01			1	1,00E+00	1,00E-01	SIL 0	10

Realizado por: Ojeda, 2017

#### 2.4.10 Desarrollo de las Hojas de Trabajo LOPA del Nodo 6

Al no identificar causas específicas a las desviaciones en el análisis de peligros y operatividad (HAZOP) y que en modo de operación normal de la estación “Páramo” se encuentra apagado el H-0401, se ha desestimado el desarrollo de las hojas de trabajo LOPA para el nodo 6 “Horno”.

#### 2.5 Localización de las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF)

Posteriormente al análisis de capas de protección (LOPA) implementado en los nodos de la estación de bombeo “Páramo” se ha identificado la localización de las funciones instrumentadas de seguridad (SIF) que son necesarias en PS-4 como se divisa en la Tabla 55-2.

**Tabla 55-2:** Localización de las Funciones Instrumentadas de Seguridad

LOCALIZACIÓN		Recomendación
# Nodo	# Causa	
1	3	SIF-01: Diseñar
1	7	SIF-02: Diseñar
3	3	SIF-03: Diseñar
4	1	SIF-04: Diseñar
	2	
	4	
5	3	Transferir la señal del LALL-04112 y LAHH-04112 al Sistema instrumentado de seguridad (SIS).
	4	

**Realizado por:** Ojeda, 2017

En la Tabla 56-2, Tabla 57-2, Tabla 58-2, Tabla 59-2 y Tabla 60-2 se particulariza a cada función instrumentada de seguridad (SIF) localizada en el desarrollo del Análisis de Capas de Protección (LOPA).

**Tabla 56-2:** Referencia de la SIF-01

#SIF	#Nodo #Causa	Desviación	Causa	Consecuencia	Aplicación funcional	SIL (objetivo)	FFR
01	1-3	Más Presión	Taponamiento del Filtro F-0404	Sobrepresión aguas arriba de la estación Páramo, con incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad ,mecánica de la misma y posible afectación del sistema de tubería	Diseñar una SIF que detecte una alta alta presión medida a la entrada de la estación Páramo, causando el cierre de la estación, con un nivel de integridad SIL=1	SIL 1	>=86

Realizado por: Ojeda, 2017

**Tabla 57-2:** Referencia de la SIF-02

#SIF	#Nodo #Causa	Desviación	Causa	Consecuencia	Aplicación funcional	SIL (objetivo)	FFR
02	1-7	Más Presión	Error operativo al ecualizar las presiones durante la preparación de la trampa R-0401 para recibir marrano	Daño mecánico a la trampa de recibo ocasionando liberación de crudo al ambiente con potencial incendio y afectación a las personas	Diseñar una SIF que detecte una alta alta presión diferencial entre la entrada de la estación PS-4 y la salida de la trampa de receptor R-0401, desenergizando en panel manual de apertura de la EDV-04003 y MOV-04001, con un nivel de integridad SIL=1	SIL 1	>=38

Realizado por: Ojeda, 2017

**Tabla 58-2:** Referencia de la SIF-03

#SIF	#Nodo #Causa	Desviación	Causa	Consecuencia	Aplicación funcional	SIL (objetivo)	FFR
03	3-3	Más Presión	Falla de cierre de la FV-04661	Sobrepresión aguas arriba de la estación Páramo, con incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A/F con posible afectación de la integridad ,mecánica de la misma y posible afectación del sistema de tubería	Diseñar SIF para alto alto caudal y alta alta presión a la entrada de crudo al E-0401 causando la apertura de una válvula, con un nivel de integridad SIL=2.	SIL 2	>=583

Realizado por: Ojeda, 2017

**Tabla 59-2:** Referencia de la SIF-04

#SIF	#Nodo #Causa	Desviación	Causa	Consecuencia	Aplicación funcional	SIL (objetivo)	FFR
04	4-1	Más Presión	Cierre de la Mov-04410 A/F	Incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad , mecánica de la misma	Diseñar SIF que detecte una baja baja o alta alta presión aguas abajo del filtro cono bruja y aguas arriba de la MOV-04415, causando el cierre de la estación, con un nivel de integridad SIL=1	SIL 1	>=50
	4-2	Más Presión	Taponamiento del filtro cono de bruja de succión de la bomba P-0401 A/F	Sobrepresion aguas arribas de la estación Páramo, con incremento de la presión en la descarga de la bomba P-0301A con posible afectación de la integridad ,mecánica de la misma y posible afectación del sistema de tubería			
	4-4	Más Presión	Cierre de la Mov-04415 A/F	Incremento de la presión aguas arriba de la bomba con afectación de la estaciones de Paramo, Sardinas, Cayagama y Amazonas			

Realizado por: Ojeda, 2017

**Tabla 60-2:** Referencia de la Recomendación

#Nodo #Causa	Desviación	Causa	Consecuencia	Recomendación
5-3	Más Nivel	Alivio de PSV-04015 A/D por mas de 35 minutos.	Sobrellenado del tanque de alivio TK-0413 con potencial derrame y contaminación ambiental.	Transferir la señal del LALL-04112 y LAHH-04112 al Sistema instrumentado de seguridad con el objetivo de que genere una alarma para que el operador tome la decisión de arrancar o apagar las bombas P-0411.
5-4	Menos Nivel	Falla del sistema de control de nivel LIT-04110 al no apagar las bombas P-0411 A/B cuando existe menos nivel.	Daño total de las bombas P-0411 A/B.	

Realizado por: Ojeda, 2017

## **2.6 Diseño de las Especificaciones de Requerimientos de Seguridad (SRS)**

Con la finalidad de mantener una estandarización en el Sistema Básico de Control de Procesos (BPCS) y en los Sistemas Instrumentados de Seguridad (SIS) de la empresa Oleoducto de Crudos Pesados (OCP) se ha adoptado la filosofía señalada en el estándar IEC: 61511 para el desarrollo de especificaciones de requerimientos de seguridad, al igual que exigencias detallados por OCP y TECNIEQUIPOS (2016b, pp.13-26).

### **2.6.1 Elaboración de los Requerimientos Generales del SIS**

- **Definición del proceso**

La Estación Páramo de OCP ubicada en KP 185+900 a 2863 m.s.n.m. tiene como propósito principal el aumento de presión en el transporte de crudo para poder superar la mayor elevación del oleoducto en la “Sierra de la Virgen” a 4062 m.s.n.m, KP 201+209.

El proceso analizado en general hace referencia a la recepción y transferencia de crudo pesado hacia la estación reductora “Chiquilpe”, en dicho proceso se encuentra involucrado las bombas de crudo combustible que son el elemento principal para el funcionamiento de la estación, un intercambiador de calor de aceite térmico, un tanque de alivio y el recibidor/lanzador como sistemas de mayor relevancia para mantener movimiento en oleoducto.

Ya que el sistema de bombeo que se realiza en la estación “Páramo” posee un BPCS y monitoreo constante por parte del personal de operaciones de la planta, la acción del Sistema instrumentado de seguridad no deberá causar conflicto con los mismos, por lo que el diseño deberá tener en cuenta los parámetros adecuados para que el SIS y el BPCS trabajen de manera contigua y coherente:

- **Peligros generados al llevar el proceso a su estado seguro**

En el diseño de las diferentes funciones instrumentadas de seguridad se deberá tomar las acciones necesarias para minimizar los disparos espurios de la SIF que conlleven a generar desviaciones peligrosas en el proceso de aumento de presión.

- **Tasa de fallos en falso (MTTFs)**

Cada una de las SIF deberá ser diseñada de tal manera que su tasa de fallo en falso no sea menor a 5 años.

- **Modo de operación**

El diseño de las funciones instrumentadas de seguridad deberá ser de tal manera que respondan a un modo de operación bajo demanda no mayor a una petición por año y una frecuencia de prueba no mayor a 2 veces por año.

- **Modo de protección**

Todas las funciones instrumentadas de seguridad deberán ser diseñadas de tal manera que el actuador que lleva al proceso al estado seguro, sea llevado a cabo al Remover la Energía Eléctrica (DE-T-T) del elemento final o Energizar Para Disparar (E-T-T) el cual mejor encaje para llevar a estado seguro al proceso.

- **Shutdown manual**

En PS-4 se deberá integrar un botón de Shutdown manual en el SPLC de seguridad que deberá ser provista en el cuarto de control de la estación para iniciar de manera manual un paro general de la estación de bombeo “Páramo”.

- **Condiciones ambientales**

Se deberá tomar en cuenta las condiciones en las que opera la estación de bombeo PS-4 en variables como temperatura, humedad, contaminantes, interferencias electromagnéticas, vibraciones, descarga electrostática e inundación.

**Otros requerimientos esenciales de seguridad para PS-4 son los siguientes:**

- Las funciones instrumentadas de seguridad deben ser lo más simples posibles.
- Utilización de instrumentación que cumplan con las normativas de certificación adecuada y de preferencias que estén aprobados en la compañía, utilizando la lista de componentes estándar implementados en la empresa.
- Se sugiere manejar dispositivos o arquitecturas ya aprobadas previamente, llamados “típicos” para lograr el SIL objetivo.
- El SPLC (PLC de seguridad) puede ser elegido siempre y cuando éste tenga aprobación y certificación de organizaciones ajenas a la empresa. (eje.TUV, HSE, etc.)
- Las alarmas a ser ejecutas por el SIS deben ser diferentes a las que pertenecen al sistemas básico de control de proceso de PS-4.

- Se recomienda para minimizar la probabilidad de fallos de causa común, modo común y fallos dependientes del sistema tomar en cuenta los siguientes aspectos:
  - ✓ Independencias entre el DCS y el SIS.
  - ✓ Uso de diferente instrumentación.
  - ✓ Independencia entre canales.
- El SIS de PS-4 deberá ser diseñado, construido e instalado adecuadamente para operar bajo las condiciones ambientales especificadas de la estación “Chiquilpe”.

### **2.6.2 *Elaboración de los Requerimientos de Software e Interfaces***

Todos los requisitos de configuración y programación deberán seguir lo descrito según el manual de seguridad del PLC con el que se vaya a realizar la implementación, el cual deberá contar por lo menos con certificado de aptitud SIL 2 de acuerdo a IEC 61508, ya que con este nivel se cubre el SIL objetivo más alto encontrado en el análisis LOPA en las distintas Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF) de la estación PS-4 de OCP. Se debe tener en cuenta que en el software se requiere realizar las siguientes acciones:

- El software se diseñara de tal manera que sea orientado a utilidad por lo que deberá contar con una alta resolución de problemas y diagnóstico de fallas de cada uno de los dispositivos inteligentes pertenecientes al Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) capaces de mantener su integridad.
- Uso de los bloques funcionales certificados bajo IEC 61508.
- El lenguaje de programación hacer utilizado es un Lenguaje de Variabilidad Limitada (LVL), se recomienda usar Lógica de Escalera (Logic Ladder) por su facilidad de implementación y comprensión para el usuario además que es apto para alcanzar hasta un nivel de integridad SIL 3.
- Seguridad de acceso para las herramientas de configuración/programación dependiendo el nivel de usuario que se detalla a continuación:
  - Nivel de ingeniería: Acceso privilegiado en el cual se puede realizar modificaciones a los valores de consigas de puntos de disparo de las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIFs), sobreescritura de señales sobre el Sistema Básico de Control de Procesos (BPCS), Bypass para mantenimiento y a su vez podrá disponer de las herramientas de software para la creación, modificación, administración y documentación del Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS).

- Nivel de operador: Acceso restringido específicamente para operación, en el cual no se podrá generar ninguno tipo de modificación al Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS), ya que el programa de aplicación solo mostrara el valor medido por los elementos de detección y el estado de los actuadores que pertenecen a cada una de las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF).
- Tiempos de ciclo que permita cumplir con los requisitos de desempeño de las SIF.
- Ser probado funcionalmente según se describe en los requisitos específicos de cada SIF.

Las interfaces para los diferentes niveles de usuario deben tener las siguientes funcionalidades con motivo de mantener una integridad alta del mismo:

- Una interfaz bidireccional que permita el intercambio de los datos necesarios como son variables de proceso, pre alarmas estado final del elemento, activación de by pass de mantenimiento, alarmas de diagnóstico, entre otras, que el BPCS y el SIS demanden para su idóneo funcionamiento, a sí mismo deberá tener cableado redundante para extender la disponibilidad.
- El SIS exportara al BPCS la información necesaria para mantener el SIL adquirido, entre la cual se encuentra: variables de proceso, indicaciones de disparo y pre alarma, estado del elemento final, activación de by pass de mantenimiento, alarmas de diagnóstico (incluida falla en fuente de alimentación), alarmas de disparo, entre otras.
- Los comandos de escritura del BPCS al SIS se limitan a by pass de mantenimiento, reset o rearme de la lógica después de un disparo, by pass durante puesta en marcha y otros similares.
- Los sistemas de detección (entradas) que disparan el proceso deberán activar una pre alarma para que el operador pueda realizar acciones correctivas ante las desviación atípica del proceso.
- La falla en la interfaz de comunicación entre el SIS y BPCS debe conservar la capacidad de llevar el proceso a un estado seguro.



### **2.6.3 *Elaboración de Requerimientos del Procesador Lógico de Seguridad (SPLC)***

En el evento de alguna falla parcial o completa del SIS, las siguientes previsiones deberán de ser tomadas en cuenta:

- Se debe desarrollar un programa continuo de diagnóstico que deberá detectar las discrepancias y deberá tomar acción oportuna (disparo de la función en falla o del Sistema Instrumentado de Seguridad en su totalidad).
- En caso de falla del sistema, las salidas serán forzadas para llevar el proceso a su estado seguro, y deberá activarse una alarma para alertar al operador.
- El PLC de seguridad deberá ser diferente al PLC designado para el control básico de proceso para evitar cualquier tipo falla común que provenga de fábrica.

El programa desarrollado para el Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) debe tener asignados niveles de acceso y privilegios con contraseñas, para así poder restringir el ingreso de personal no autorizado que pueda modificar variables de entrada, salida, resets, etc.

### **2.6.4 *Elaboración de los Requerimientos de Sensores y Actuadores***

En relación a este tipo de dispositivos serán elegidos para que operen en niveles ambientales y rangos operativos de la estación PS-4:

#### **Instalación e Instrumentación:**

- Los instrumentos deberán ser seleccionados e instalados con las respectivas conciliaciones para evitar errores de medición debido a factores ambientales o condiciones derivas del proceso.
- Las siguientes condiciones deberán ser tomadas en cuenta para el seleccionamiento de la instrumentación:
  - ✓ Máxima y mínima temperatura y presión de proceso
  - ✓ Condiciones ambientales agrestes o inusuales o efectos producto de vibraciones.
  - ✓ Requerimientos para pruebas de mantenimiento en línea.
  - ✓ Requerimientos de tiempos de respuestas de sensores y elementos finales.
  - ✓ Facilidad para el personal de operaciones y mantenimiento.

## Sensores:

- Independencia entre la instrumentación del BPCS y el SIS.
- El uso de multiplexores o transmisores de entrada múltiple no están permitidos para el uso de aplicaciones SIS.
- Los transmisores deberán estar acordes al estándar NAMUR NE-43 para la detección de fallas, en caso de detectar una el transmisor deberá ser capaz de generar un alto o bajo nivel de acuerdo al protocolo HART para llevar a un estado seguro a la operación.
- Se deberá tener muy en cuenta la configuración MooN de los sensores ya sea para aumentar disponibilidad o seguridad, dependiendo de los cálculos de confiabilidad para alcanzar el SIL objetivo.
- Los transmisores deberán emplear rutinas de autodiagnósticos automáticos para detectar fallas del sensor, en caso de detección de fallas el transmisor deberá ser capaz de acarrear su señal a la consigna deseada para activar la SIF correspondiente y llevar al proceso a un estado seguro.

## Actuadores

- El SIS y el BPCS no deben compartir elementos finales, sin embargo en ciertas condiciones sería aceptable tener las siguientes excepciones:
  - ✓ En el caso de apertura/cierra de válvulas o arrancar/apagar equipos, los comandos deberán ser enviados a través del SIS para sobrescribir (override) los comandos del BPCS, estos comandos deberán ser enviados al SIS mediante salidas de contacto por cableado duro.
  - ✓ Una válvula de control podría ser utilizada como una ESDV si cumple con el nivel de integridad SIL requerido, a su vez si es aceptable de acuerdo con los estándares de seguridad funcional.
- Válvulas de shutdown deberán fallar en una posición segura predefinida (abierta o cerrada) ante la pérdida de aire, de energía eléctrica o hidráulica. Todas las posiciones de las válvulas deberán ser especificadas tanto en los P&ID como en los datasheet.
- Válvulas Motorizadas (MOVs) que hagan parte de una Función Instrumentada de Seguridad deberán ser provistas por dos fuentes de alimentación independientes usando una autotransferencia o deberán ser provistas de fuentes de poder redundantes, incluyendo UPS.

## Solenoides eléctricos

- Cuando se desea incrementar la seguridad del Sistema es preferible usar arreglos de solenoides en votación 1oo2 (des-energizar para disparar), siempre y cuando los cálculos de confiabilidad cumplan el SIL requerido.
- Cuando se desea disminuir los disparos en falso (disparos espurios) del Sistema es preferible usar arreglos de solenoides en votación 2oo2 (des-energizar para disparar), siempre y cuando los cálculos de confiabilidad cumplan el SIL requerido

### 2.6.5 *Elaboración de Requerimientos de Fuentes de energía eléctrica*

A pesar de que no es necesario para alcanzar el nivel SIL objetivo es necesario tener en cuentas las siguientes especificaciones para este tipo de equipos:

- Proveer de sistemas redundantes de energía mediante el uso de UPS (Sistemas de energía ininterrumpida) o banco de baterías de respaldo.
- Se debe proveer de un sistema de indicadores de estado para monitorear el estado de las fuentes de alimentación para la toma de decisiones.
- En el caso de las entradas y salidas que son receptadas o enviadas por el PLC de seguridad deberán tener una distribución de energía independiente para minimizar el fallo de causa común en caso de falla en el cableado.
- Con la fuente de corriente alterna de debe tener en cuenta los siguientes aspectos:
  - ✓ Frecuencia
  - ✓ Voltaje
  - ✓ Corriente
  - ✓ Transitorios de corriente
  - ✓ Protecciones de sobrecarga, cortocircuito, descargas atmosféricas, ruido y picos de tensión
- Las conexiones a tierra se deberán seguir según el fabricante.

### **2.6.6 *Elaboración de los Requerimientos de Bypass***

Las especificaciones para este tipo de procedimiento se describen a continuación:

- Generar un sistema MOS (Mantenimiento de Sobreescritura de Software) que inhabilita el disparo de la función Instrumentada de Seguridad por medio del subsistema de detección, independiente de la arquitectura que la SIF tenga y mantiene habilitado en consola la indicación de la variable de proceso con sus respectivas alarmas
- El MOS solo se permite para los subsistemas de detección (sensores/transmisores) de las SIF.
- Los bypass de mantenimiento de las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF) deberán de ser aplicados solo cuando sea estrictamente necesario y bajo condiciones altamente controladas.
- Los bypass deberán posicionarse y reposicionarse desde la Interface del Operador.
- Solo deberá de permitirse 1 (uno) bypass de mantenimiento a la vez por cada grupo de votación.
- Los bypass de mantenimiento operarán de tal manera que el SIS deberá ser configurado de modo que los bypass sean implementados usando un proceso de dos pasos que incluyan:
  - a. Activación del interruptor manual general de habilitación de Bypass de toda las SIF de la Estación Páramo, ubicado en la consola del operador.
  - b. Activación del botón de bypass específico de la SIF en la interfaz del operador.

Solo cuando ambos pasos estén activados, el sistema estará en bypass. Cuando un sistema se pone en bypass, el PLC de Seguridad retendrá la salida de la SIF en el estado de no-disparo, sin tomar en cuenta el estatus de la entrada de detección que está en bypass.

### **2.6.7 *Elaboración de la Filosofía de Bypass durante Arranque y Override de Proceso***

No se requiere bypass de las SIF especificadas para el arranque de la estación de bombeo “Páramo”.

### 2.6.8 Elaboración de la Filosofía de Reset

El rearme o reset de una función instrumentada de seguridad que ha sido demanda por la estación se deberá realizar en campo de manera manual o de manera automática según se haya previsto, el mismo que deberá efectuarse una vez se haya normalizado las variables de activación. Adicional al reset o rearme manual de la SIF en campo es necesario un en la lógica LHMI para permitir el arranque de las operaciones.

### 2.6.9 Especificaciones para el Diseño y Operación

En la Tabla 61-2, Tabla 62-2 Tabla 63-2, Tabla 64-2 y Tabla 65-2 se detalla los requerimientos específicos que debe cumplir cada una de las funciones instrumentadas de seguridad identificadas para operación y diseño.

**Tabla 61-2:** Especificaciones de la SIF-01

SIF-01						
<b>Tag SIF</b>	PZAHH	<b>Intención de diseño</b>	Prevenir, las consecuencias que afectan principalmente a las personas, medio ambiente y al capital de la compañía debido a los peligros existentes en la estación PS-4			
<b>Función</b>	Una alta alta presión medida por los transmisores PZIT-040XX A/B en la entrada de la estación PS-4, causa el cierre de la ESDV-040XX, con nivel de integridad SIL=1, FFR $\geq$ 86					
<b>Nodo/ Causa</b>	1-3	<b>Modo de operación</b>	Bajo demanda	<b>P&amp;ID</b>	2745-R-DP-04001	
<b>Punto de Disparo</b>	PZAHH= 424.34 PSI (*2%)	<b>Posible riesgo derivado del disparo</b>	Potencial sobre presión aguas arriba de la estación PS-4			
<b>SIL (objetivo)</b>	SIL=1	<b>FRR</b>	$\geq$ 86	<b>PTI(Proof test interval)</b>	1 año	
<b>Rata de disparo espurios</b>	1 cada 5 años	<b>MTTFs</b>	5 años	<b>MTRR (máx)</b>	24 hr	
<b>Origen de la demanda</b>	1) Taponamiento del Filtro F-0404		<b>Frecuencia de la demanda</b>	0,146667 cada año	<b>Tipo de demanda</b>	Baja
<b>Tipo de disparo</b>	DE-T-T		<b>Rango de operación normal</b>	PZIT-04XX= 0 PSI a 407 PSI		

Realizado por: Ojeda, 2017

**Tabla 62-2:** Especificaciones de la SIF-02

SIF-02						
<b>Tag SIF</b>	PDZAHH	<b>Intención de diseño</b>	Prevenir, las consecuencias que afectan principalmente a las personas, medio ambiente y al capital de la compañía debido a los peligros existentes en PS-4			
<b>Función</b>	Alta alta presión diferencial, durante la operación de recepción de herramienta inteligente ó raspador, medida por el transmisor PDZIT-040XX causa el cierre de la ESDV-04003 y de la MOV-04001, des-energizando el panel de operación manual de las valvulas con un SIL=1 Y FFR>=38					
<b>Nodo/ Causa</b>	1-7	<b>Modo de operación</b>	Bajo demanda	<b>P&amp;ID</b>	2745-R-DP-04001	
<b>Punto de Disparo</b>	Por definir	<b>Posible riesgo derivado del disparo</b>	Sin riesgos considerables			
<b>SIL (objetivo)</b>	SIL 1	<b>FRR</b>	>=38	<b>PTI(Proof test interval)</b>	1 año	
<b>Rata de disparo espurios</b>	1 cada 5 años	<b>MTTFs</b>	5 años	<b>MTRR (máx)</b>	24 hr	
<b>Origen de la demanda</b>	Error operativo al equalizar las presiones durante la preparación de la trampa R-0401 para recibir marrano.		<b>Frecuencia de la demanda</b>	0,01 cada año	<b>Tipo de demanda</b>	Medio
<b>Tipo de disparo</b>	DE-T-T		<b>Rango de operación normal</b>	0 PSI (ideal)		

Realizado por: Ojeda, 2017

**Tabla 63-2:** Especificaciones de la SIF-03

SIF-03					
<b>Tag SIF</b>	PZAHH FZAHH	<b>Intención de diseño</b>	Prevenir, las consecuencias que afectan principalmente a las personas, medio ambiente y al capital de la compañía debido a los peligros existentes en PS-4		
<b>Función</b>	En Alto caudal y alta presión detectado por los transmisores PZIT-046XXA/B y FZIT-046XX a la entrada del E-0401, causando la apertura de una válvula MOV-046XX, con un nivel de integridad SIL=2				
<b>Nodo/Causa</b>	3-3	<b>Modo de operación</b>	Bajo demanda	<b>P&amp;ID</b>	2725-R-DP-4019
<b>Punto de Disparo</b>	PZAHH=416 PSI, FAHH=6875 BBL/H	<b>Posible riesgo derivado del disparo</b>	Baja temperatura en el crudo pesado		
<b>SIL (objetivo)</b>	SIL 2	<b>FRR</b>	>=583	<b>PTI(Proof test interval)</b>	1 año
<b>Rata de disparo espurios</b>	1 cada 5 años	<b>MTTFs</b>	5 años	<b>MTRR (máx)</b>	8 hr
<b>Origen de la demanda</b>	Falla de la cerrada de la FV-04661.		<b>Frecuencia de la demanda</b>	0,1 cada año	<b>Tipo de demanda</b>  Medio
<b>Tipo de disparo</b>	E-T-T		<b>Rango de operación normal</b>	PZIT-046xx= (0 a 4007) PSI FZIT-046xx= (6458 a 800) BBL/H	

Realizado por: Ojeda, 2017

**Tabla 64-2:** Especificaciones de la SIF-04

SIF-04					
<b>Tag SIF</b>	PZALL PZAHH	<b>Intención de diseño</b>	Prevenir, las consecuencias que afectan principalmente a las personas, medio ambiente y al capital de la compañía debido a los peligros existentes en PS-4		
<b>Función</b>	Generar una señal para apagar las P-0401 al detectar una baja o alta presión aguas abajo del filtro cono bruja y aguas arriba de la MOV-04415, cerrando la ESDV-04XX, con una integridad de SIL=1				
<b>Nodo/Causa</b>	4-1 4-2 4-4	<b>Modo de operación</b>	Bajo demanda	<b>P&amp;ID</b>	2745-R-DP-04007 2745-R-DP-04008
<b>Punto de Disparo</b>	PZALL= 58.31 PSI PZAHH=1862 PSI	<b>Posible riesgo derivado del disparo</b>	Potencial sobre presión en el receptor y aguas arriba de la estación PS-4		
<b>SIL (objetivo)</b>	SIL 1	<b>FRR</b>	>= 50	<b>PTI(Proof test interval)</b>	1 año
<b>Rata de disparo espurios</b>	1 cada 5 años	<b>MTTFs</b>	5 años	<b>MTRR (máx)</b>	8 hr
<b>Origen de la demanda</b>	1. Cierre de la Mov-04410 2. Taponamiento del filtro cono bruja de succión de la bomba P-0401 3. Cierre de la Mov-04415 A/F.		<b>Frecuencia de la demanda</b>	0,05 al año	<b>Tipo de demanda</b>  Bajo
<b>Tipo de disparo</b>	DE-T-T		<b>Rango de operación normal</b>	PZT-044XXA= 407 PSI a 75 PSI PZT-044XXB= 0 PSI a 1789 PSI	

Realizado por: Ojeda, 2017

**Tabla 65-2:** Especificaciones de la Recomendación

Recomendación					
<b>Tag SIF</b>	LAHH-04112 LALL-04112	<b>Intención de diseño</b>	Prevenir, las consecuencias que afectan principalmente a las personas, medio ambiente y al capital de la compañía debido a los peligros existentes en PS-4		
<b>Función</b>	Transferir la señal del LALL-04112 y LAHH-04112 al Sistema instrumentado de seguridad con el objetivo de que genere una alarma para que el operador tome la decisión de arrancar o apagar las bombas P-0411				
<b>Nodo/ Causa</b>	5-3 5-4	<b>Modo de operación</b>	Bajo demanda	<b>P&amp;ID</b>	2745-R-DP-04022
<b>Punto de Disparo</b>	LAHH-04112 = 35% LALL-04112 = 17.2%	<b>Posible riesgo derivado del disparo</b>	No se ha detectado		
<b>SIL (objetivo)</b>	SIL 0	<b>FRR</b>	>=10	<b>PTI(Proof test interval)</b>	-
<b>Rata de disparo espurios</b>	1 cada 5 años	<b>MTTFs</b>	-	<b>MTRR (máx)</b>	-
<b>Origen de la demanda</b>	1. Alivio de PSV-04015 A/D por mas de 35 minutos. 2. Falla del sistema de control de nivel LIT-04110 al no apagar las bombas P-0411 A/B cuando existe menos nivel	<b>Frecuencia de la demanda</b>	0,1 al año	<b>Tipo de demanda</b>	Medio
<b>Tipo de disparo</b>	-	<b>Rango de operación normal</b>	-		

Realizado por: Ojeda, 2017

## 2.7 Diseño del Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS)

### 2.7.1 Cálculo de $PFD_{avg}$ de los Elementos de Seguridad

Los parámetros necesarios para el cálculo de  $PFD_{avg}$  son los definidos en el Tabla 12-1 y las fórmulas para el cálculo fueron tomadas de la Tabla 13-1.



## SPLC de seguridad Modicon Quantum

Este dispositivo es apto para desarrollar aplicaciones de nivel SIL 3 por lo que se ha obtenido sus valores directamente desde el fabricante los cuales son:

$$PFD_L = 6,95 \times 10^{-5} \text{ SIL 3}$$

$$MTTR = 24 \text{ h}$$

$$Ti = 12 \text{ meses}$$

$$DC = 90\%$$

$$Moon = 1001$$

*Datos del procesador principal del SPLC:*

$$\lambda_{SD} = 7,43 \times 10^{-6} \text{ (1/h)}$$

$$\lambda_{SU} = 7,50 \times 10^{-8} \text{ (1/h)}$$

$$\lambda_{DD} = 2,37 \times 10^{-6} \text{ (1/h)}$$

$$\lambda_{DU} = 1,25 \times 10^{-7} \text{ (1/h)}$$

Tasa de fallas seguras:

$$\lambda_S = \lambda_{SD} + \lambda_{SU}$$

$$\lambda_S = 7,43 \times 10^{-6} + 7,50 \times 10^{-8}$$

$$\lambda_S = 7,505 \times 10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Tasa de fallas peligrosas:

$$\lambda_D = \lambda_{DD} + \lambda_{DU}$$

$$\lambda_D = 2,37 \times 10^{-6} + 1,25 \times 10^{-7}$$

$$\lambda_D = 2,495 \times 10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Usando la Ecuación: 9-1 obtenemos la fracción de falla segura

$$SFF = \frac{\lambda_s + \lambda_{DD}}{\lambda} * 100$$

$$SFF = \frac{7,505 \times 10^{-6} + 2,37 \times 10^{-6}}{7,505 \times 10^{-6} + 2,495 \times 10^{-6}} * 100$$

$$SFF = 98,8\%$$

Tiempo medio de para:

$$t_{CE} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{Ti}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} (MTTR)$$

$$t_{CE} = \frac{1,25 \times 10^{-7}}{2,495 \times 10^{-6}} \left( \frac{8760}{2} + 24 \right) + \frac{2,37 \times 10^{-6}}{2,495 \times 10^{-6}} (24)$$

$$t_{CE} = 221,591182$$

Probabilidad de falla en demanda promedio:

$$PFD_{avg} = (\lambda_D) t_{CE}$$

$$PFD_{avg} = (2,495 \times 10^{-6}) * 221,591182$$

$$PFD_{avg} = 552,87 \times 10^{-6}$$

Usando la Ecuación 2-1 encontramos el Factor de reducción de riesgo:

$$FRR = \frac{1}{PFD_{avg}}$$

$$FRR = \frac{1}{552,87 \times 10^{-6}} = 1809$$

El procesador principal tiene una integridad de nivel SIL 3.

Datos del módulo de entrada del SPLC:

$$\lambda_{SD} = 9,90 \times 10^{-7} \text{ (1/h)}$$

$$\lambda_{SU} = 1,00 \times 10^{-8} \text{ (1/h)}$$

$$\lambda_{DD} = 9,00 \times 10^{-7} \text{ (1/h)}$$

$$\lambda_{DU} = 1,00 \times 10^{-7} \text{ (1/h)}$$

Tasa de fallas seguras:

$$\lambda_s = \lambda_{SD} + \lambda_{SU}$$

$$\lambda_s = 9,90 \times 10^{-7} + 1,00 \times 10^{-8}$$

$$\lambda_s = 1,000 \times 10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Tasa de fallas peligrosas:

$$\lambda_D = \lambda_{DD} + \lambda_{DU}$$

$$\lambda_D = 9,00 \times 10^{-7} + 1,00 \times 10^{-7}$$

$$\lambda_D = 1,000 \times 10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Usando la Ecuación: 9-1 obtenemos la fracción de falla segura

$$SFF = \frac{\lambda_s + \lambda_{DD}}{\lambda} * 100$$

$$SFF = \frac{1,000 \times 10^{-6} + 9,00 \times 10^{-7}}{1,000 \times 10^{-6} + 1,000 \times 10^{-6}} * 100$$

$$SFF = 95\%$$

Tiempo medio de para:

$$t_{CE} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{Ti}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} (MTTR)$$

$$t_{CE} = \frac{1,00 \times 10^{-7}}{1,000 \times 10^{-6}} \left( \frac{8760}{2} + 24 \right) + \frac{9,00 \times 10^{-7}}{1,000 \times 10^{-6}} (24)$$

$$t_{CE} = 423,853211$$

Probabilidad de falla en demanda promedio:

$$PFD_{avg} = (\lambda_D)t_{CE}$$

$$PFD_{avg} = (1,000 \times 10^{-6}) * 423,853211$$

$$PFD_{avg} = 4,239 \times 10^{-4}$$

Usando la Ecuación 2-1 encontramos el Factor de reducción de riesgo:

$$FRR = \frac{1}{PFD_{avg}}$$

$$FRR = \frac{1}{4,239 \times 10^{-4}} = 2359$$

El módulo de entrada tiene una integridad de nivel SIL 3.

*Datos del módulo de salida del SPLC:*

$$\lambda_{SD} = 7,60 \times 10^{-7} \text{ (1/h)}$$

$$\lambda_{SU} = 4,00 \times 10^{-8} \text{ (1/h)}$$

$$\lambda_{DD} = 1,90 \times 10^{-7} \text{ (1/h)}$$

$$\lambda_{DU} = 1,00 \times 10^{-7} \text{ (1/h)}$$

Tasa de fallas seguras:

$$\lambda_S = \lambda_{SD} + \lambda_{SU}$$

$$\lambda_S = 7,60 \times 10^{-7} + 4,00 \times 10^{-8}$$

$$\lambda_S = 800 \times 10^{-9} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Tasa de fallas peligrosas:

$$\lambda_D = \lambda_{DD} + \lambda_{DU}$$

$$\lambda_D = 1,90 \times 10^{-7} + 1,00 \times 10^{-7}$$

$$\lambda_D = 290 \times 10^{-9} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Usando la Ecuación: 9-1 obtenemos la fracción de falla segura

$$SFF = \frac{\lambda_s + \lambda_{DD}}{\lambda} * 100$$

$$SFF = \frac{800x10^{-9} + 1,90x10^{-7}}{800x10^{-9} + 290x10^{-9}} * 100$$

$$SFF = 98,9\%$$

Tiempo medio de para:

$$t_{CE} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{Ti}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} (MTTR)$$

$$t_{CE} = \frac{1,00x10^{-7}}{290x10^{-9}} \left( \frac{8760}{2} + 24 \right) + \frac{1,90x10^{-7}}{290x10^{-9}} (24)$$

$$t_{CE} = 1518,777931$$

Probabilidad de falla en demanda promedio:

$$PFD_{avg} = (\lambda_D) t_{CE}$$

$$PFD_{avg} = (290x10^{-9}) * 1518,777931$$

$$PFD_{avg} = 440,446x10^{-6}$$

Usando la Ecuación 2-1 encontramos el Factor de reducción de riesgo

$$FRR = \frac{1}{PFD_{avg}}$$

$$FRR = \frac{1}{440,446x10^{-6}} = 2270$$

El módulo de entrada tiene una integridad de nivel SIL 3.

### Válvula ESDV de bola

$$\lambda = 9,084 \times 10^{-5} \text{ (1/h)}$$

Ti=5 meses

MTTR= 24 h

DC=90%

MooN=1001

Tasa de fallas seguras:

$$\lambda_s = \lambda * 50\%$$

$$\lambda_s = 9,084 \times 10^{-5} * 50\%$$

$$\lambda_s = 4,542 \times 10^{-5} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Tasa de fallas peligrosas:

$$\lambda_D = \lambda * 50\%$$

$$\lambda_D = 9,084 \times 10^{-5} * 50\%$$

$$\lambda_D = 4,542 \times 10^{-5} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Tasa de fallas peligrosas no detectadas:

$$\lambda_{DU} = \frac{\lambda}{2} (1 - DC)$$

$$\lambda_{DU} = \frac{9,084 \times 10^{-5}}{2} (1 - 90\%)$$

$$\lambda_{DU} = 4,542 \times 10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Tasa de fallas peligrosas detectadas:

$$\lambda_{DD} = \frac{\lambda}{2}(1 - DC)$$

$$\lambda_{DD} = \frac{9,084 \times 10^{-5}}{2} (90\%)$$

$$\lambda_{DD} = 4,088 \times 10^{-5} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Usando la Ecuación: 9-1 obtenemos la fracción de falla segura

$$SFF = \frac{\lambda_s + \lambda_{DD}}{\lambda} * 100$$

$$SFF = \frac{4,542 \times 10^{-5} + 4,088 \times 10^{-5}}{9,084 \times 10^{-5}} * 100$$

$$SFF = 95\%$$

Tiempo medio de para:

$$t_{CE} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{Ti}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} (MTTR)$$

$$t_{CE} = \frac{4,542 \times 10^{-6}}{4,542 \times 10^{-5}} \left( \frac{3650}{2} + 24 \right) + \frac{4,088 \times 10^{-5}}{4,542 \times 10^{-5}} (24)$$

$$t_{CE} = 206,500000$$

Probabilidad de falla en demanda promedio:

$$PFD_{avg} = (\lambda_D) t_{CE}$$

$$PFD_{avg} = (4,542 \times 10^{-5}) * 206,500000$$

$$PFD_{FE} = 9,379 \times 10^{-3}$$

Usando la Ecuación 2-1 encontramos el Factor de reducción de riesgo:

$$FRR = \frac{1}{PFD_{avg}}$$
$$FRR = \frac{1}{9,379 \times 10^{-3}} = 107$$

La válvula tiene una integridad de nivel SIL 2.

#### **ESDV-04004**

La válvula ESDV-04004 instalada en la etapa de receptor de la estación Páramo es apropiada para el uso de sistemas con SIL 1 con una probabilidad de falla en demanda promedio de:

$$PFD_{FE} = 8,95 \times 10^{-3}$$
$$FFR = 112$$
$$MooN = 1001$$

#### **Válvula MOV de compuerta A**

$$\lambda = 18,57 \times 10^{-6} \text{ (1/h)}$$

$$T_i = 5 \text{ meses}$$

$$MTTR = 24 \text{ h}$$

$$DC = 90\%$$

$$MooN = 1001$$

Tasa de fallas seguras:

$$\lambda_s = \lambda * 50\%$$

$$\lambda_s = 18,57 \times 10^{-6} * 50\%$$

$$\lambda_s = 9,285 \times 10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$



Tasa de fallas peligrosas:

$$\lambda_D = \lambda * 50\%$$

$$\lambda_D = 18,57 \times 10^{-6} * 50\%$$

$$\lambda_D = 9,285 \times 10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Tasa de fallas peligrosas no detectadas:

$$\lambda_{DU} = \frac{\lambda}{2} (1 - DC)$$

$$\lambda_{DU} = \frac{18,57 \times 10^{-6}}{2} (1 - 90\%)$$

$$\lambda_{DU} = 928,5 \times 10^{-9} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Tasa de fallas peligrosas detectadas:

$$\lambda_{DD} = \frac{\lambda}{2} (1 - DC)$$

$$\lambda_{DD} = \frac{18,57 \times 10^{-6}}{2} (90\%)$$

$$\lambda_{DD} = 8,357 \times 10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Usando la Ecuación: 9-1 obtenemos la fracción de falla segura

$$SFF = \frac{\lambda_S + \lambda_{DD}}{\lambda} * 100$$

$$SFF = \frac{9,285 \times 10^{-6} + 8,357 \times 10^{-6}}{18,57 \times 10^{-6}} * 100$$

$$SFF = 95\%$$

Tiempo medio de para:

$$t_{CE} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{Ti}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} (MTTR)$$
$$t_{CE} = \frac{928,5 \times 10^{-9}}{18,57 \times 10^{-6}} \left( \frac{3650}{2} + 24 \right) + \frac{8,357 \times 10^{-6}}{18,57 \times 10^{-6}} (24)$$
$$t_{CE} = 206,501292$$

Probabilidad de falla en demanda promedio:

$$PFD_{avg} = (\lambda_D) t_{CE}$$
$$PFD_{avg} = (9,285 \times 10^{-6}) * 206,501292$$
$$PFD_{FE} = 1,917 \times 10^{-3}$$

Usando la Ecuación 2-1 encontramos el Factor de reducción de riesgo:

$$FRR = \frac{1}{PFD_{avg}}$$
$$FRR = \frac{1}{1,917 \times 10^{-3}} = 522$$

La válvula tiene una integridad de nivel SIL 2.

### Válvula MOV de compuerta B

$$\lambda = 18,57 \times 10^{-6} \text{ (1/h)}$$

Ti= 3 meses

MTTR= 24 h

DC=90%

MooN=1001

Tasa de fallas seguras:

$$\lambda_s = \lambda * 50\%$$

$$\lambda_s = 18,57 \times 10^{-6} * 50\%$$

$$\lambda_s = 9,285 \times 10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Tasa de fallas peligrosas:

$$\lambda_D = \lambda * 50\%$$

$$\lambda_D = 18,57 \times 10^{-6} * 50\%$$

$$\lambda_D = 9,285 \times 10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Tasa de fallas peligrosas no detectadas:

$$\lambda_{DU} = \frac{\lambda}{2} (1 - DC)$$

$$\lambda_{DU} = \frac{18,57 \times 10^{-6}}{2} (1 - 90\%)$$

$$\lambda_{DU} = 928,5 \times 10^{-9} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Tasa de fallas peligrosas detectadas:

$$\lambda_{DD} = \frac{\lambda}{2}(1-DC)$$

$$\lambda_{DD} = \frac{18,57 \times 10^{-6}}{2} (90\%)$$

$$\lambda_{DD} = 8,357 \times 10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Usando la Ecuación: 9-1 obtenemos la fracción de falla segura

$$SFF = \frac{\lambda_s + \lambda_{DD}}{\lambda} * 100$$

$$SFF = \frac{9,285 \times 10^{-6} + 8,357 \times 10^{-6}}{18,57 \times 10^{-6}} * 100$$

$$SFF = 95\%$$

Tiempo medio de para:

$$t_{CE} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{Ti}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} (MTTR)$$

$$t_{CE} = \frac{928,5 \times 10^{-9}}{18,57 \times 10^{-6}} \left( \frac{2190}{2} + 24 \right) + \frac{8,357 \times 10^{-6}}{18,57 \times 10^{-6}} (24)$$

$$t_{CE} = 133,501290$$

Probabilidad de falla en demanda promedio:

$$PFD_{avg} = (\lambda_D) t_{CE}$$

$$PFD_{avg} = (9,285 \times 10^{-6}) * 133,501290$$

$$PFD_{FE} = 9,601 \times 10^{-4}$$

Usando la Ecuación 2-1 encontramos el Factor de reducción de riesgo:

$$FRR = \frac{1}{PFD_{avg}}$$
$$FRR = \frac{1}{9,601 \times 10^{-4}} = 1042$$

La válvula tiene una integridad de nivel SIL 3.

### **ESDV-04003 y MOV-04001**

Por experiencia se ha determinado que la ESDV-04003 y MOV-04001 instaladas en la etapa de receptor de la estación Páramo alcanza el siguiente valor de probabilidad de falla en demanda:

$$PFD_{FE} = 2,34 \times 10^{-2}$$
$$FFR = 43$$
$$MooN = 2002$$

### **Sensor de Flujo**

$$\lambda = 3,55 \times 10^{-6} \text{ (1/h)}$$

$$Ti = 3 \text{ meses}$$

$$MTTR = 24 \text{ h}$$

$$DC = 60\%$$

$$MooN = 1001$$

Tasa de fallas seguras:

$$\lambda_s = \lambda * 50\%$$

$$\lambda_s = 3,55 \times 10^{-6} * 50\%$$

$$\lambda_s = 1,775 \times 10^{-7} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Tasa de fallas peligrosas:

$$\lambda_D = \lambda * 50\%$$

$$\lambda_D = 3,55x10^{-6} * 50\%$$

$$\lambda_D = 1,775x10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Tasa de fallas peligrosas no detectadas:

$$\lambda_{DU} = \frac{\lambda}{2} (1 - DC)$$

$$\lambda_{DU} = \frac{3,55x10^{-6}}{2} (1 - 60\%)$$

$$\lambda_{DU} = 7,1x10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Tasa de fallas peligrosas detectadas:

$$\lambda_{DD} = \frac{\lambda}{2} (1 - DC)$$

$$\lambda_{DD} = \frac{3,55x10^{-6}}{2} (60\%)$$

$$\lambda_{DD} = 1,065x10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Usando la Ecuación: 9-1 obtenemos la fracción de falla segura

$$SFF = \frac{\lambda_s + \lambda_{DD}}{\lambda} * 100$$

$$SFF = \frac{1,775x10^{-6} + 1,065x10^{-6}}{3,55x10^{-6}} * 100$$

$$SFF = 80\%$$

Tiempo medio de para:

$$t_{CE} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{Ti}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} (MTTR)$$

$$t_{CE} = \frac{7,1 \times 10^{-7}}{1,775 \times 10^{-6}} \left( \frac{2190}{2} + 24 \right) + \frac{1,065 \times 10^{-6}}{1,775 \times 10^{-6}} (24)$$

$$t_{CE} = 462$$

Probabilidad de falla en demanda promedio:

$$PFD_{avg} = (\lambda_D) t_{CE}$$

$$PFD_{avg} = (1,775 \times 10^{-6}) * 462$$

$$PFD_S = 8,203 \times 10^{-4}$$

Usando la Ecuación 2-1 encontramos el Factor de reducción de riesgo:

$$FRR = \frac{1}{PFD_{avg}}$$

$$FRR = \frac{1}{8,203 \times 10^{-4}} = 1219$$

El sensor tiene una integridad de nivel SIL 3.

### Sensor de Presión A

$$\lambda = 5,48 \times 10^{-6} \text{ (1/h)}$$

Ti=3 meses

MTTR= 24 h

DC=60%

MooN=1oo1

Tasa de fallas seguras:

$$\lambda_s = \lambda * 50\%$$

$$\lambda_s = 5,48 \times 10^{-6} * 50\%$$

$$\lambda_s = 2,74 \times 10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Tasa de fallas peligrosas:

$$\lambda_D = \lambda * 50\%$$

$$\lambda_D = 5,48x10^{-6} * 50\%$$

$$\lambda_D = 2,74x10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Tasa de fallas peligrosas no detectadas:

$$\lambda_{DU} = \frac{\lambda}{2} (1 - DC)$$

$$\lambda_{DU} = \frac{5,48x10^{-6}}{2} (1 - 60\%)$$

$$\lambda_{DU} = 1,096x10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Tasa de fallas peligrosas detectadas:

$$\lambda_{DD} = \frac{\lambda}{2} (DC)$$

$$\lambda_{DD} = \frac{5,48x10^{-6}}{2} (60\%)$$

$$\lambda_{DD} = 1,644x10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Usando la Ecuación: 9-1 obtenemos la fracción de falla segura:

$$SFF = \frac{\lambda_S + \lambda_{DD}}{\lambda} * 100$$

$$SFF = \frac{2,74x10^{-6} + 1,644x10^{-6}}{5,48x10^{-6}} * 100$$

$$SFF = 80\%$$



Tiempo medio de para:

$$t_{CE} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{Ti}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} (MTTR)$$
$$t_{CE} = \frac{1,096 \times 10^{-6}}{2,74 \times 10^{-6}} \left( \frac{2190}{2} + 24 \right) + \frac{1,644 \times 10^{-6}}{2,74 \times 10^{-6}} (24)$$
$$t_{CE} = 462$$

Probabilidad de falla en demanda promedio:

$$PFD_{avg} = (\lambda_D) t_{CE}$$
$$PFD_{avg} = (5,48 \times 10^{-6}) * 462$$
$$PFD_s = 1,266 \times 10^{-3}$$

Usando la Ecuación 2-1 encontramos el Factor de reducción de riesgo:

$$FRR = \frac{1}{PFD_{avg}}$$
$$FRR = \frac{1}{1,266 \times 10^{-3}} = 790$$

El sensor tiene una integridad de nivel SIL 2.

## Sensor de Presión B

$$\lambda = 5,48 \times 10^{-6} \text{ (1/h)}$$

$$T_i = 3 \text{ meses}$$

$$MTTR = 24 \text{ h}$$

$$DC = 60\%$$

$$\beta = 10\%$$

$$\beta_D = 5\%$$

$$MooN = 1002$$

Tasa de fallas seguras:

$$\lambda_s = \lambda * 50\%$$

$$\lambda_s = 5,48 \times 10^{-6} * 50\%$$

$$\lambda_s = 2,74 \times 10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Tasa de fallas peligrosas:

$$\lambda_D = \lambda * 50\%$$

$$\lambda_D = 5,48 \times 10^{-6} * 50\%$$

$$\lambda_D = 2,74 \times 10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Tasa de fallas peligrosas no detectadas:

$$\lambda_{DU} = \frac{\lambda}{2} (1 - DC)$$

$$\lambda_{DU} = \frac{5,48 \times 10^{-6}}{2} (1 - 60\%)$$

$$\lambda_{DU} = 1,096 \times 10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Tasa de fallas peligrosas detectadas:

$$\lambda_{DD} = \frac{\lambda}{2}(1 - DC)$$

$$\lambda_{DD} = \frac{5,48 \times 10^{-6}}{2} (60\%)$$

$$\lambda_{DD} = 1,644 \times 10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Usando la Ecuación: 9-1 obtenemos la fracción de falla segura

$$SFF = \frac{\lambda_s + \lambda_{DD}}{\lambda} * 100$$

$$SFF = \frac{2,74 \times 10^{-6} + 1,644 \times 10^{-6}}{5,48 \times 10^{-6}} * 100$$

$$SFF = 80\%$$

Tiempo medio de para:

$$t_{CE} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{Ti}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} (MTTR)$$

$$t_{CE} = \frac{1,096 \times 10^{-6}}{2,74 \times 10^{-6}} \left( \frac{2190}{2} + 24 \right) + \frac{1,644 \times 10^{-6}}{2,74 \times 10^{-6}} (24)$$

$$t_{CE} = 462$$

$$t_{GE} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{Ti}{3} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} (MTTR)$$

$$t_{GE} = \frac{1,096 \times 10^{-6}}{2,74 \times 10^{-6}} \left( \frac{2190}{3} + 24 \right) + \frac{1,644 \times 10^{-6}}{2,74 \times 10^{-6}} (24)$$

$$t_{GE} = 316$$

Probabilidad de falla en demanda promedio:

$$\begin{aligned}
 PFD_{avg} &= 2[(1-\beta_D)\lambda_{DD} + (1-\beta)\lambda_{DU}]^2 t_{CE}t_{GE} + \beta_D\lambda_{DD}MTTR + \beta\lambda_{DU}\left(\frac{Ti}{2}MTTR\right) \\
 PFD_{avg} &= 2[(1-5\%)(1,644 \times 10^{-6}) + (1-10\%)(1,096 \times 10^{-6})]^2 (462)(316)... \\
 &+ (5\%)(1,644 \times 10^{-6})(24) + (10\%)(1,096 \times 10^{-6})\left(\frac{2190}{2} + 24\right) \\
 PFD_s &= 126,51 \times 10^{-6}
 \end{aligned}$$

Usando la Ecuación 2-1 encontramos el Factor de reducción de riesgo:

$$\begin{aligned}
 FRR &= \frac{1}{PFD_{avg}} \\
 FRR &= \frac{1}{126,510 \times 10^{-6}} = 7904
 \end{aligned}$$

El subsistema de detección tiene una integridad de nivel SIL 2.

### Sensor de Flujo y Presión

*Sensor de Flujo:*

$$\lambda = 3,55 \times 10^{-6} \text{ (1/h)}$$

Ti=3 meses

MTTR= 24 h

DC=60%

MooN=1oo1

*Sensor de presión:*

$$\lambda = 5,48 \times 10^{-6} \text{ (1/h)}$$

Ti= 3 meses

MTTR= 24 h

DC= 60%

$\beta$ = 10%

$\beta_D$ = 5%

MooN= 1oo2

Subsistema del sensor de flujo:

$$PFD_{SF} = (\lambda_D)t_{CE}$$

$$PFD_{SF} = (1,775 \times 10^{-6}) * 462$$

$$PFD_{SF} = 8,203 \times 10^{-4}$$

Subsistema del sensor de presión:

$$PFD_{SP} = 2 \left[ (1 - \beta_D)\lambda_{DD} + (1 - \beta)\lambda_{DU} \right]^2 t_{CE}t_{GE} + \beta_D\lambda_{DD}MTTR + \beta\lambda_{DU} \left( \frac{Ti}{2} MTTR \right)$$

$$PFD_{SP} = 2 \left[ (1 - 5\%)(1,644 \times 10^{-6}) + (1 - 10\%)(1,096 \times 10^{-6}) \right]^2 (462)(316) \dots$$

$$+ (5\%)(1,644 \times 10^{-6})(24) + (10\%)(1,096 \times 10^{-6}) \left( \frac{2190}{2} + 24 \right)$$

$$PFD_{SP} = 126,51 \times 10^{-6}$$

Probabilidad de falla en demanda del sistema

$$PFD_{avg} = (PFD_{SF})(PFD_{SP})$$

$$PFD_{avg} = (8,203 \times 10^{-4})(126,51 \times 10^{-6})$$

$$PFD_S = 1,037 \times 10^{-7}$$

Usando la Ecuación 2-1 encontramos el Factor de reducción de riesgo:

$$FRR = \frac{1}{PFD_{avg}}$$

$$FRR = \frac{1}{1,037 \times 10^{-7}} = 9643201$$

El sistema de detección alcanza un nivel SIL4

### Sensor de Presión C

$$\lambda = 5,48 \times 10^{-6} \text{ (1/h)}$$

Ti=3 meses

MTTR= 24 h

DC=60%

MooN=2oo2

Tasa de fallas seguras:

$$\lambda_s = \lambda * 50\%$$

$$\lambda_s = 5,48 \times 10^{-6} * 50\%$$

$$\lambda_s = 2,74 \times 10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Tasa de fallas peligrosas:

$$\lambda_D = \lambda * 50\%$$

$$\lambda_D = 5,48 \times 10^{-6} * 50\%$$

$$\lambda_D = 2,74 \times 10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Tasa de fallas peligrosas no detectadas:

$$\lambda_{DU} = \frac{\lambda}{2} (1 - DC)$$

$$\lambda_{DU} = \frac{5,48 \times 10^{-6}}{2} (1 - 60\%)$$

$$\lambda_{DU} = 1,096 \times 10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Tasa de fallas peligrosas detectadas:

$$\lambda_{DD} = \frac{\lambda}{2}(1 - DC)$$

$$\lambda_{DD} = \frac{5,48 \times 10^{-6}}{2} (60\%)$$

$$\lambda_{DD} = 1,644 \times 10^{-6} \left[ \frac{1}{h} \right]$$

Usando la Ecuación: 9-1 obtenemos la fracción de falla segura:

$$SFF = \frac{\lambda_s + \lambda_{DD}}{\lambda} * 100$$

$$SFF = \frac{2,74 \times 10^{-6} + 1,644 \times 10^{-6}}{5,48 \times 10^{-6}} * 100$$

$$SFF = 80\%$$

Tiempo medio de para:

$$t_{CE} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{Ti}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} (MTTR)$$

$$t_{CE} = \frac{1,096 \times 10^{-6}}{2,74 \times 10^{-6}} \left( \frac{2190}{2} + 24 \right) + \frac{1,644 \times 10^{-6}}{2,74 \times 10^{-6}} (24)$$

$$t_{CE} = 462$$

Probabilidad de falla en demanda promedio:

$$PFD_{avg} = 2(\lambda_D)t_{CE}$$

$$PFD_{avg} = 2(2,74 \times 10^{-6}) * 462$$

$$PFD_s = 2,532 \times 10^{-3}$$

Usando la Ecuación 2-1 encontramos el Factor de reducción de riesgo:

$$FRR = \frac{1}{PFD_{avg}}$$

$$FRR = \frac{1}{2,532 \times 10^{-3}} = 395$$

El subsistema de detección tiene una integridad de nivel SIL 2.

### 2.7.2 Cálculo de las $PFD_{avg}$ de Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF)

En esta etapa se busca obtener el diseño apropiado de las funciones instrumentadas de seguridad para que estas alcancen el SIL objetivo obtenido en el Análisis de Capas de Protección (LOPA) para reducir los niveles de riesgo a tolerables.

#### SIF-01

En la Tabla 66-2 se define la estructura del diseño asignada a la función instrumentada de seguridad SIF-01.

**Tabla 66-2:** Estructura de la SIF-01

Sub-sistema Detección		Sub-sistema Lógica	Sub-sistema Actuación	
Sensor	Votación		Votación	Válvula de Emergencia
PZIT-04022A	1oo2	SPLC DE SEGURIDAD	1oo1	ESDV-04004
PZIT-04022B				

Realizado por: Ojeda, 2017



Mediante el uso de la Ecuación 8-1 obtenemos la  $PFD_{avg}$  de mi función instrumentada de seguridad:

$$PFD_{SIF-01} = PFD_S + PFD_L + PFD_{FE}$$

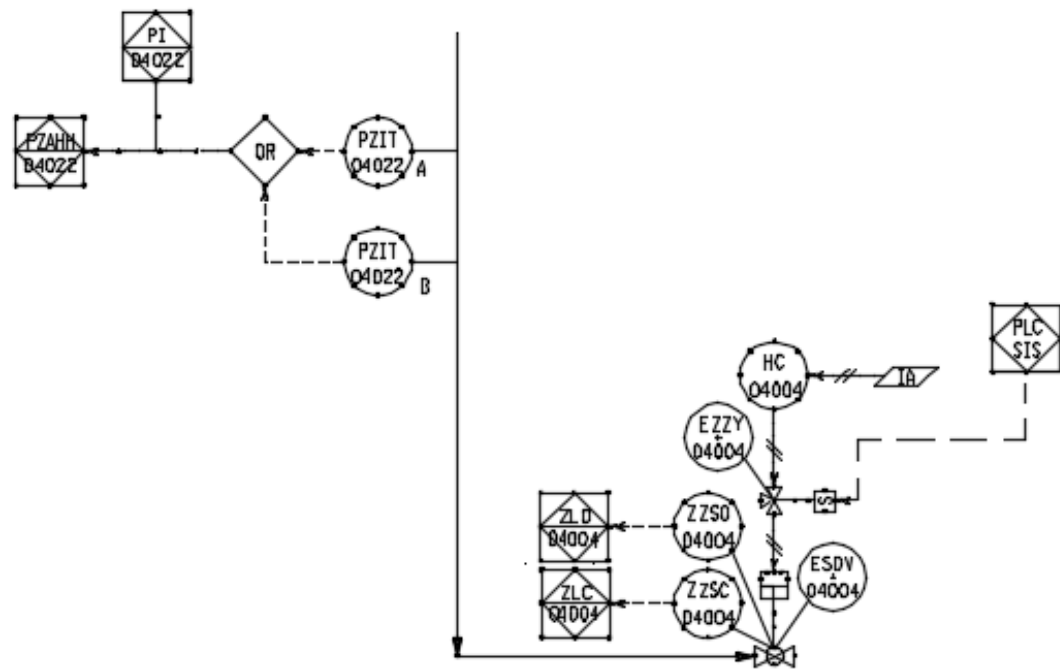
$$PFD_{SIF-01} = 126,51 \times 10^{-6} + 6,95 \times 10^{-5} + 8,95 \times 10^{-3}$$

$$PFD_{SIF-01} = 9,15 \times 10^{-3}$$

$$FRR_{SIF-01} = \frac{1}{9,15 \times 10^{-3}}$$

$$FRR_{SIF-01} = 109$$

El lazo de seguridad de la Figura 9-2 alcanza un nivel SIL 2 de seguridad.



**Figura 9-2:** Lazo de seguridad 01

Realizado por: Ojeda, 2017.

## SIF-02

En la Tabla 67-2 se define la estructura del diseño asignada a la función instrumentada de seguridad SIF-02.

**Tabla 67-2:** Estructura de la SIF-02

Sub-sistema Detección		Sub-sistema Lógica	Sub-sistema Actuación	
Sensor	Votación		Votación	Válvulas
PDZIT-04003	1oo1	PLC DE SEGURIDAD	2oo2	ESDV-04003
				MOV-04001

Realizado por: Ojeda, 2017

Mediante el uso de la Ecuación 8-1 obtenemos la  $PFD_{avg}$  de mi función instrumentada de seguridad:

$$PFD_{SIF-02} = PFD_S + PFD_L + PFD_{FE}$$

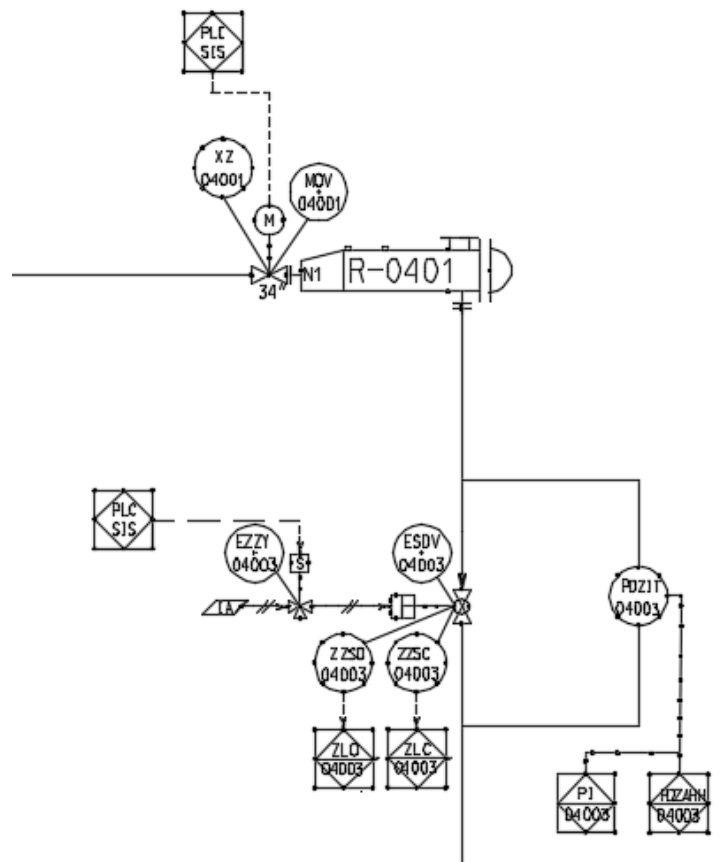
$$PFD_{SIF-02} = 1,266 \times 10^{-3} + 6,95 \times 10^{-5} + 2,34 \times 10^{-2}$$

$$PFD_{SIF-02} = 24,74 \times 10^{-3}$$

$$FRR_{SIF-02} = \frac{1}{24,74 \times 10^{-3}}$$

$$FRR_{SIF-01} = 40$$

El lazo de seguridad de la Figura 10-2 alcanza un nivel SIL 1 de seguridad.



**Figura 10-2:** Lazo de seguridad 02

Realizado por: Ojeda, 2017.

### SIF-03

En la Tabla 68-2 se define la estructura del diseño asignada a la función instrumentada de seguridad SIF-03.

**Tabla 68-2:** Estructura de la SIF-03

Sub-sistema Detección		Sub-sistema Lógica	Sub-sistema Actuación	
Sensor	Votación		Votación	Válvula
PZIT-04661A	1oo2	SPLC DE SEGURIDAD	1oo1	MOV-04661
PZIT-04661B				
FZIT-04661	1oo1			

Realizado por: Ojeda, 2017

Mediante el uso de la Ecuación 8-1 obtenemos la  $PFD_{avg}$  de mi función instrumentada de seguridad:

$$PFD_{SIF-03} = PFD_S + PFD_L + PFD_{FE}$$

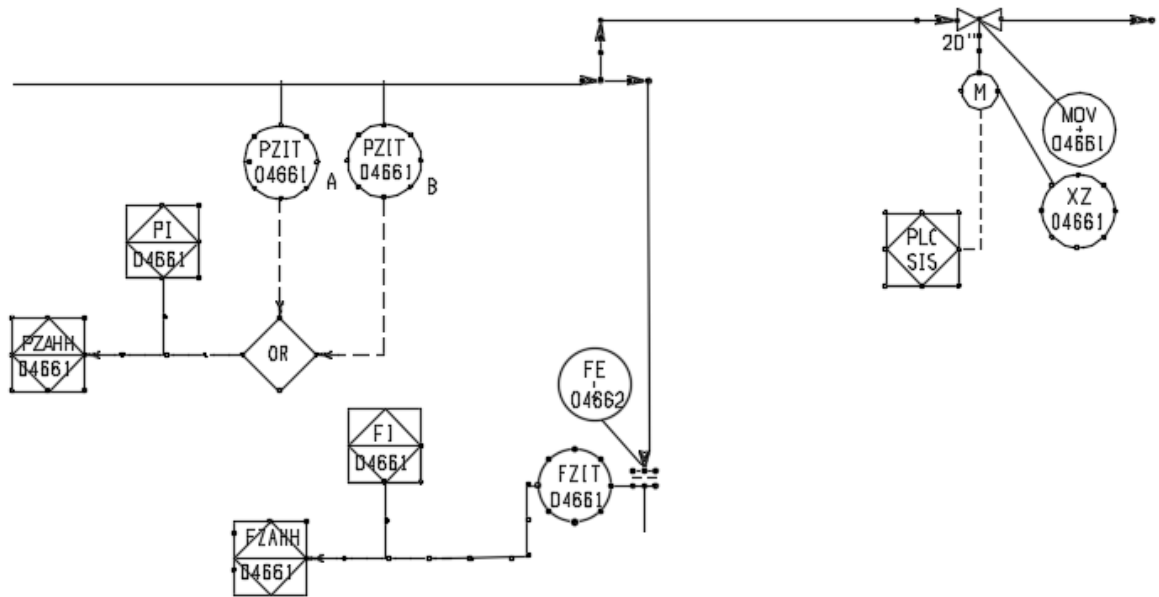
$$PFD_{SIF-03} = 1,037 \times 10^{-7} + 6,95 \times 10^{-5} + 9,601 \times 10^{-4}$$

$$PFD_{SIF-03} = 1,03 \times 10^{-3}$$

$$FRR_{SIF-03} = \frac{1}{24,74 \times 10^{-3}}$$

$$FRR_{SIF-03} = 970$$

El lazo de seguridad de la Figura 11-2 alcanza un nivel SIL 2 de seguridad.



**Figura 11-2:** Lazo de seguridad 03

Realizado por: Ojeda, 2017.

## SIF-04

En la Tabla 69-2 se define la estructura del diseño asignada a la función instrumentada de seguridad SIF-04.

**Tabla 69-2:** Estructura de la SIF-04

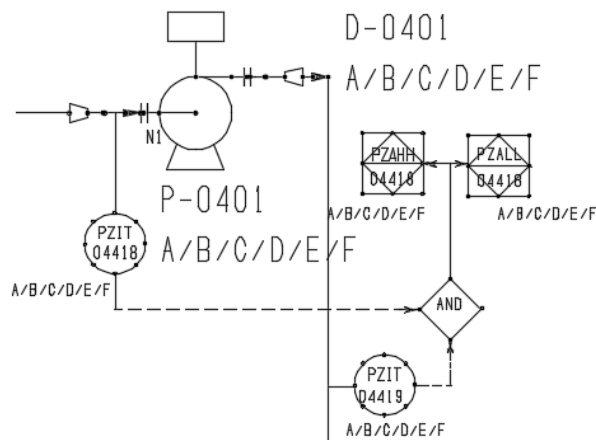
Sub-sistema Detección		Sub-sistema Lógica	Sub-sistema Actuación	
Sensor	Votación		Votación	Válvula
PZIT-04418 A/B/C/D/E/F	2oo2	SPLC DE SEGURIDAD	1oo1	ESDV-0404
PZIT-04419 A/B/C/D/E/F				

Realizado por: Ojeda, 2017

Mediante el uso de la Ecuación 8-1 obtenemos la  $PFD_{avg}$  de mi función instrumentada de seguridad:

$$\begin{aligned}
 PFD_{SIF-03} &= PFD_S + PFD_L + PFD_{FE} \\
 PFD_{SIF-03} &= 2,532 \times 10^{-3} + 6,95 \times 10^{-5} + 8,95 \times 10^{-3} \\
 PFD_{SIF-03} &= 11,55 \times 10^{-3} \\
 FRR_{SIF-03} &= \frac{1}{11,55 \times 10^{-3}} \\
 FRR_{SIF-03} &= 86
 \end{aligned}$$

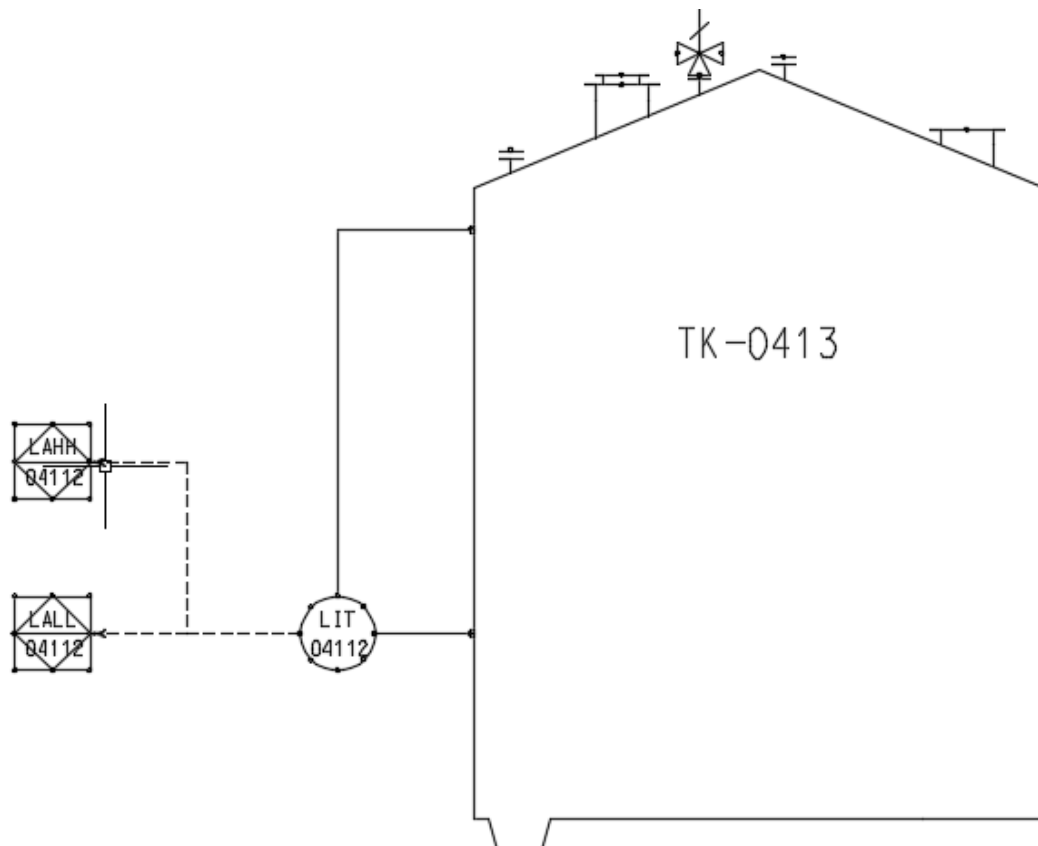
El lazo de seguridad de la Figura 12-2 alcanza un nivel SIL 1 de seguridad.



**Figura 12-2:** Lazo de seguridad 04

Realizado por: Ojeda, 2017.

En la Figura 13-2 se observa el traslado de la señal de nivel del tanque de alivio de la estación Páramo que se ha Recomendado.

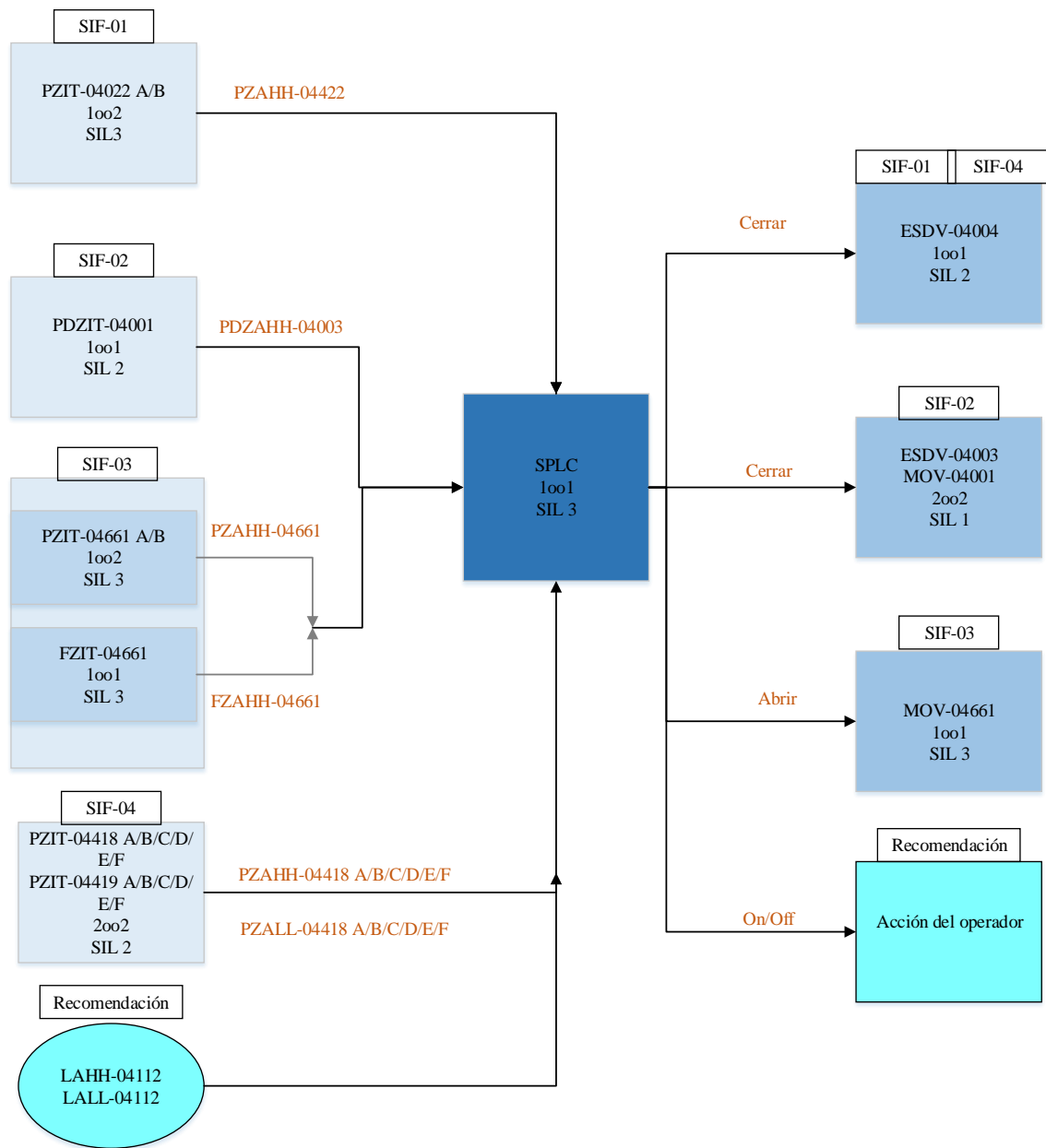


**Figura 13-2:** Recomendación

Realizado por: Ojeda, 2017.

### 2.7.3 Diseño del diagrama de bloques del SIS

Al acoplar las diferentes funciones instrumentadas de seguridad diseñadas y la recomendación en una única estructura se procede a diseñar el diagrama de bloques del Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS), como se observa en la Figura 14-2 se identifica cada una de las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIFs) con el Tag de las alarmas de demanda, su configuración y la acción a ejecutar por los elementos finales para llevar a estado seguro a los sistemas en caso de ser necesario.



**Figura 14-2:** Diseño general del SIS

Realizado por: Ojeda, 2017.

## CAPÍTULO III

### **3. MARCO DE RESULTADOS, DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **3.1 Introducción**

En el presente capítulo se formalizó el análisis pertinente para verificar la reducción de riesgo en los sistemas principales del transporte de hidrocarburo, a su vez se describe los resultados que han sido obtenidos después de la ejecución de la fase uno de la Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (PMBOK) en el Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) del control de procesos de la estación de bombeo “Páramo” y un análisis económico de factibilidad del proyecto para Oleoducto de Crudos Pesados (OCP).

Al comprobar la efectividad del sistema instrumentado de seguridad desarrollado para la estación de transferencia de crudo pesado “Páramo” se procede a dar soluciones en el campo de la seguridad funcional de procesos y seguridad funcional de sistemas electrónicos programables conforme a estándares pertenecientes a la Comisión Electrotécnica Internacional.

#### **3.2 Funciones instrumentadas de seguridad (SIF)**

Previamente realizado el diseño de las funciones instrumentadas de seguridad se obtienen las particularidades basadas en las normas IEC: 615011 e IEC: 61508, las cuales son necesarias para poder definir las características que deben cumplir la instrumentación de los lazos de seguridad pertenecientes al Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) expuesto el resultado como ingeniería del detalle.

La ingeniería del detalle del subsistema de lógica de la Tabla 1-3 es común para todas las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF) pertenecientes al Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) de “Páramo”.



**Tabla 1-3:** Ingeniería del detalle del subsistema de lógica

SUBSISTEMA DE LÓGICA						
Tag	Safety PLC Quantum		Votación	1oo1	Fracción de falla segura (SFF)	> 98%
Cobertura de diagnóstico (DC)	90%		MTTFs	5 años	PTI(Proof test interval)	12 meses
PFDavg	$6,95 \times 10^{-6}$		FRR	14388	Nivel SIL	SIL 3
MTTR	24 hr	$\lambda$	-	$\beta$	2% $\beta_D$	-
Diagnóstico de lógica sobre el de detección	Según NAMUR NE 43 o similar + comparación y discrepancia de canales, bloqueo.					
Alarmas de lógica	Según diagnóstico cuando sea posible.					
Alarmas de actuación	Según diagnóstico.					
Alarmas de actuación	Repetir alarmas en el BPCS y señal de indicación de disparo.					

Realizado por: Ojeda, 2017

### 3.2.1 Ingeniería del detalle de la SIF-01

En la Tabla 2-3 se detallan las características de la SIF-01, donde se puede identificar las particularidades de la función instrumentada de seguridad para que el proceso de recepción de crudo se establezca en niveles de riesgo tolerables.

**Tabla 2-3:** Ingeniería del detalle de la SIF-01

SIF-01			
Tag	PZAHH-04022	P&ID	2745-R-DP-4001
Nodo	1	PFDavg	$9,15 \times 10^{-3}$
SIL	SIL 2	FRR	109
Modo de operación	Demanda	Punto de disparo	424 PSI
PTI	1 año	Tipo de disparo	DE-T-T
MTTFs	5 años	MTTR (max)	24 hr
Rango de operación		0 PSI a 407 PSI	

Realizado por: Ojeda, 2017

En la Tabla 3-3 se detallan las singularidades resultantes del diseño específico del subsistema de detección de la SIF-01 los mismos que facilitan la selección de equipos de seguridad.

**Tabla 3-3:** Subsistema de detección de la SIF-01

SUBSISTEMA DE DETECCIÓN						
Tag	PZIT-04022 A/B		Votación	1oo2	Fración de falla segura (SFF)	80%
Cobertura de diagnóstico (DC)	60%		MTTFs	5 años	PTI(Proof test interval)	3 meses
PFDAvg	$126 \times 10^{-6}$		FRR	7980	Nivel SIL	SIL 3
MTTR	24 hr	$\lambda$	$5,48 \times 10^{-6}$ [1/hr]	$\beta$	10% $\beta_D$	5%
Diagnóstico de detección (DT)	Según NAMUR NE 43 o similar (como mínimo alarmas por sobre rango, bajo rango, cable cortado, cable a tierra, pérdida de energía )					

Realizado por: Ojeda, 2017

En la tabla 4-3 se muestran las características de la instrumentación del subsistema de actuación de la SIF-01 que lleva a un estado seguro al proceso, los mismos que facilitan la selección de equipos de seguridad.

**Tabla 4-3:** Subsistema de actuación de la SIF-01

SUBSISTEMA DE ACTUACIÓN						
Tag	ESDV-04004		Votación	1oo1	Fración de falla segura (SFF)	$80\% < SFF < 90\%$
Cobertura de diagnóstico (DC)	90%		MTTFs	5 años	PTI(Proof test interval)	6 meses
PFDAvg	$8,95 \times 10^{-3}$		FRR	111	Nivel SIL	SIL 2
MTTR	24 hr	$\lambda$	-	$\beta$	- $\beta_D$	-
Diagnóstico de detección (DT)	Según NAMUR NE 43 o similar (como mínimo alarmas por sobre rango, bajo rango, cable cortado, cable a tierra, pérdida de energía).					
Características del elemento motriz	Dos (2) electro-válvulas o solenoides neumáticos normalmente cerrada (NC), compuesta cada una de 1 válvula de tres vías de dos posiciones (3/2) y bobina sencilla, 24 VDC. Votación 1oo2 entre ellas.					

Realizado por: Ojeda, 2017

### 3.2.2 Ingeniería del detalle de la SIF-02

En la Tabla 5-3 se detallan las características de la SIF-02, donde se puede identificar las particularidades de la función instrumentada de seguridad para que el proceso de ecualización de presiones para recepción del raspador que se identificó en el nodo 1 se establezca en niveles de riesgo tolerables.

**Tabla 5-3:** Ingeniería del detalle de la SIF-02

SIF-02			
Tag	PDZAHH-04003	P&ID	2745-R-DP-4001
Nodo	1	PFDAvg	$24,74 \times 10^{-3}$
SIL	SIL 1	FRR	40
Modo de operación	Demanda	Punto de disparo	Por definir
PTI	1 año	Tipo de disparo	DE-T-T
MTTFs	5 años	MTTR (max)	24 hr
Rango de operación		0 PSI (ideal)	

Realizado por: Ojeda, 2017

En la Tabla 6-3 se detallan las singularidades resultantes del diseño específico del subsistema de detección de la SIF-02 los mismos que facilitan la selección de equipos de seguridad.

**Tabla 6-3:** Subsistema de detección de la SIF-02

SUBSISTEMA DE DETECCIÓN					
Tag	PDZIT-04003	Votación	1oo1	Fracción de falla segura (SFF)	80%
Cobertura de diagnóstico (DC)	60%	MTTFs	5 años	PTI(Proof test interval)	3 meses
PFDAvg	$1,27 \times 10^{-3}$	FRR	790	Nivel SIL	SIL 2
MTTR	24 hr	$\lambda$	$5,48 \times 10^{-6}$ [1/hr]	$\beta$	-
Diagnóstico de detección (DT)	Según NAMUR NE 43 o similar (como mínimo alarmas por sobre rango, bajo rango, cable cortado, cable a tierra, pérdida de energía )				

Realizado por: Ojeda, 2017

En la tabla 7-3 se muestran las características de la instrumentación del subsistema de actuación que lleva a un estado seguro al proceso, los mismos que facilitan la selección de equipos de seguridad.

**Tabla 7-3:** Subsistema de actuación de la SIF-02

SUBSISTEMA DE ACTUACIÓN					
Tag	ESDV-04003 MOV-04001	Votación	2oo2	Fracción de falla segura (SFF)	70% < SFF < 90%
Cobertura de diagnóstico (DC)	90%	MTTFs	5 años	PTI(Proof test interval)	12 meses
PFDavg	$2,34 \times 10^{-2}$	FRR	43	Nivel SIL	SIL 1
MTTR	24 hr	$\lambda$	-	$\beta$	-
Diagnóstico de detección (DT)	Según NAMUR NE 43 o similar (como mínimo alarmas por sobre rango, bajo rango, cable cortado, cable a tierra, pérdida de energía).				
Características del elemento motriz	ESDV-04003: Dos (2) electro-válvulas o solenoides neumáticos normalmente cerrada (NC), compuesta cada una de 1 válvula de tres vías de dos posiciones (3/2) y bobina sencilla, 24 VDC. Votación 1oo2 entre ellas. MOV-04001: Relé normalmente cerrado (NC), 24 VDC y votación 1oo1.				

Realizado por: Ojeda, 2017

### 3.2.3 Ingeniería del detalle de la SIF-03

En la Tabla 8-3 se detallan las características de la SIF-03 donde se puede identificar las particularidades de la función instrumentada de seguridad perteneciente al nodo 3 en el proceso del intercambiador de calor se establezca en niveles de riesgo tolerables.

**Tabla 8-3:** Ingeniería del detalle de la SIF-03

SIF-03			
Tag	PZAHH-04661 FZAHH-04661	P&ID	2745-R-DP-4019
Nodo	3	PFDavg	$1,03 \times 10^{-3}$
SIL	SIL 2	FRR	970
Modo de operación	Demanda	Punto de disparo	416 PSI 6875 BBL/H
PTI	1 año	Tipo de disparo	E-T-T
MTTFs	5 años	MTTR (max)	24 hr
Rango de operación		0 PSI a 4007 PSI 6458 a 800 BBL/H	

Realizado por: Ojeda, 2017

En la Tabla 9-3 y Tabla 10-3 se detallan las singularidades resultantes del diseño específico de los subsistemas de detección de la SIF-03 los mismos que facilitan la selección de equipos de seguridad.

**Tabla 9-3:** Subsistema uno de detección de la SIF-03

SUBSISTEMA DE DETECCIÓN						
Tag	FZIT-04661		Votación	1oo1	Fracción de falla segura (SFF)	80%
Cobertura de diagnóstico (DC)	60%		MTTFs	5 años	PTI(Proof test interval)	3 meses
PFDAvg	$8,203 \times 10^{-4}$		FRR	1219	Nivel SIL	SIL 2
MTTR	24 hr	$\lambda$	$3,55 \times 10^{-6}$ [1/hr]	$\beta$	-	$\beta_D$
Diagnóstico de detección (DT)	Según NAMUR NE 43 o similar (como mínimo alarmas por sobre rango, bajo rango, cable cortado, cable a tierra, pérdida de energía )					

Realizado por: Ojeda, 2017

**Tabla 10-3:** Subsistema dos de detección de la SIF-03

SUBSISTEMA DE DETECCIÓN						
Tag	PZIT-04661 A/B		Votación	1oo2	Fracción de falla segura (SFF)	80%
Cobertura de diagnóstico (DC)	60%		MTTFs	5 años	PTI(Proof test interval)	3 meses
PFDAvg	$126 \times 10^{-6}$		FRR	7980	Nivel SIL	SIL 3
MTTR	24 hr	$\lambda$	$5,48 \times 10^{-6}$ [1/hr]	$\beta$	10%	$\beta_D$
Diagnóstico de detección (DT)	Según NAMUR NE 43 o similar (como mínimo alarmas por sobre rango, bajo rango, cable cortado, cable a tierra, pérdida de energía )					

Realizado por: Ojeda, 2017

En la Tabla 11-3 se muestran las características de la instrumentación del subsistema de actuación que lleva a un estado seguro al proceso de la SIF-03, los mismos que facilitan la selección de equipos de seguridad.

**Tabla 11-3:** Subsistema de actuación de la SIF-03

SUBSISTEMA DE ACTUACIÓN						
Tag	MOV-04661	Votación	1oo1	Fracción de falla segura (SFF)		95%
Cobertura de diagnóstico (DC)	90%	MTTFs	5 años	PTI(Proof test interval)		3 meses
PFDavg	$9,601 \times 10^{-2}$	FRR	1042	Nivel SIL		SIL 3
MTTR	24 hr	$\lambda$	$18,57 \times 10^{-4}$	$\beta$	-	$\beta_D$
Diagnóstico de detección (DT)	Según NAMUR NE 43 o similar (como mínimo alarmas por sobre rango, bajo rango, cable cortado, cable a tierra, pérdida de energía).					
Características del elemento motriz	Definir desde fábrica para alcanzar el nivel de integridad de seguridad deseado.					

Realizado por: Ojeda, 2017

### 3.2.4 Ingeniería del detalle de la SIF-04

En la Tabla 12-3 se detallan las características de la SIF-04 donde se puede identificar las particularidades de la función instrumentada de seguridad perteneciente al nodo 4 en la etapa de las bombas principales se establezca en niveles de riesgo tolerables.

**Tabla 12-3:** Ingeniería del detalle de la SIF-04

SIF-04			
Tag	PZAHH-04418 FZALL-04418	P&ID	2745-R-DP-4007 2745-R-DP-4008
Nodo	4	PFDavg	$11,55 \times 10^{-3}$
SIL	SIL 1	FRR	86
Modo de operación	Demanda	Punto de disparo	58 PSI 1862 PSI
PTI	1 año	Tipo de disparo	DE-T-T
MTTFs	5 años	MTTR (max)	24 hr
Rango de operación		407 PSI a 75 PSI 0 PSI a 1782 PSI	

Realizado por: Ojeda, 2017

En la Tabla 13-3 se detallan las singularidades resultantes del diseño específico del subsistema de detección los mismos que facilitan la selección de equipos de seguridad.

**Tabla 13-3:** Subsistema de detección de la SIF-04

SUBSISTEMA DE DETECCIÓN						
Tag	PZIT-04418 A/B/C/D/E/F PZIT-04419 A/B/C/D/E/F		Votación	2oo2	Fracción de falla segura (SFF)	80%
Cobertura de diagnóstico (DC)	60%		MTTFs	5 años	PTI(Proof test interval)	3 meses
PFDAvg	$2,532 \times 10^{-3}$		FRR	395	Nivel SIL	SIL 2
MTTR	24 hr	$\lambda$	$5,48 \times 10^{-6}$ [1/hr]	$\beta$	-	$\beta_D$
Diagnóstico de detección (DT)	Según NAMUR NE 43 o similar (como mínimo alarmas por sobre rango, bajo rango, cable cortado, cable a tierra, pérdida de energía )					

Realizado por: Ojeda, 2017

En la tabla 14-3 se muestran las características de la instrumentación del subsistema de actuación que lleva a un estado seguro al proceso de la SIF-04, los mismos que facilitan la selección de equipos de seguridad.

**Tabla 14-3:** Subsistema de actuación de la SIF-04

SUBSISTEMA DE ACTUACIÓN						
Tag	ESDV-04004		Votación	1oo1	Fracción de falla segura (SFF)	$80\% < SFF < 90\%$
Cobertura de diagnóstico (DC)	90%		MTTFs	5 años	PTI(Proof test interval)	6 meses
PFDAvg	$8,95 \times 10^{-3}$		FRR	111	Nivel SIL	SIL 2
MTTR	24 hr	$\lambda$	-	$\beta$	-	$\beta_D$
Diagnóstico de detección (DT)	Según NAMUR NE 43 o similar (como mínimo alarmas por sobre rango, bajo rango, cable cortado, cable a tierra, pérdida de energía).					
Características del elemento motriz	Dos (2) electro-válvulas o solenoides neumáticos normalmente cerrada (NC), compuesta cada una de 1 válvula de tres vías de dos posiciones (3/2) y bobina sencilla, 24 VDC. Votación 1oo2 entre ellas.					

Realizado por: Ojeda, 2017

### 3.3 Arquitectura del Sistema Instrumentado de Seguridad

La arquitectura del Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) se puede observar en la Figura 1-3, cabe indicar que se ha separado en tres etapas las cuales contienen los subsistemas de detección, lógica y actuación, con la correspondiente identificación de los equipos y configuración de diseño de las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIFs) pertenecientes al Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) de la estación de bombeo “Páramo”.

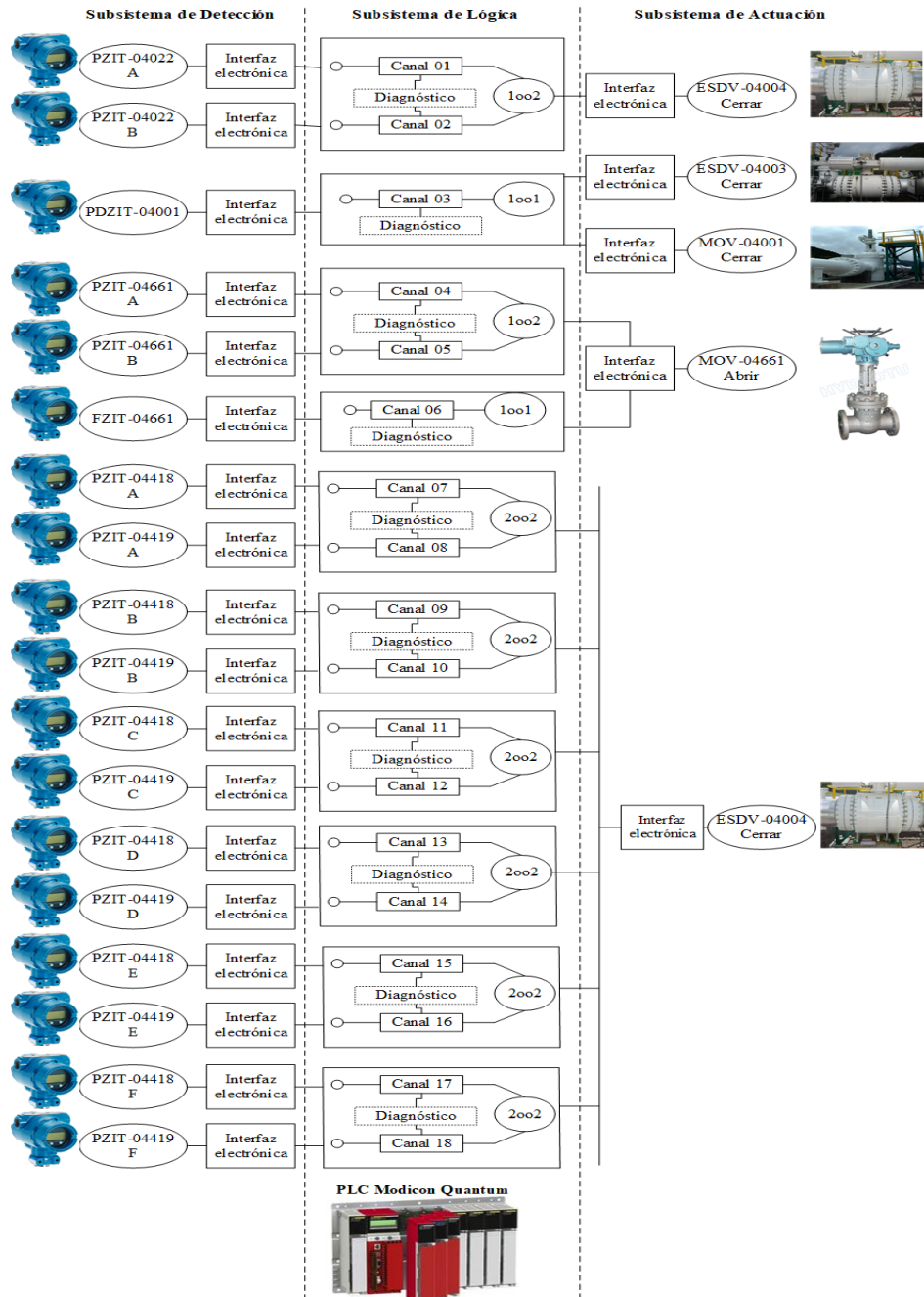


Figura 1-3: Arquitectura del SIS

Realizado por: Ojeda 2017



### 3.4 Evaluación del Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS)

#### 3.4.1 Análisis de la reducción de riesgo

La verificación de la reducción de riesgo que aporta cada una de las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF) ante las diferentes causas y desviaciones identificadas en los nodos de la estación PS-4 se realizara mediante el Análisis de Capas de Protección (LOPA) desarrollado con anterioridad en el Capítulo dos, con la variación de que se debe agregar al campo perteneciente a las Capas de Protección Independientes (IPLs) la Probabilidad de Falla en Demanda Promedio (PFDavg) de la SIF diseñada para el caso en específico, como se observa en la Tabla 15-3, Tabla 16-3, Tabla 17-3 y Tabla 18-3.

#### Reducción de riesgo de la SIF-01

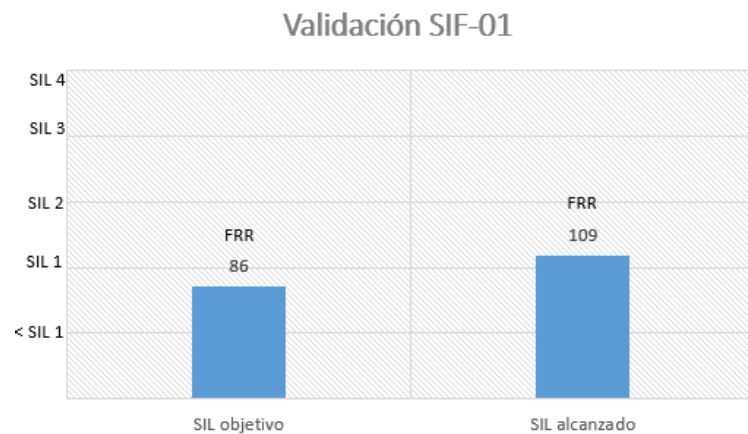
En la Tabla 15-3 se observa que al agregar la Probabilidad de Falla en Demanda Promedio (PFDavg) de la SIF-01 como Capa Independiente de Protección (IPL) en el Análisis de Capas de Protección (LOPA), el nuevo Nivel de Integridad de Seguridad (SIL) objetivo calculado ha sido reducido a un SIL 0, por lo que el proceso se encuentra en niveles de riesgo tolerables.

**Tabla 15-3:** Verificación SIL Objetivo SIF-01

#Nodo-Causa	Desviación	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)	Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar (or)	Capas Independientes de Protección (IPL)				Prob. de Eventos Intermedios (br)	SIL (objetivo)	FRR						
							Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR	PFD									
1-3	Más Presión	Personal	4	1,00E-04	Taponamiento del Filtro F-0404	1,47E-01	Factor de ocupación	5,83E-01	8,56E-02	SIF-01	109	9,15E-03	7,83E-04	SIL 0	8							
		Ambiente	1	1,00E-01												1,00E+00	1,47E-01	109	9,15E-03	1,34E-03	SIL 0	0
		Activos	2	1,00E-02																		

Realizado por: Ojeda, 2017

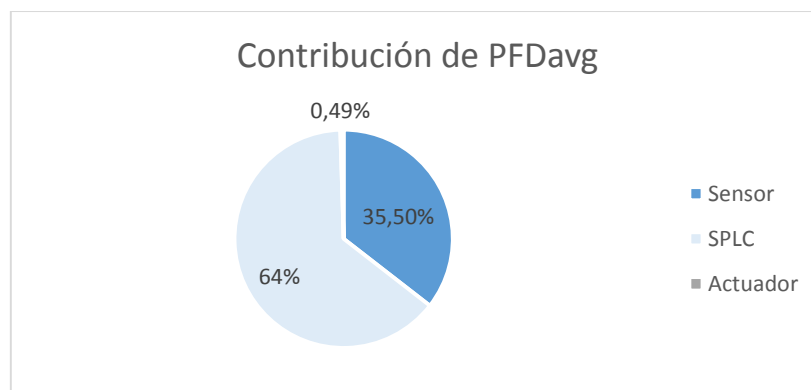
En el Gráfico 1-3 se aprecia que mediante el diseño de la SIF-01 en base a los estándares internacionales IEC: 61508, IEC: 61511 y ANSI/ISA-S84 se alcanza un nivel SIL 2 al obtener un Factor de Reducción de Riesgo (FRR) de ciento diecinueve (119), el cual es mayor al Factor de Reducción de Riesgo (FRR) objetivo encontrando en Análisis de Capas de Protección (LOPA) que corresponde a un valor de ochenta y seis (86), por lo que se determina que la SIF-01 es efectiva para la reducción de riesgo en el proceso de recibimiento de crudo en la estación “Páramo”.



**Gráfico 1-3:** Validación de SIF-01

Realizado por: Ojeda, 2017.

En el Grafico 2-3 se observa la contribución de la Probabilidad de Falla en Demanda Promedio (PFDavg) de cada uno de los subsistemas de detección, lógica y actuación que pertenecen a la SIF-01, se identifica que el Safety PLC (SPLC) es el elemento con mayor integridad de seguridad al aportar con 64% de la PFDavg total a la Función Instrumentada de Seguridad (SIF), por lo que su contribución es notablemente superior en contraste a la del elemento de actuación que agrega tan solo un 0,49% de la PFDavg al lazo de seguridad, esto debido a que la ESDV-04004 es un equipo ya instalado en campo el cual ha sido reutilizado.



**Gráfico 2-3:** Contribución PFDavg de elementos de la SIF-01

Realizado por: Ojeda, 2017.

## Reducción de riesgo de la SIF-02

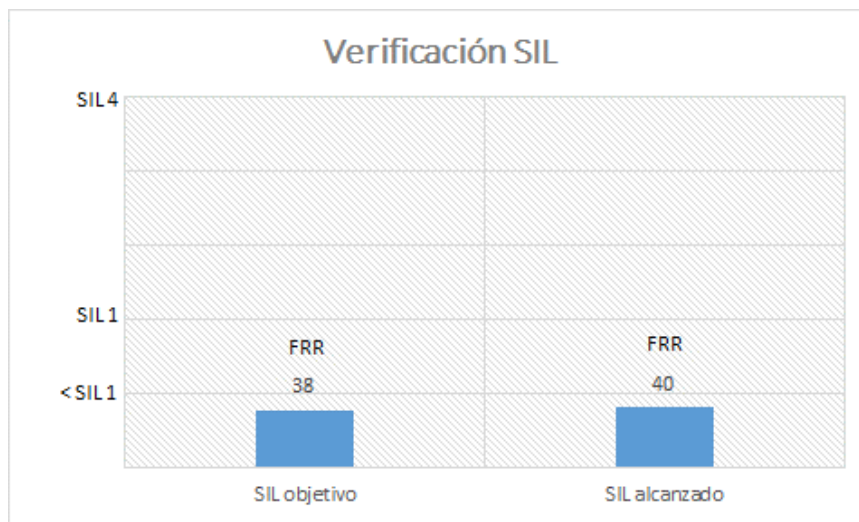
En la Tabla 16-3 se observa que al agregar la Probabilidad de Falla en Demanda Promedio (PFDavg) de la SIF-02 como Capa Independiente de Protección (IPL) en el Análisis de Capas de Protección (LOPA), el nuevo Nivel de Integridad de Seguridad (SIL) calculado ha sido reducido a un SIL 0 por lo que el proceso se encuentra en niveles de riesgo tolerables.

**Tabla 16-3:** Verificación SIL Objetivo SIF-02

#Nodo-Causa	Desviación	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Causa	Frec. Evento Iniciante ( $\nu_r$ )	Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar ( $\omega_r$ )	Capas Independientes de Protección (IPL)			Prob. de Eventos Intermedios ( $\beta_r$ )	SIL (Objetivo)	FRR
							Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR			
1-7	Más Presión	Personal	5	1,00E-05	Error operativo al ecualizar las presiones durante la preparación de la trampa R-0401 para recibir marrano	1,00E-02	Factor de Ocupación	3,84E-02	3,84E-04	SIF-02	40	2,47E-02	9,49E-06	SIL 0	1
		Ambiente	2	1,00E-02							40	2,47E-02	2,47E-04	SIL 0	0
		Activos	3	1,00E-03							40	2,47E-02	2,47E-04	SIL 0	0
			0	1,00E+00											

**Realizado por:** Ojeda, 2017

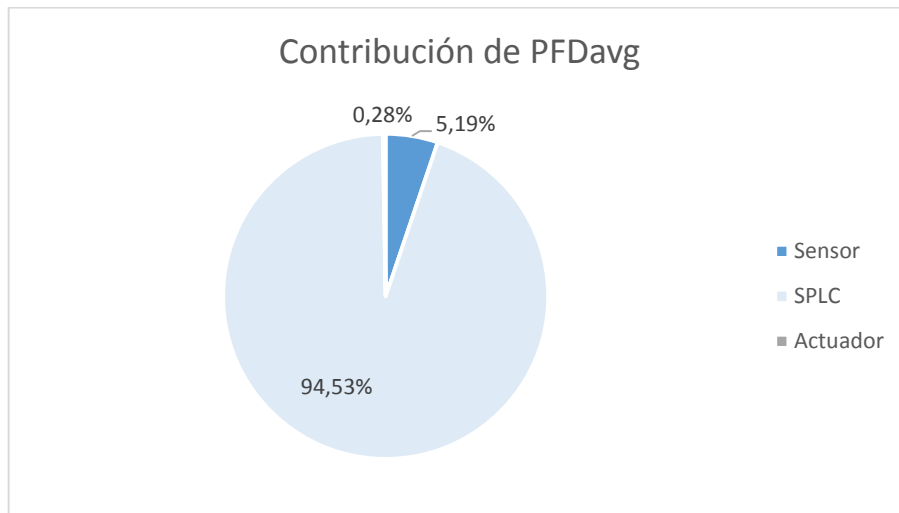
En el Gráfico 3-3 se verifica que mediante el diseño de la SIF-02 en base a los estándares internacionales IEC: 61508, IEC: 61511 y ANSI/ISA-S84 se alcanza un nivel SIL 1 al obtener un Factor de Reducción de Riesgo (FRR) de cuarenta (40), el cual es apenas mayor al Factor de Reducción de Riesgo (FRR) objetivo encontrando en Análisis de Capas de Protección (LOPA) que corresponde a un valor de treinta y ocho (38), por lo que se determina que la SIF-02 es efectiva para la reducción de riesgo en el proceso de ecualización de presiones de la estación “Páramo”.



**Gráfico 3-3:** Validación de SIF-02

**Realizado por:** Ojeda, 2017.

En el Grafico 4-3 se observa la contribución de la Probabilidad de Falla en Demanda Promedio (PFDavg) de cada uno de los subsistemas de detección, lógica y actuación que pertenecen a la SIF-02, se identifica que el Safety PLC (SPLC) es el elemento que tiene mayor integridad de seguridad al aportar con 94,53% de la PFDavg total a la Función Instrumentada de Seguridad (SIF) al tener un nivel SIL3, por lo que su contribución es notablemente superior en contraste a la de los subsistemas de detección y actuación que en conjunto aportan con un 5,47%.



**Gráfico 4-3:** Contribución PFDavg de elementos de la SIF-02

Realizado por: Ojeda, 2017.

### Reducción de riesgo de la SIF-03

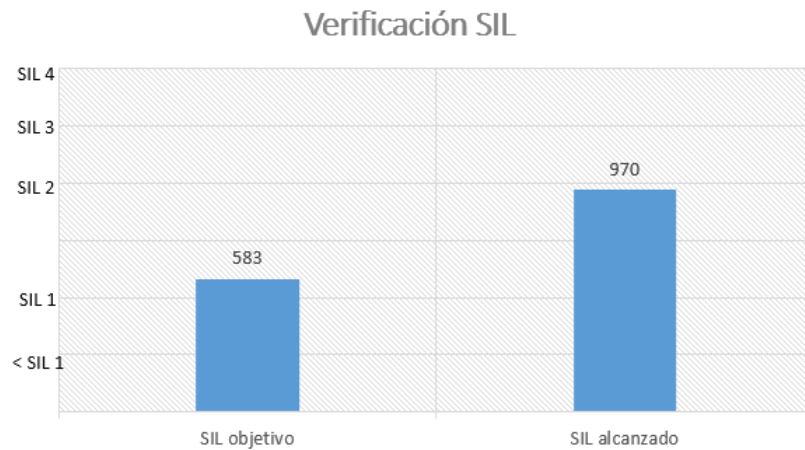
En la Tabla 17-3 se observa que al agregar la Probabilidad de Falla en Demanda Promedio (PFDavg) de la SIF-03 como Capa Independiente de Protección (IPL) en el Análisis de Capas de Protección (LOPA), el nuevo Nivel de Integridad de Seguridad (SIL) calculado ha sido reducido a un SIL 0 por lo que el proceso se encuentra en niveles de riesgo tolerables.

**Tabla 17-3:** Verificación SIL Objetivo SIF-03

#Nodo-Causa	Desviación	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)	Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar (or)	Capas Independientes de Protección (IPL)			Prob. de Eventos Intermedios (Br)	SIL (Objetivo)	FRR
							Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR			
3-3	Más Presión	Personal	4	1,00E-04	Falla de la FV-04661	0,10	Factor ocupación	5,83E-01	5,83E-02	SIF-03	970	1,03E-03	6,01E-05	SIL 0	1
		Ambiente	1	1,00E-01			1,00E+00	1,00E-01	970		1,03E-03	1,03E-04	SIL 0	0	
		Activos	2	1,00E-02			1,00E+00	1,00E-01	970		1,03E-03	1,03E-04	SIL 0	0	
			0	1,00E+00											

Realizado por: Ojeda, 2017

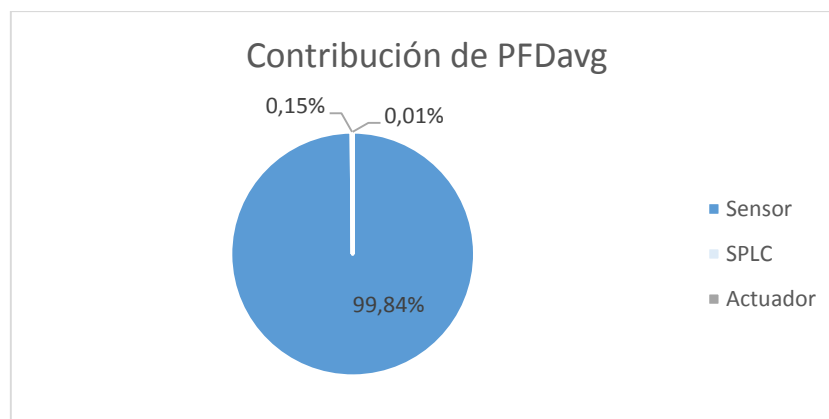
En el Gráfico 5-3 se verifica que mediante el diseño de la SIF-03 en base a los estándares internacionales IEC: 61508, IEC: 61511 y ANSI/ISA-S84 se alcanza un nivel SIL 2 al obtener un Factor de Reducción de Riesgo (FRR) de novecientos setenta (970), el cual es mucho mayor al Factor de Reducción de Riesgo (FRR) objetivo encontrando en Análisis de Capas de Protección (LOPA) que corresponde a un valor de quinientos ochenta y tres (583), por lo que se determina que la SIF-03 es efectiva para la reducción de riesgo en el proceso del intercambiador de calor en la estación “Páramo”.



**Gráfico 5-3:** Validación de SIF-03

Realizado por: Ojeda, 2017.

En el Grafico 6-3 se observa la contribución de la Probabilidad de Falla en Demanda Promedio (PFDavg) de cada uno de los subsistemas de detección, lógica y actuación que pertenecen a la SIF-04, se identifica que el Safety PLC (SPLC) es el elemento que tiene mayor integridad de seguridad al aportar con 99,84% de la PFDavg total a la Función Instrumentada de Seguridad (SIF) al tener un nivel SIL3, por lo que su contribución es notablemente superior en contraste a la de los subsistemas de detección y actuación que en conjunto aportan con un 0,16%.



**Gráfico 6-3:** Contribución PFDavg de elementos de la SIF-03

Realizado por: Ojeda, 2017.

## Reducción de riesgo de la SIF-04

En la Tabla 18-3, Tabla 19-3 y Tabla 20.3 se observa que al agregar la Probabilidad de Falla en Demanda Promedio (PFDavg) de la SIF-04 como Capa Independiente de Protección (IPL) en el Análisis de Capas de Protección (LOPA) de la causa 1, 2 y 4 el nuevo Nivel de Integridad de Seguridad (SIL) calculado ha sido reducido a un SIL 0 por lo que el proceso se encuentra en niveles de riesgo tolerables.

**Tabla 18-3:** Verificación SIL Objetivo SIF-04 causa 1

#Nodo-Causa	Desviación	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)	Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar (or)	Capas Independientes de Protección (IPL)				Prob. de Eventos Intermedios (βr)	SIL (Objetivo)	FRR		
							Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR	PFD					
4-1	Más Presión	Personal	4	1,00E-04	Cierre de la Mov-04410 A/F	5,00E-02	Factor de ocupación	4,20E-01	2,10E-02	SIF-04	86	1,15E-02	2,413E-04	SIL 0	2			
		Ambiente	1	1,00E-01										86	1,15E-02	5,750E-04	SIL 0	0
		Activos	2	1,00E-02										86	1,15E-02	5,750E-04	SIL 0	0
			0	1,00E+00														

Realizado por: Ojeda, 2017

**Tabla 19-3:** Verificación SIL Objetivo SIF-04 causa 2

#Nodo-Causa	Desviación	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)	Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar (or)	Capas Independientes de Protección (IPL)				Prob. de Eventos Intermedios (βr)	SIL (Objetivo)	FRR		
							Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR	PFD					
4-2	Más Presión	Personal	4	1,00E-04	Taponamiento del filtro cono de bruja de succión de la bomba P-0401 A/F	0,1	Factor ocupación	4,20E-01	4,20E-02	SIF0-04	86	1,15E-02	4,83E-04	SIL 0	5			
		Ambiente	1	1,00E-01										86	1,15E-02	1,15E-03	SIL 0	0
		Activos	2	1,00E-02										86	1,15E-02	1,15E-03	SIL 0	0
			0	1,00E+00														

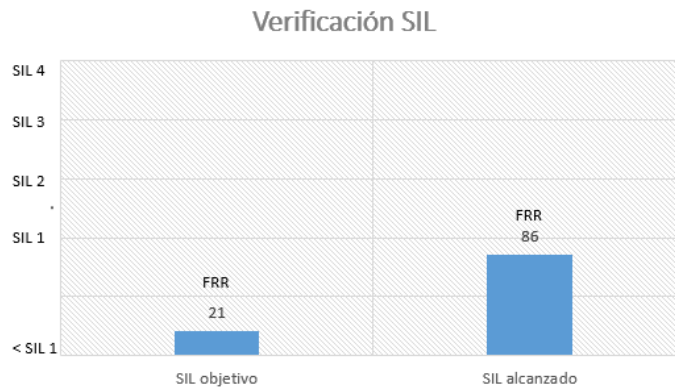
Realizado por: Ojeda, 2017

**Tabla 20-3:** Verificación SIL Objetivo SIF-04 causa 4

#Nodo-Causa	Desviación	Categoría	Nivel de Severidad	AFO	Causa	Frec. Evento Iniciante (yr)	Modificador Condicional (Mc)		Frec. Sin Mitigar (or)	Capas Independientes de Protección (IPL)				Prob. de Eventos Intermedios (βr)	SIL (Objetivo)	FRR		
							Descripción	Probabilidad		Tag	Descripción	FRR	PFD					
4-4	Más Presión	Personal	4	1,00E-04	Cierre de la Mov-04415 A/F	5,00E-02	Factor de ocupación	4,20E-01	2,10E-02	SIF-04	86	1,15E-02	2,41E-04	SIL 0	2			
		Ambiente	1	1,00E-01										86	1,15E-02	5,75E-04	SIL 0	0
		Activos	1	1,00E-01										86	1,15E-02	5,75E-04	SIL 0	0
			0	1,00E+00														
			4	1,00E-04										86	1,15E-02	5,75E-04	SIL 0	6
			1	1,00E-01										86	1,15E-02	5,75E-04	SIL 0	0
	Más Presión	Personal	4	1,00E-04														
		Ambiente	1	1,00E-01														
		Activos	2	1,00E-02														
			0	1,00E+00														
			4	1,00E-04														
			1	1,00E-01														
No Flujo	Personal	1	1,00E-01															
	Ambiente	1	1,00E-01															
	Activos	2	1,00E-02															
		0	1,00E+00															
		1	1,00E-01															
		2	1,00E-02															

Realizado por: Ojeda, 2017

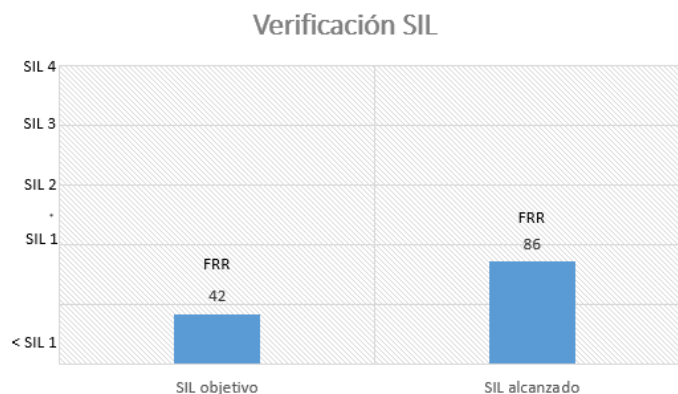
En el Gráfico 7-3 se verifica que mediante el diseño de la SIF-04 en base a los estándares internacionales IEC: 61508, IEC: 61511 y ANSI/ISA-S84 se alcanza un nivel SIL 1 al obtener un Factor de Reducción de Riesgo (FRR) de ochenta y seis (86), el cual es mayor al Factor de Reducción de Riesgo (FRR) objetivo encontrando en Análisis de Capas de Protección (LOPA) que corresponde a un valor de veinte y uno (21) en la causa 1, por lo que se determina que la SIF-04 es efectiva para la reducción de riesgo en la etapa de las bombas principales de la estación “Páramo”.



**Gráfico 7-3:** Validación de SIF-04 causa 1

Realizado por: Ojeda, 2017.

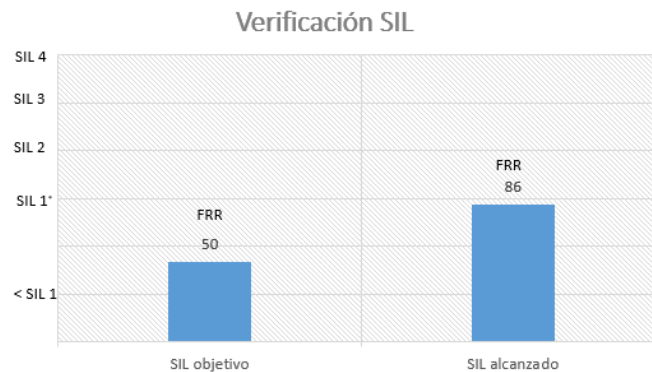
En el Gráfico 8-3 se verifica que mediante el diseño de la SIF-04 en base a los estándares internacionales IEC: 61508, IEC: 61511 y ANSI/ISA-S84 se alcanza un nivel SIL 1 al obtener un Factor de Reducción de Riesgo (FRR) de ochenta y seis (86), el cual es mayor al Factor de Reducción de Riesgo (FRR) objetivo encontrando en Análisis de Capas de Protección (LOPA) que corresponde a un valor de cuarenta y dos (42) en la causa 2, por lo que se determina que la SIF-04 es efectiva para la reducción de riesgo en la etapa de las bombas principales de la estación “Páramo”.



**Gráfico 8-3:** Validación de SIF-04 causa 2

Realizado por: Ojeda, 2017.

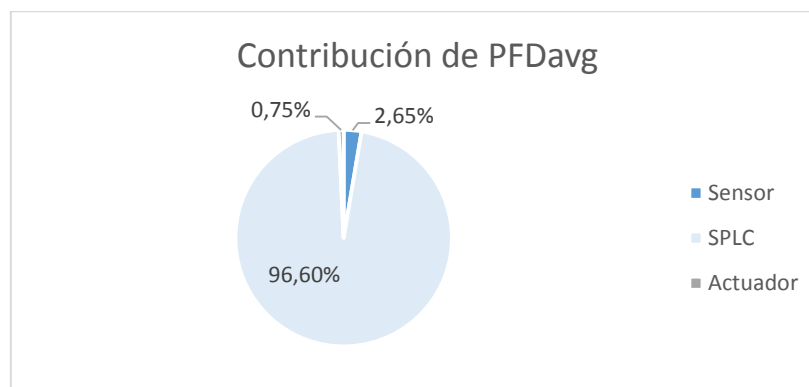
En el Gráfico 9-3 se verifica que mediante el diseño de la SIF-04 en base a los estándares internacionales IEC: 61508, IEC: 61511 y ANSI/ISA-S84 se alcanza un nivel SIL 1 al obtener un Factor de Reducción de Riesgo (FRR) de ochenta y seis (86), el cual es mayor al Factor de Reducción de Riesgo (FRR) objetivo encontrando en Análisis de Capas de Protección (LOPA) que corresponde a un valor cincuenta (50) en la causa 4, por lo que se determina que la SIF-04 es efectiva para la reducción de riesgo en la etapa de las bombas principales de la estación “Páramo”.



**Gráfico 9-3:** Validación de SIF-04 causa 4

Realizado por: Ojeda, 2017.

En el Grafico 10-3 se observa la contribución de la Probabilidad de Falla en Demanda Promedio (PFDavg) de cada uno de los subsistemas de detección, lógica y actuación que pertenecen a la SIF-04, se identifica que el Safety PLC (SPLC) es el elemento que tiene mayor integridad de seguridad al aportar con 96,60% de la PFDavg total a la Función Instrumentada de Seguridad (SIF) al tener un nivel de seguridad SIL3, por lo que su contribución es notablemente superior en contraste a la de los subsistemas de detección y actuación que en conjunto aportan con un 3,4% siendo el subsistema de actuación el que menos aporta.



**Gráfico 10-3:** Contribución PFDavg de elementos de la SIF-04

Realizado por: Ojeda, 2017.



### **3.5 Diagrama de Tuberías e Instrumentación del SIS**

A continuación se presentan los Diagramas de Tuberías e Instrumentación (P&ID) pertenecientes al Sistema Instrumentados de Seguridad (SIS) y recomendaciones desarrollado para la estación de bombeo “Páramo” (PS-4), los mismos que han sido trazados bajo el estándar nacional americano ANSI/ISA-5.1-2009 para el diseño de los símbolos de instrumentación e identificación.

En la Figura 2-3 se observa el P&ID de recepción y envío de marranos en el cual se identifican las funciones instrumentadas de seguridad SIF-01 y SIF-02, en la Figura 3-3 se identifica en P&ID de las bombas de circulación de aceite caliente, en esta etapa se encuentra la SIF-03, las SIF-04 implementada en cada una de las bombas principales de PS-4 se observa en la Figura 4-3 y la Figura 5-3, y finalmente la recomendación generada se encuentra en la Figura 6-3.



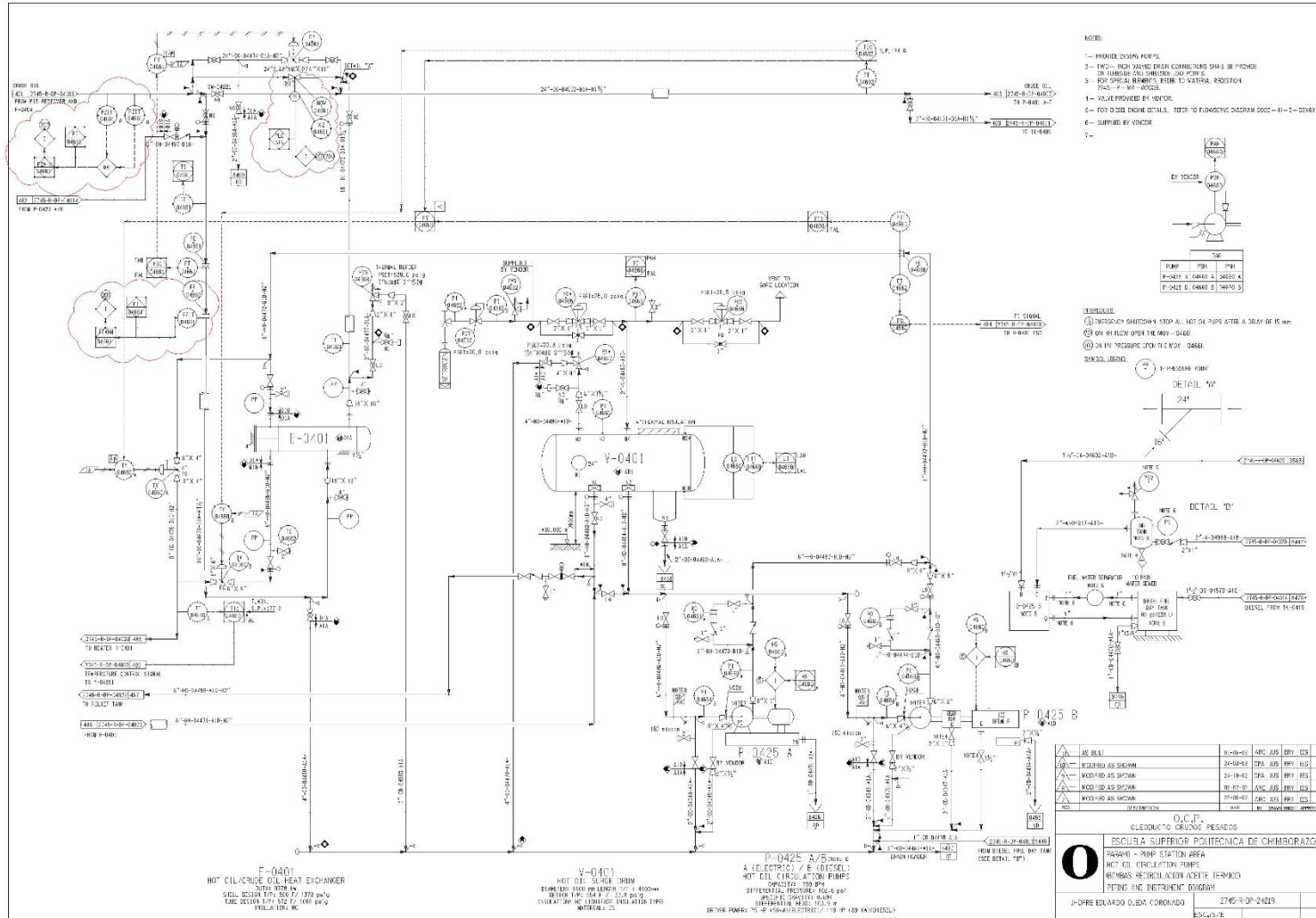


Figura 3-3: P&ID Hot oil circulation pumps

Realizado por: Ojeda, 2017.





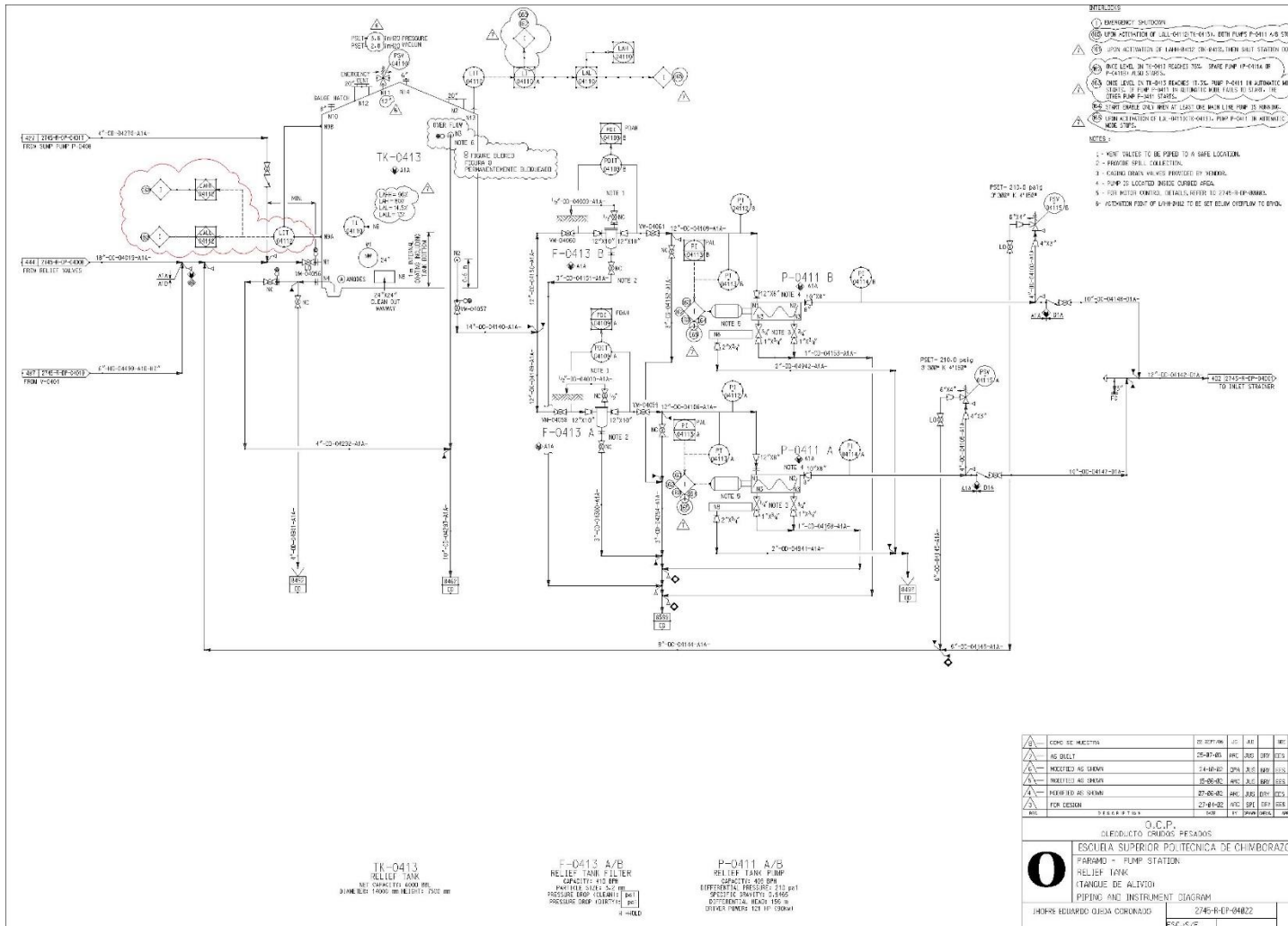


Figura 6-3: P&ID Recomendación

Realizado por: Ojeda, 2017

### **3.6 Matriz de Causa-Efecto de la Estación de Bombeo Páramo**

Como derivación del desarrollo del proyecto técnico se ha definido cómo y cuándo se van a activar cada una de las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIFs) que conforman el Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) de la estación de bombeo “Páramo”.

Para el desarrollo de este resultado se ha utilizado la Matriz de Causa y Efecto (MCE) ya que en las “Prácticas Recomendadas” definidas por el Instituto Americano del Petróleo (API) específicamente con el numero API 14C se describe el uso de MCE aplicada a Sistemas de Paradas de Emergencia (ESD) (API, 2001, pp.2-16), por lo que en la Tabla 21-3 se ha concebido la matriz causa y efecto que debe cumplir el Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) basado en las especificaciones de requerimientos, la misma posteriormente puede ser extrapolada en la lógica de codificación para el desarrollo del programa en el Controlador Lógico de Programación de Seguridad (SPLC), a su vez podemos observar de manera gráfica el análisis utilizado para detectar las situaciones que demandan a las SIFs de la estación “Páramo” y las acciones tomadas para reducir el riesgo a niveles considerados tolerables por Oleoducto de Crudos Pesados (OCP), lo que nos permite que el personal de ingenieros de proceso, ingenieros de control, mantenimiento, instrumentistas, seguridad y operadores de OCP se familiaricen con el Ciclo de Vida de la Seguridad Funcional (CVSF) del SIS.

**Tabla 21-3: Matriz causa- efecto del SIS de Páramo**

SIF	P&ID	Inter lock	Causa	2745-R-DP-04001	2745-R-DP-04001	2745-R-DP-04001	2745-R-DP-04007	2745-R-DP-04007	2745-R-DP-04008	2745-R-DP-04008	2745-R-DP-04008	2745-R-DP-04023	2745-R-DP-04023	2745-R-DP-04007/8	2745-R-DP-04001	2745-R-DP-04013	2745-R-DP-04014	2745-R-DP-04014	2745-R-DP-04017	2745-R-DP-04022	2745-R-DP-04001	2745-R-DP-04001	2745-R-DP-04001	2745-R-DP-04007	2745-R-DP-04007	2745-R-DP-04008	2745-R-DP-04008	2745-R-DP-04008						
				ESDY-04003	ESDY-04004	ESDY-04013	ESDY-04014	P-0401A	P-0401B	P-0401C	P-0401D	P-0401E	P-0401F	H-0401	TV-04660A	TV-04660B	MOV-04415 A/F	MOV-04414 A/F	P-0420	P-04007 A/B	P-04012 A/B	P-04023 A/B	P-04008	P-04011 A/B	Panel manual MOV-04001	Panel manual ESDY-04003	MOV-04661	D-0401A	D-0401B	D-0401C	D-0401D	D-0401E	D-0401F	
				EFECTO																														
SIF-01	2745-R-DP-04001	1;6	PZAHH-04022	CL	CL	CL	SP	SP	SP	SP	SP	SP	OP	CL	CL	OP	SP	SP	SP	SP	SP	SP												
SIF-02	2745-R-DP-04001	1;79	PZAHH-04003	CL	CL	CL	SP	SP	SP	SP	SP	SP	OP	CL	CL	OP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP										
SIF-03	2745-R-DP-04019	202	PZAHH-04661																															
SIF-03	2745-R-DP-04019	201	FZAHH-04661																															
SIF-04	2745-R-DP-04007	1;14	PZAHH-04418 A	CL	CL	CL	SP						SP	OP	CL	CL	OP	SP	SP	SP	SP	SP												
SIF-04	2745-R-DP-04007	1;13	PZALL-04418 A	CL	CL	CL	SP						SP	OP	CL	CL	OP	SP	SP	SP	SP	SP												
SIF-04	2745-R-DP-04007	1;14	PZAHH-04418 B	CL	CL	CL		SP					SP	OP	CL	CL	OP	SP	SP	SP	SP	SP												
SIF-04	2745-R-DP-04007	1;13	PZALL-04418 B	CL	CL	CL		SP					SP	OP	CL	CL	OP	SP	SP	SP	SP	SP												
SIF-04	2745-R-DP-04007	1;14	PZAHH-04418 C	CL	CL	CL			SP				SP	OP	CL	CL	OP	SP	SP	SP	SP	SP												
SIF-04	2745-R-DP-04007	1;13	PZALL-04418 C	CL	CL	CL			SP				SP	OP	CL	CL	OP	SP	SP	SP	SP	SP												
SIF-04	2745-R-DP-04008	1;14	PZAHH-04418 D	CL	CL	CL				SP			SP	OP	CL	CL	OP	SP	SP	SP	SP	SP												
SIF-04	2745-R-DP-04008	1;13	PZALL-04418 D	CL	CL	CL				SP			SP	OP	CL	CL	OP	SP	SP	SP	SP	SP												
SIF-04	2745-R-DP-04008	1;14	PZAHH-04418 E	CL	CL	CL					SP		SP	OP	CL	CL	OP	SP	SP	SP	SP	SP												
SIF-04	2745-R-DP-04008	1;13	PZALL-04418 E	CL	CL	CL					SP		SP	OP	CL	CL	OP	SP	SP	SP	SP	SP												
SIF-04	2745-R-DP-04008	1;14	PZAHH-04418 F	CL	CL	CL					SP		SP	OP	CL	CL	OP	SP	SP	SP	SP	SP												
SIF-04	2745-R-DP-04008	1;13	PZALL-04418 F	CL	CL	CL					SP		SP	OP	CL	CL	OP	SP	SP	SP	SP	SP												
Recomendación	2745-R-DP-04022	160	LALL-04112																			SP												
Recomendación	2745-R-DP-04022	161	LAHH-04112			CL	CL																											

Realizado por: Ojeda, 2017



### 3.7 Selección de instrumentación del SIS de la estación Páramo.

En esta sección se especifican los equipos para el sistema instrumentado de seguridad de la estación “Páramo”, por lo que se identifica y selecciona la instrumentación necesaria para la implementación del sistema independiente de seguridad.

#### 3.7.1 Equipos reutilizables

Para el desarrollo del Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) en la estación “Páramo” se ha tomado en cuenta los siguientes dispositivos ya instalados en PS-4, los cuales cumplen con el Factor de Reducción de Riesgo (FRR) requerido en el diseño de cada una de las diferentes funciones instrumentadas de seguridad para alcanzar el Nivel de Integridad de Seguridad (SIL) del proceso.

##### 3.7.1.1 ESDV-04004

La válvula de cierre de emergencia instalada en la entrada de la estación de bombeo “Páramo” que se observa en la Figura 7-3 cumple con las especificaciones solicitadas por el diseño realizado para ser implementando como el elemento final en las funciones instrumentadas de seguridad SIF-01 y SIF-04, puesto que este tipo de válvulas son ideales para brindar soluciones de cierre al presentar problemas en los rangos de operaciones.



**Figura 7-3:** ESDV-04004

Realizado por: Ojeda, 2017.

A continuación se describen las principales características de la válvula ESDV-04004 (OCP, 2013):

- El modelo de la válvula es “PCC BALL VALVE CLASS-600 24””.
- Óptimo para forzar operaciones con fluidos a altas velocidades y presiones.
- Su diseño y funcionamiento evita problemas de cavitación, erosión, alto ruido y vibración de tuberías.
- Su transmisor de posición tiene comunicación HART de control de 4-20mA.
- Actuación neumática para su pistón de actuación.
- Los estándares básicos con los que cumple su diseño son API, ASME/ANSI, MSS, DIN, ISO, ASTM y NACE
- Tiene un nivel de integridad de seguridad SIL 2 TUV Rhineland.

### 3.7.1.2 ESDV-04003 y MOV-04001

La válvula de cierre de emergencia ESDV-04003 y la válvula de control motorizada MOV-04001 instaladas aguas arriba y aguas debajo del lanzador de la estación de bombeo Páramo que se observan en la Figura 8-3 al interactuar como se ha definido con anterioridad, cumplen con las especificaciones solicitadas por el diseño realizado para ser implementando como el elementos finales en la función instrumentada de seguridad SIF-02.



**Figura 8-3:** ESDV-04003 y MOV-04001

Realizado por: Ojeda, 2017.

A continuación se describen las principales características de la válvula ESDV-04003 (OCP, 2013):

- El modelo de la válvula es “PCC BALL VALVE CLASS-600 12””.
- Óptimo para forzar operaciones con fluidos a altas velocidades y presiones.
- Su diseño y funcionamiento evita problemas de cavitación, erosión, alto ruido y vibración de tuberías.
- Su transmisor de posición tiene comunicación HART de control de 4-20mA.
- Actuación neumática para su pistón de actuación.
- Los estándares básicos con los que cumple su diseño son API, ASME/ANSI, MSS, DIN, ISO, ASTM y NACE

A continuación se describen las principales características de la válvula MOV-04001 (OCP, 2013):

- El modelo de la válvula es “VAIVE PETROLVALV CLASS-600 34” ”.
- Su diseño y funcionamiento evita problemas de cavitación, erosión, alto ruido y vibración de tuberías.
- Su transmisor de posición tiene comunicación HART de control de 4-20mA.
- Su accionamiento se da por relé genérico normalmente cerrado.

OCP ha determinado por cálculos de confiabilidad propios de la empresa que la interacción de las válvulas ESDV-04003 y MOV-04001 se encuentran en un nivel de integridad de seguridad SIL1 para la SIF-02.

### **3.7.2 Equipos nuevos**

La selección de los dispositivos nuevos para el sistema instrumentado de seguridad se realizó en base al cumplimiento de los equipos a los niveles de seguridad establecidos previamente en el diseño, conforme al estándar instituido por la Comisión de Electrotecnia Internacional en su norma IEC: 61508, a su vez se trata de mantener la homologación de la instrumentación nueva a instalar con la ya existente en las diferentes estaciones de transporte de crudo pesado.

### 3.7.2.1 PZIT-04022A/B, PZIT-04661A/B, PZIT-04418A/F, PZIT-04419A/F

Estos transmisores de presión que van a ser instalados para aplicación de la SIF-01, SIF-03 y SIF-04 mantienen requerimientos similares, por lo que se ha seleccionado el transmisor de presión manométrica de Schneider Electric de la línea Foxboro serie IGP10 que se muestra en la Figura 9-3.



**Figura 9-3:** Transmisor de presión IGP10

Fuente: (TECNIEQUIPOS, 2016, p.14) Schneider Electric

A continuación se describen las principales características del transmisor de presión IGP10 las cuales han sido tomadas de su datasheet (Schneider, 2016):

- Mide la presión y transmite una señal eléctrica proporcional HART de 4-20 mA.
- Alimentación de 12.5-42 Vdc.
- Rango de operación 0 a 21 Mpa.
- Seguridad intrínseca con certificación para áreas clasificadas.
- Nivel de integridad de seguridad SIL2 TUV Rhineland.

### 3.7.2.2 PDZIT-04003

Para el dispositivo de presión de la SIF-02 se ha elegido el transmisor de presión diferencial de Schneider Electric de la línea Foxboro serie IDP10 que se muestra en la Figura 10-3.



**Figura 10-3:** Transmisor de presión diferencial IDP10

Fuente: (Kuantik, 2015) Schneider Electric

A continuación se describen las principales características del transmisor de presión diferencial las cuales han sido tomadas de su datasheet (Schneider, 2016):

- Proporciona una señal de salida HART de 4-20 mA y además compatible con Fieldbus y FoxCom.
- Transmisor de dos hilos.
- Rango de medición hasta 25 Mpa.
- Alimentación de 12.5 a 42 Vdc.
- Precisión alta al 0,05% del rango calibrado.
- Seguridad intrínseca con certificación para áreas clasificadas.
- Protecciones NEMA 4X e IEC IP66.
- Nivel de integridad de seguridad SIL2 TUV Rhineland.

### 3.7.2.3 FZIT-04661

Para el instrumento de detección de flujo de la SIF-02 se ha seleccionado el transmisor de flujo Rosemount serie 8800 DUAL, el cual es un caudalímetro de vórtice que facilita el monitoreo de la variable de accionamiento de la función instrumentada de seguridad el mismo que se observa en la Figura 10-3 (Rosemount, 2017).



**Figura 11-3:** Transmisor de flujo Rosemount 8800 Dual

**Fuente:** (Rosemount, 2017)

A continuación se describen las principales características del transmisor de flujo las cuales han sido tomadas de su datasheet (Rosemount, 2017):

- Comunicación de salida HART de 4-20 mA, señal digital Foundation Fieldbus, graduación de pulsos, salida analógica y en frecuencia.
- Diagnóstico de proceso SMART.
- Temperatura ambiente de trabajo de -58 a 85 °C.
- Alimentación de 10,8 a 42 Vdc.
- Redundancia de transmisores y sensores con votación 1oo2.
- Seguridad intrínseca con certificación para áreas clasificadas.
- Capaz de mantener un nivel de integridad de seguridad SIL 3.

#### 3.7.2.4 MOV-04661

Al tener pocas opciones en el mercado de válvulas de control motorizadas mayor a nivel SIL 2, se ha optado por el fabricante EMERSON que en su línea Fisher incluye la válvula digital DVC6000 SIS con su controlador Fisher FIELDVUE que se observa en la Figura 12-3, que son las primeras en obtener nivel de integridad de seguridad SIL 3 que han sido certificadas por el organismo independiente EXIDA en base a los estándares IEC: 61508.



**Figura 12-3:** Válvula DVC6000 SIS y controlador Fisher FIELDVUE

Fuente:(Emerson, 2017)

A continuación se describen las principales características de la válvula digital DVC6000 SIS las cuales han sido tomadas de su datasheet (Emerson, 2017):

- Sus características de diseño reducen el ruido, la cavitación, el bajo flujo y la erosión.
- Su clase presión sometida a diseños PN y ASME.
- Válvula de compuerta con contorno preciso que da una característica de flujo porcentual óptimo para sistemas On/Off.
- Su señal de entrada compatible con el protocolo HART de 4-20 mA.
- Señal de salida es neumática de 0.4-9.5 bar.
- Seguridad intrínseca con certificación para áreas clasificadas.
- Nivel de integridad de seguridad SIL 3 con certificación EXIDA.

#### 3.7.2.5 Tablero de control de seguridad

El tablero que se instalará en campo, cumple con las siguientes especificaciones solicitadas:

- Tablero de acero inoxidable 180x80x40.
- Grado de Protección Nema 4x.
- Puerta sobrepuesta para montaje del panel view de vidrio templado.
- Barra de Tierra.

#### 3.7.2.6 InTouch Panel PC

Para la Interfaz Gráfica Humano- Maquina (HMI) se ha seleccionado el InTouch Panel PC que se observa en la Figura 13-3 de Schneider Electric de la serie de computadoras industriales Wonderware, la cual es un equipo plug&play para su instalación puesto que el mismo no posee partes móviles y ya viene precargado de fábrica el software InTouch y los drivers para comunicaciones con sistemas terceros (TECNIEQUIPOS, 2016, pp.10-11).



**Figura 13-3:** InTouch Panel PC

**Fuente:** (TECNIEQUIPOS, 2016, p.11) Schneider Electric

Las características generales del InTouch Panel PC se detallan a continuación y han sido tomadas de su datasheet, mientras que las peculiaridades específicas del panel a instalar en la estación “Páramo” se aprecia en el Anexo M (Schneider, 2016):

- Elimina problemas de compatibilidad Hardware y Software.
- Se puede desarrollar una completa gama de interfaces de visualización utilizando un entorno de desarrollo común.
- Cuenta con una pantalla de 15” y una tarjeta de video Intel HD Graphic 11.1 Open CI/GL.
- Memoria de 4GB de RAM expandible a 8GB.
- Protección de este Panel es IP66/NEMA 4/4X.

#### 3.7.2.7 PLC de Seguridad (SPLC)

El Controlador Lógico Programable de Seguridad (SPLC) que se ha seleccionado para el sistema instrumentado de seguridad es el PLC de seguridad Modicon Quantum de Schneider Electric, el cual consta con una certificación de nivel de integridad de seguridad SIL 3 avalado por el organismo independiente TUV Rheinland en base al estándar IEC: 61508.

Schneider Electric ha desarrollado el software “Unity Pro XLS” para la configuración del SPLC Modicon Quantum, el mismo que nos brinda rutinas de programación confiables y robustas con la finalidad de mantener un nivel de seguridad SIL3, a su vez estos tipos de controladores tienen la facilidad de agregar una amplia gama de módulos de entrada y salida, alimentación, comunicación, tarjetas de memorias y accesorio que se pueden añadir al chasis principal del SPLC lo que es esencial para no tener problemas de compatibilidad con productos de otros fabricantes y facilitar la implementación del SIS de la estación de bombeo Páramo (Schneider, 2016).



## Procesador

El procesador seleccionado para el S PLC Modicon Quantum es de la serie 140CPU65160S el cual es específicamente diseñado para aplicaciones de seguridad por su características (Anexo N) y se observa en la Figura 14-3.



**Figura 14-3:** Procesador 140CPU65160S

Fuente: (Schneider, 2016)

Para aumentar la disponibilidad del sistema instrumentado de seguridad se va a configurar un sistema “Hot StandBy” el cual consta de dos configuraciones idénticas de procesadores en donde uno actúa como controlador CPU primario mientras que el otro actúa como controlador CPU en StandBy por lo que se necesita de redundancia.

## Alimentación

Para la alimentación del S PLC se ha tomado en cuenta dos tipos de alimentaciones las cuales son:

- Módulo de alimentación de 115 V/230 VAC redundante, perteneciente a la serie 140CPS12420 como se observa en la Figura 15-3.



**Figura 15-3:** Alimentación CA 140CPS12420

Fuente: (Schneider, 2016)

- Módulo de alimentación de 24/30 VDC redundante, perteneciente a la serie 140CPS22400 como se observa en la Figura 16-3.



**Figura 16-3:** Alimentación CC 140CPS22400

**Fuente:** (Schneider, 2016)

### Entradas y Salidas

El tipo de entradas y salidas que se maneja en las diferentes funciones instrumentadas de seguridad corresponden al rango analógico de 4-20 mA, digital de 24 VDC y salidas discretas de 19-34 VDC, por lo que se ha seleccionado los siguientes módulos de ampliación que se muestran en la Tabla 22-3:

**Tabla 22-3:** Módulos de entrada y salida

#	C.S	Serie	FUNCIÓN
1	1	140XBP01000	BACKPLANE 10 SLOTS.
2	1	140CPS12420	LMS AC PS 115/230V RED.
3	1	140CPS22400	LMS AC 24VPS RED
4	2	MA0186100	COAXIAL CABLE SPLITTER.
5	2	MA0185100	COAXIAL CABLE TAP.
6	2	520422000	TRUNK TERMINATOR 75 OHMS.
7	1	140CRA93200	QUANT. RIO-DROP, REDUNDANT.KABEL.
8	2	140SAI94000S	QUANT. 8E, ANALOG, SIL2, 4...20MA
9	2	140SDO95300S	QUANT. 16A, SIL2, 24VDC
10	1	140SDI95300S	QUANT. 16E, SIL2, 24VDC.
11	2	140ACO02000	QUANT. 4A-ANA, 4-20MA, 12BIT.
12	6	140XTS00200	TERMINAL STRIP 40 Points

**Realizado por:** Ojeda, 2017

## Comunicación

Se ha seleccionado el módulo de la serie 140NOE77111 como se observa en la Figura 17-3 el cual es una ampliación que permite utilizar el protocolo de comunicación TCP/IP de red Ethernet.

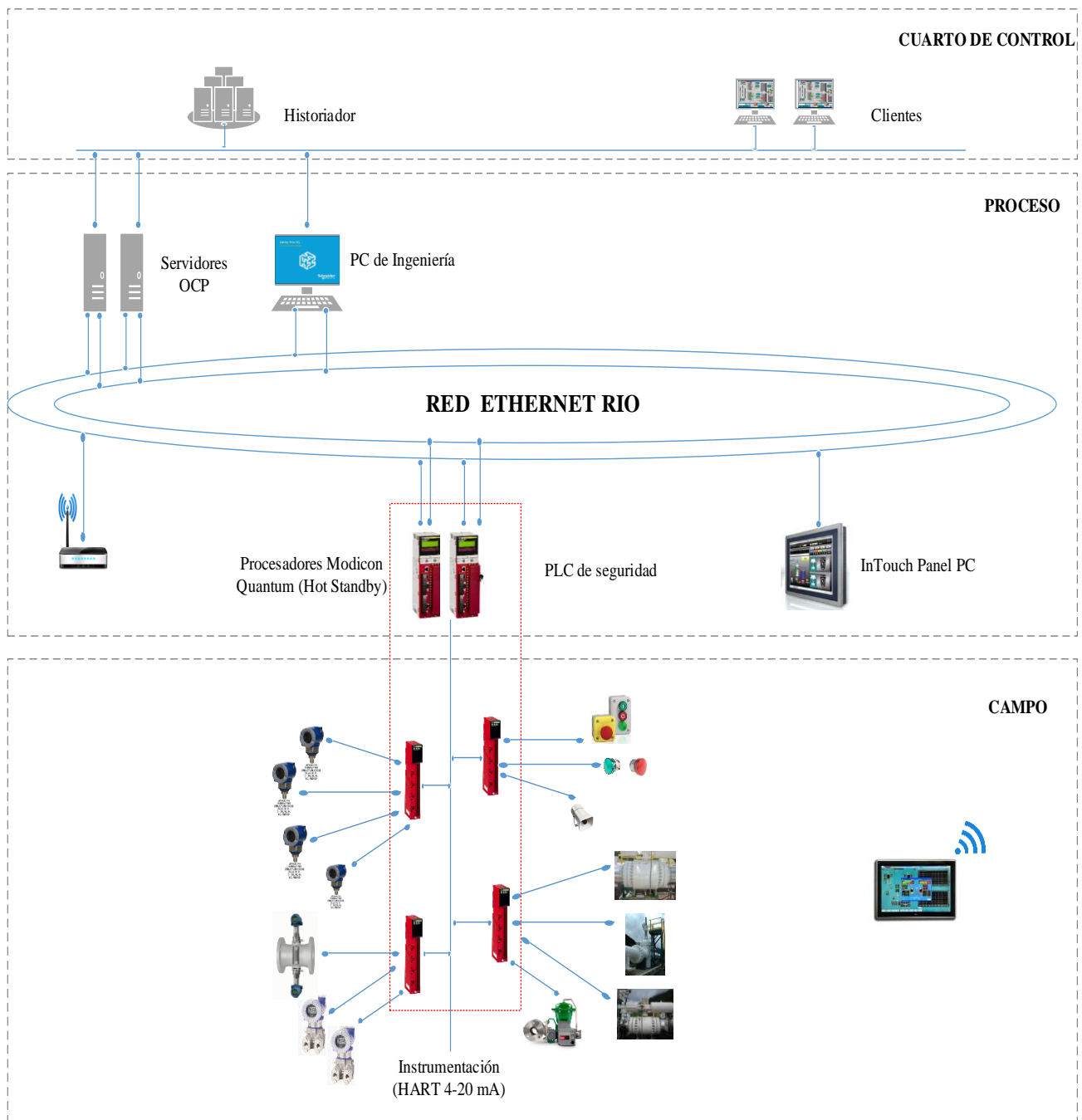


**Figura 17-3:** Módulo 140NOE77111

**Fuente:** (Schneider, 2016)

Este dispositivo es necesario para establecer el protocolo del puerto de comunicación Ethernet Modbus TCP/IP, escaneo de las entradas y salidas, gestión del ancho de banda, notificaciones de correo electrónico y Sincronización de tiempo NTP en nuestro sistema instrumentado de seguridad para la estación PS-4 (Schneider, 2016).

La red diseñada para el sistema instrumentado de seguridad que se observa en la Figura 18-3 se ha definido como un anillo doble en la etapa de proceso el cual nos permite tener una transmisión de datos en tiempos acotados y definidos gracias a una única arquitectura de red RIO Ethernet, de igual manera no ayuda a mantener una robustez en las comunicaciones ya que su redundancia nos brinda una gran fiabilidad y muy poca probabilidad de errores. En campo se ha interconectado los diferentes elementos de instrumentación de monitoreo, detección y actuación con una topología de estrella partiendo desde los diferentes módulos análogos y digitales de entrada y salida del PLC de seguridad con un protocolo de comunicación HART de 4-20 mA.



**Figura 18-3:** Red de comunicaciones del SIS

Realizado por: Ojeda, 2017.

### 3.8 Evaluación Económica de equipos Mayores del SIS

Este análisis se basa en el costo de los equipos mayores que se han seleccionado para las funciones instrumentadas de seguridad del sistema instrumentado de seguridad de la estación de bombeo “Páramo”. Los precios de la propuesta han sido obtenidos de varios distribuidores autorizados como se muestra en la Tabla 23-3.

**Tabla 23-3:** Costos equipos mayores

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PREC. UNIT.	VALOR TOTAL
ESDV-04004	1	Adquirido	\$ -
ESDV-04003	1	Adquirido	\$ -
MOV-04001	1	Adquirido	\$ -
Transmisor de presión IGP10	16	\$ 4.433,00	\$ 70.928,00
Transmisor de presión diferencial IDP10	1	\$ 6.600,00	\$ 6.600,00
Transmisor de flujo Rosemount 8800 Dual	1	\$ 35.000,00	\$ 35.000,00
Válvula DVC6000 SIS	1	\$ 180.670,00	\$ 180.670,00
Controlador Fisher FIELDVUE	1	\$ 17.000,00	\$ 17.000,00
Tablero de control de seguridad	1	\$ 65.000,00	\$ 65.000,00
InTouch Panel PC	1	\$ 17.500,00	\$ 17.500,00
SPLC Modicon Quantum	1	\$ 90.000,00	\$ 90.000,00
<b>Total</b>			<b>\$ 482.698,00</b>

Realizado por: Ojeda, 2017

## CONCLUSIONES

Cumpliendo con los objetivos planteados en el trabajo de titulación se concluye lo siguiente:

- La cuantificación de los Niveles de Integridad de Seguridad objetivos (SIL objetivo) encontrados durante la evaluación de Análisis de Capas de Protección (LOPA) corresponden a un nivel SIL 1 pertenecientes a las funciones instrumentadas de seguridad SIF-02 y SIF-04, siendo el nivel SIL 2 que compete a la SIF-01 y SIF-03 el Nivel de Integridad de Seguridad (SIL) mayor en el Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS), para lo cual fue necesario la identificación de los peligros y riesgos presentes en los procesos, los cuales se encuentran específicamente en los nodos según su causa en los puntos 1-3,1-7,3-3,4-1,4-2,4-4, 5-3 y 5-4 en la estación de bombeo “Páramo” una vez estudiado el Análisis de Riesgos y Operatividad (HAZOP) de Oleoducto de Crudos Pesados (OCP).
- La localización por nodos y causas de las cuatro (4) Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF) y una (1) recomendación se encuentran en el punto 1-3 para la SIF-01, 1-7 para la SIF-02, 3-3 para la SIF-03, 4-1/4-2/4-4 para la SIF-04 y 5-3/5-4 para la recomendación, precedentemente fue necesario realizar una evaluación a los resultados obtenidos en el Análisis de Capas de Protección (LOPA).
- Se alcanzó satisfactoriamente el valor Probabilidad de Falla en Demanda Promedio ( $PFD_{avg}$ ) requerido para adquirir el Nivel de Integridad de Seguridad objetivo (SIL objetivo) de las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIFs), mediante el diseño de las mismas basado en los estándares internacionales IEC: 61508, IEC: 61511 y ANSI/ISA-84 que permitió detallar las especificaciones de requisitos de seguridad (SRS) y la cuantificación de la Probabilidad de Falla en Demanda Promedio ( $PFD_{avg}$ ) de los dispositivos del Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) y lazos de control.
- El Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) es funcional al reducir los niveles de riesgo a rangos tolerables considerados por Oleoducto de Crudos Pesados (OCP), por lo que es primordial adoptar el diseño y Especificaciones de Requerimientos de Seguridad (SRS) de cada una de las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIFs), lo que establece un primer ejercicio de las acciones iniciales a ser ejecutadas para alcanzar niveles de riesgos permisibles, validación que se obtuvo al añadir las SIFs como Capas Independientes de Seguridad (IPLs) en el Análisis de Capas de Protección (LOPA).

- Es beneficioso el uso de los estándares IEC: 61508, IEC: 61511 y ANSI/ISA-84 para mantener la estandarización en la instrumentación dentro de las diferentes estaciones que constituyen Oleoducto de Crudos Pesados (OCP), las cuales nos brindan la posibilidad de seleccionar una amplia gama de instrumentación adecuada para la implementación del Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) a través del desarrollo de la ingeniería del detalle.
- Es fundamental identificar las modificaciones efectuadas en la instrumentación y control de procesos de la estación “Páramo”, para lo cual es necesario esbozar los Diagramas de Tuberías e Instrumentación (P&ID) en base a la normativa internacional ANSI/ISA-5.1 de cada una de las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIFs) que forman el Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS).
- La reutilización de dispositivos ya instalados que cumplen con los requerimientos de las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIFs) genera un escenario que ayuda reducir costos de equipos mayores, lo que ocasiona que el proyecto se viable y sostenible en el tiempo.
- Se concluye al finalizar este proyecto que es imperativo cumplir con los múltiples parámetros establecidos en los estándares internacionales IEC: 61508, IEC: 61511 y ANSI/ISA-84, los cuales nos guían a alcanzar la seguridad funcional en el control de procesos de la estación Páramo mediante el desarrollo de Sistemas Instrumentados de Seguridad (SIS), a su vez se identificó que la seguridad funcional es un área relativamente nueva o aún desconocida en la industria ecuatoriana.

## RECOMENDACIONES

- Iniciar la fase de procura o adquisición de equipos mayores e instrumentación necesaria para el desarrollo de las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF) a ser ejecutadas por el Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) diseñado, que posteriormente será indispensable para iniciar la etapa de implementación de los lazos de seguridad, seguidamente de la fase de aceptación y pruebas.
- Considerar las diferentes Especificaciones de Requerimientos de Seguridad (SRS) propuestos por el Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) diseñado en el presente proyecto y a su vez con las exigencias de fábrica, para cumplir con una adecuada instalación de los dispositivos pertenecientes a las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIFs).
- Garantizar que no existan caídas espurias del Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) por fallos de alimentación eléctrica, por lo que se propone el uso de fuentes de energías redundantes e independientes al Sistema Básico de Control de Procesos (BPCS).
- Se recomienda divulgar al personal de la estación Páramo sobre los aspectos que abarca la seguridad funcional y el funcionamiento del Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) para obtener un modo de operación, monitoreo y mantenimiento que mantenga la integridad del sistema.
- Analizar y estudiar periódicamente las variables almacenadas que intervienen en la demanda de cada una de las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF) para obtener una tendencia clara sobre los parámetros de control y se pueda tomar acciones preventivas.
- Se recomienda adquirir repuestos de los dispositivos mayores que conforman el Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS), para una breve sustitución de los mismos con el objetivo de solucionar fallas lo más antes posible, lo cual es beneficioso para reducir tiempos de reparación.
- Mantener la trayectoria de los nodos diseñados en caso de posteriores cambios o desmantelamiento a las Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIF) pertenecientes al proyecto.



- Para trabajos futuros se recomienda ejecutar un seguimiento estadístico asociado a la seguridad y tolerancia a fallas que provee el Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS), para validar las estrategias metodológicas y probabilísticas que conlleva la fase uno del presente trabajo a afirmar que mejora en cuanto a reducir los niveles de riesgo a rangos tolerable al adquirir Niveles Integrales de Seguridad (SIL) en la estación “Páramo”, a su vez actualizar el Análisis de Riesgo y Operatividad (HAZOP) para desarrollar nuevas Funciones Instrumentadas de Seguridad (SIFs) que reduzcan los riesgos a niveles permisibles de sistemas principales y auxiliares que no intervienen en la línea de transporte de crudo de la estación PS-4, y finalmente desarrollar Sistemas Instrumentados de Seguridad (SIS) para las restante estaciones reductoras y bombeo de hidrocarburo que forman parte de Oleoducto de Crudos Pesados (OCP), en caso de darse, considerar el nodo 6 definido como “Horno” solo en las estaciones que funcione en modo de operación normal.

## **BIBLIOGRAFÍA**

**ABS.** “Análisis de Capas de Protección (LOPA)”. *Curso 200 LOPA* [En línea], 2012, (Perú), pp.1-2. [Consulta: 16 de agosto 2017]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/357305700/lopa>

**ALVAREZ, J & PEREZ, C.** *Project Management Body of Knowledge* [En línea]. Hermosillo: 22 de octubre del 2011. [Consulta: 6 de septiembre 2017]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/JoseSandoval9/pmbok-9825141>

**ANSI/ISA-84.00.01.** *Functional Safety : Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector - Part 1 : Framework , Definitions , System , Hardware and Software Requirements.*

**ANSI/ISA-5.1.** *Instrumentation Symbols and Identification.*

**API RP 14C.** *Recommended Practice for Analysis, Desing, Installation and Testing of Basic Surface Safety System for Offshore Production Platforms.*

**CATALUÑA, C.** “ANÁLISIS HAZOP/LOPA”. *Congreso de Seguridad y Salud en el trabajo* [En línea], 2014. [Consulta: 16 de agosto 2017]. Disponible en: [http://www.confirmaciones.cl/feria/html/32/extras/ACHS\\_HAZOPLOPA\\_CHILWORTH\\_25NOV2014.pdf](http://www.confirmaciones.cl/feria/html/32/extras/ACHS_HAZOPLOPA_CHILWORTH_25NOV2014.pdf)

**EMERSON.** *¿Qué es el riesgo?* [En línea], 2005a, pp.1-7. [Consulta: 10 de agosto 2017]. Disponible en: [http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Central%20Web%20Documents/SIS\\_101-What\\_is\\_risk\\_es.pdf](http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Central%20Web%20Documents/SIS_101-What_is_risk_es.pdf)

**EMERSON.** *Operación y mantenimiento* [En línea], 2005b, pp. 1–6. [Consulta: 10 de agosto 2017]. Disponible en: [http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Central%20Web%20Documents/SIS\\_301-Operation\\_and\\_maintenance\\_es.pdf](http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Central%20Web%20Documents/SIS_301-Operation_and_maintenance_es.pdf)

**EMERSON.** *Reducción del riesgo* [En línea], 2005c, pp. 1–6. [Consulta: 11 de agosto 2017]. Disponible en: [http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Central%20Web%20Documents/SIS\\_102-Reducing\\_risk\\_es.pdf](http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Central%20Web%20Documents/SIS_102-Reducing_risk_es.pdf)

**EMERSON.** *Válvula de control bridada Fisher™ Vee-Ball™ V150* [En línea], 2017, [Consulta: 19 de diciembre 2017]. Disponible en: <https://www.emerson.com/en-us/catalog/fisher-v150>

**GALINDO, D.** *Sistemas Instrumentados de Seguridad* [En línea] (Tesis). (Ingeniería) Universidad Rovira i Virgili, Tarragona, España. 2012. pp 59-74.[Consulta: 13 de abril 2017]. Disponible en: <http://www.urv.cat/es/>

**GARCÍA, L. M.** “Automatización del Ciclo de vida de un PES”. 7 ensayos sobre Sistemas Instrumentados de Seguridad. Madrid-España: Siemens Industry, 2005, pp.1-5.

**GARCÍA, L. M.** “¡No se puede probar el CPU de un SIS!”. 7 ensayos sobre Sistemas Instrumentados de Seguridad. Mexico DF: Siemens Industry, 2012, pp.3-5.

**IEC 61508.** *Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. Part 1: General requirements.*

**IEC 61508.** *Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. Part 3: Guidelines on the Applications of IEC 61508-2 AND IEC 61508-3*

**IEC 61511.** *Functional Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector. Part 1: Framework, Definitions, System, Hardware and Software Requirements.*

**IEC 61511.** *Functional Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector. Part 2: Guidelines for the Applications for the of IEC 61511-1.*

**IEC 61511.** *Functional Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector. Part 3: Guidance for the Determination of the Required Safety Integrity Levels.*

**KUANTIK.** *Transmisor de Presión Diferencial Inteligente IDP10* [En línea], 2015, [Consulta: 19 de diciembre 2017]. Disponible en: <http://www.kuantic.com>

**MACHIAVELO, V.** “Análisis de Capas de Protección (LOPA)”. *Risk Software* [En línea]. Mexico: 2008 , pp.11-15. [Consulta: 25 de septiembre 2017]. Disponible en: <http://www.risksoftware.com.mx>

**OLEODUCTO DE CRUDOS PESADOS, ECUADOR.** *Problemas Operacionales – HAZOP*. Quito-Ecuador: OCP, 2008, pp.139-142.

**OLEODUCTO DE CRUDOS PESADOS, ECUADOR.** *Funcionamiento OCP* [En línea]. Quito: OCP. [Consulta: 30 de agosto 2017]. Disponible en: <http://ocpecuador.com>

**OLEODUCTO DE CRUDOS PESADOS, ECUADOR.** *Manual de Operación del Sistema del Oleoducto*. Quito-Ecuador: OCP, 2014, pp.20-149.

**OLEODUCTO DE CRUDOS PESADOS, ECUADOR; & TECNIEQUIPOS, ECUADOR.** *Sistema Independiente de Seguridad de proceso para la estación PRS1 – Chiquilpe*. Quito-Ecuador: OCP, 2016, pp34-36.

**OLEODUCTO DE CRUDOS PESADOS, ECUADOR; & TECNIEQUIPOS, ECUADOR.** *Sistema Independiente de Seguridad de proceso para la estación PRS1 – Chiquilpe. SRS*. Quito-Ecuador: OCP, 2016, pp7-13.

**OREDA.** *Offshore Reliability Data* [En línea]. 4th edn. Noruega: Det Norske Veritas, 2002. [Consulta: 15 de mayo 2017]. Disponible en: <http://www.sintef.no/oreda/handbook/>

**PIZARRO, T.** *¿Qué es PMBOK?* [En línea], 2012, .[Consulta: 13 de abril 2017]. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/101776943/Que-es-PMBOK>

**INSTITUTO DE MAJEJO DE PROYECTOS.** *Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (guía del PMBOK®)* [En línea]. 5th edn, Pensilvania-USA: Project Management Institute Inc, 2013. [Consulta: 3 de abril 2017]. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/79535/PMBOK\\_5ta\\_Edicion\\_Espanol\\_\\_1\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/79535/PMBOK_5ta_Edicion_Espanol__1_.pdf)

**ROCKWELL, A.** *Seguridad funcional en la industria de proceso* [En línea]. Milwaukee-USA: Rockwell Automation, 2013. [Consulta: 5 de junio 2017]. Disponible en: [http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/rm/safebk-rm003\\_es-p.pdf](http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/rm/safebk-rm003_es-p.pdf)

**ROSEMOUNT.** *Rosemount™ SIL Certified Vortex Flow Meters for SIS Applications* [En línea], 2017, [Consulta: 18 de diciembre 2017]. Disponible en: <https://www.emerson.com/documents/automation/rosemount-8800d-series-vortex-flowmeter-safety-manual-for-safety-instrumented-systems-sis-en-1729470.pdf>

**SCHNEIDER, E.** *Modicon Quantum S PLC* [En línea], 2017, [Consulta: 19 de diciembre 2017]. Disponible en: <https://www.schneider-electric.com.co>

**SOLDANO, Á.** “Conceptos sobre Riesgo” [En línea], 2009, (Argentina), pp.2-4. [Consulta: 23 de abril 2017]. Disponible en: <http://www.ina.gov.ar/alerta/satelital/index.htm>

**TECNIEQUIPOS.** *Especificación de Equipos*. Quito-Ecuador: Tecniequipos, 2016, pp.5-9.

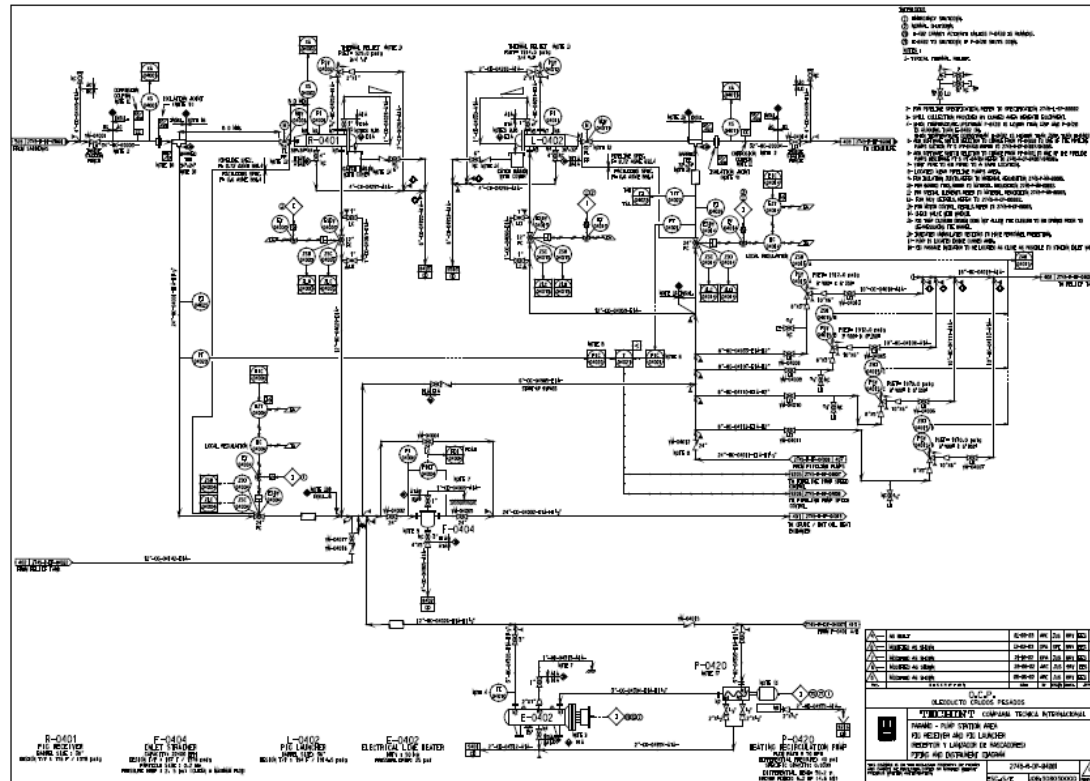
**EJECUTIVO DE SALUD Y SEGURIDAD.** *Out of control* [En línea]. 2nd. Inglaterra: Health and Safety Executive, 2003 [Consulta: 1 de abril 2017]. Disponible en: <http://www.hse.gov.uk/pubns/priced/hsg238.pdf>

**VENEGAS, K.** *La Seguridad Funcional en la Industria de Procesos: Conceptos y Metodologías de Diseño* [En línea] (Tesis) (Maestría). Universidad Politécnica Salesianas, Cuenca, Ecuador. 2014. [Consulta: 8 de abril 2017]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6870/1/UPS-CT003539.pdf>

# ANEXOS

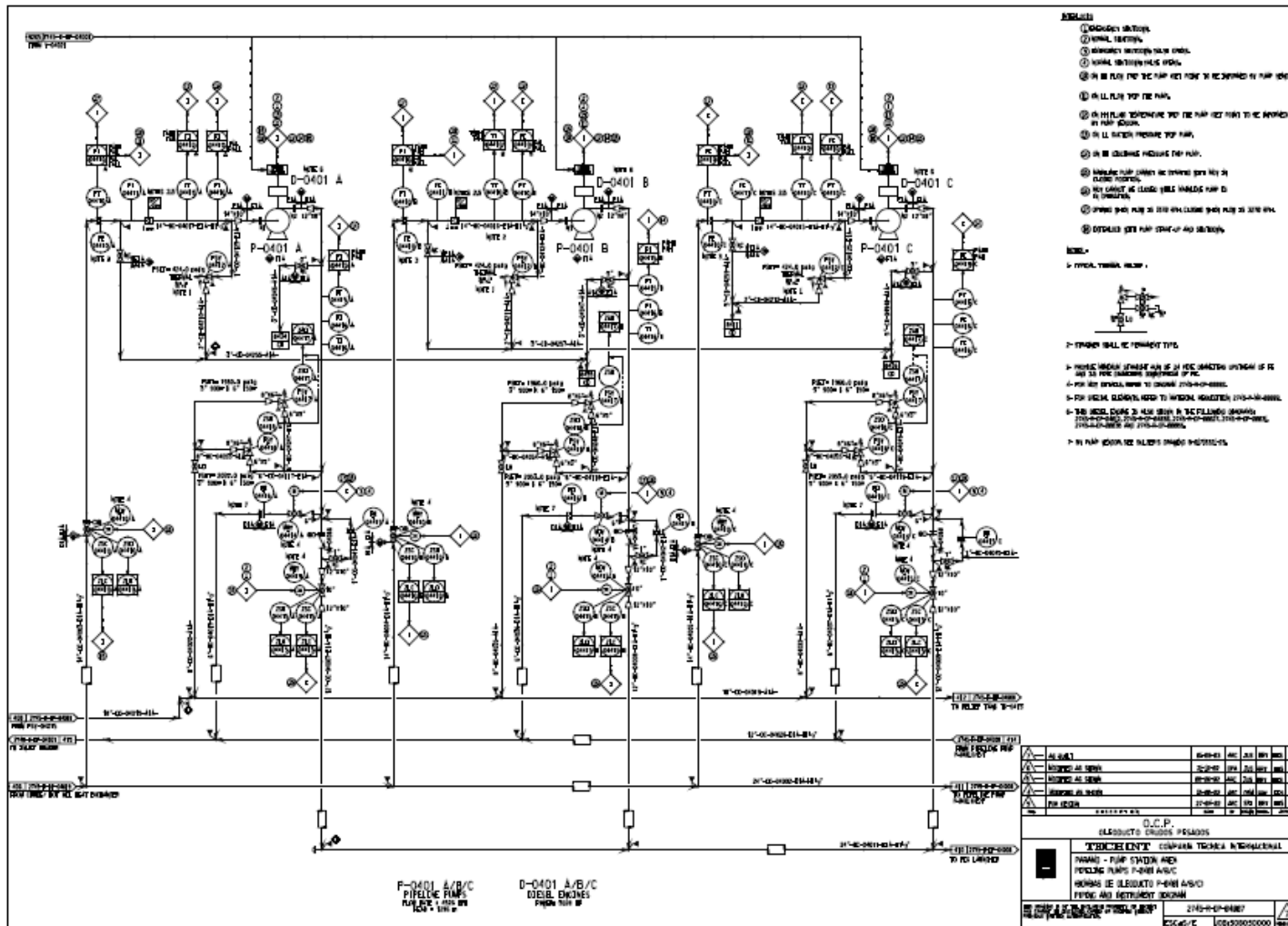
## ANEXO A: Diagramas P&ID principales de la estación Paramo

P&ID: 2745-R-DP-04001



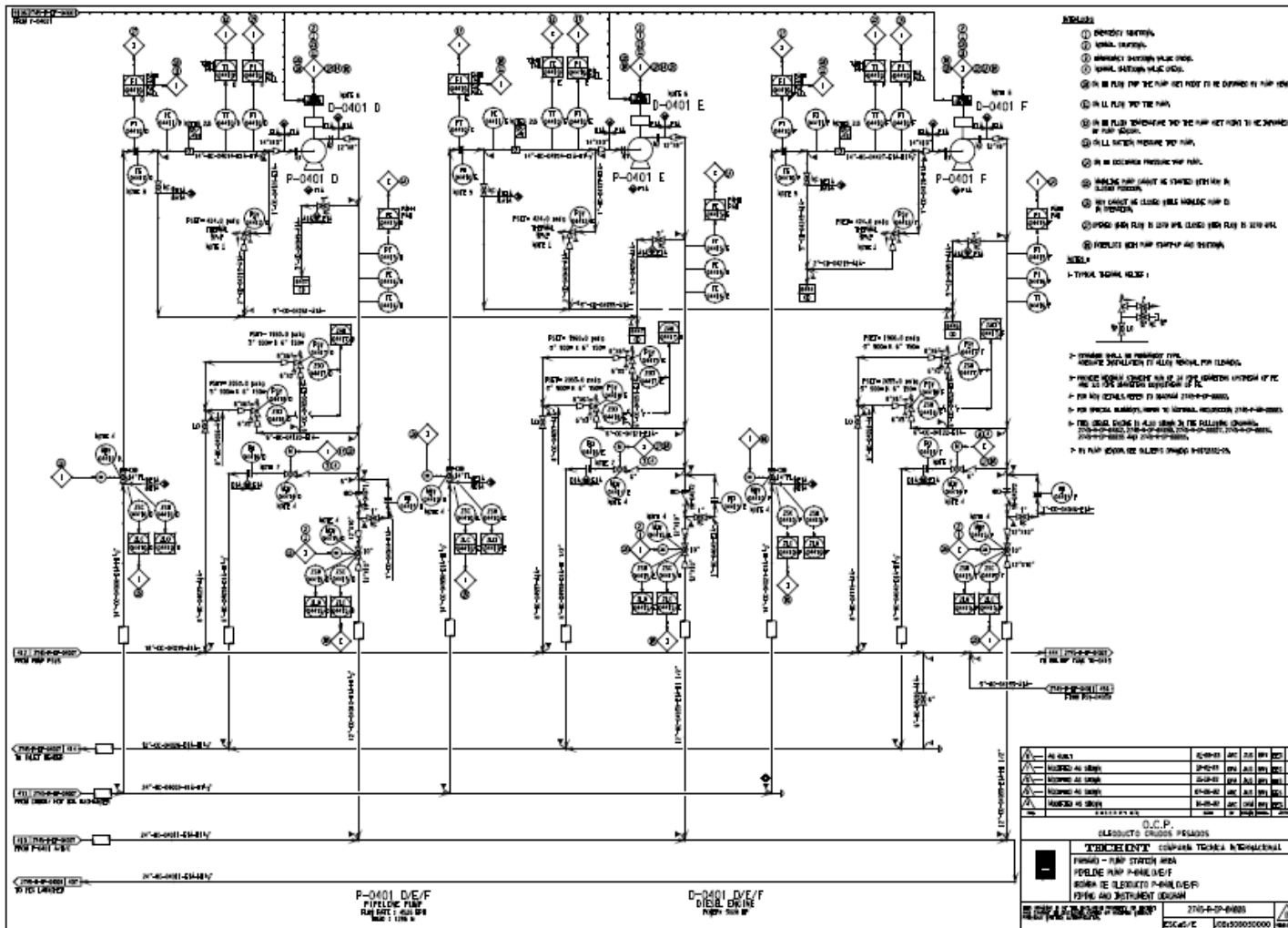
Fuente:(OCP, 2013)





Fuente:(OCP, 2013)

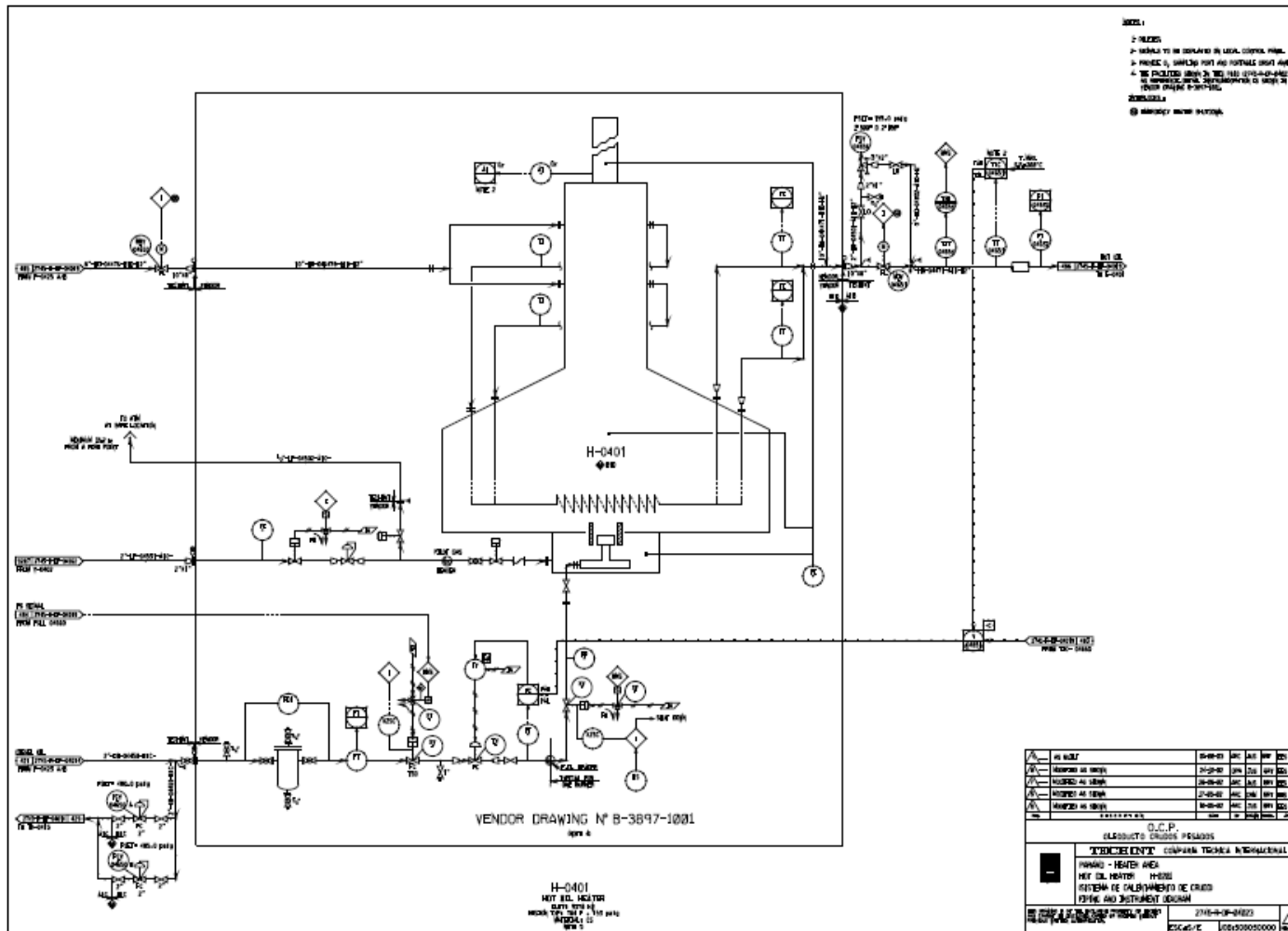




Fuente:(OCP, 2013)




P&ID: 2745-R-DP-04023



Fuente:(OCP, 2013)

ANEXO B: MATRIZ DE RIESGO DE OCP

 <b>MATRIZ DE RIESGO OCP - ECUADOR</b>										1	2	3	4	5	
										IMPROBABLE	POCO PROBABLE	PROBABLE	MUY PROBABLE	INMINENTE	
										Su ocurrencia es teóricamente posible, pero no se conoce que haya ocurrido en la industria	Evento posible en la industria, pero raramente ocurre	Ha ocurrido en la empresa	Ha ocurrido mas de dos veces en la empresa	Su ocurrencia es inminente y ocurre en el muy corto plazo	
										1E-6 a 1E-3	1E-3 a 1E-2	1E-2 a 1E-1	1E-1 a 5E-1	5E-1 a 9.5E-1	
Dimensión	Personas	Económico	Operaciones	Ambiente	Cientes	Comunidad	Imagen	NRA / AFO							
CONSECUENCIAS	5	Muy alto	Fatalidad, incapacidad permanente total	> US\$ 6.000.000	Suspensión del transporte por un periodo mayor a 3 meses	Impacto regional y remediación en más de 1 año	Veto como proveedor de transporte	Indignación y revuelta generalizada	Daño irreparable e indignación generalizada		M	M	A	E	E
	4	Alto	Incapacidad permanente parcial	US\$ 6.000.000 - US\$ 230.001	Suspensión del transporte con afectación a la producción (mayor a 8 días y hasta 3 meses)	Impacto regional y remediación hasta 1 año	Pérdida de cliente	Acciones directas y significativas en contra de la empresa	Daño significativo que requiere medidas importantes de reparación		B	M	A	E	E
	3	Medio	Incapacidad temporal	US\$ 230.000 - US\$ 50.001	Suspensión del transporte con afectación a la recepción y sin afectación a la producción (hasta 8 días)	Impacto local y remediación hasta 6 meses	Quejas y/o reclamos	Quejas de la comunidad	Daño moderado y temporal		B	M	M	M	A
	2	Bajo	Lesión leve, solo primeros auxilios	US\$ 50.000 - US\$ 10.001	Suspensión del transporte sin afectación a la recepción (hasta 5 días)	Impacto local y remediación hasta 3 meses	Incumplimiento de las condiciones acordadas	Solicitudes puntuales	Daño mínimo y circunstancial		MB	B	M	M	M
	1	Muy bajo	Incidente sin lesiones	< US\$ 10.000	Suspensión del transporte (hasta 2 días)	Impacto puntual (no sale de las instalaciones) y remediación hasta 1 mes	Inconformidades menores	Inconformidades menores	Percepciones negativas		MB	MB	B	B	M

Fuente:(OCP, 2013)

## ANEXO C: HAZOP ESTACIÓN PÁRAMO

Causas	Consecuencias	Protecciones	Recomendaciones	Responsable	Categoría
			53. IDENTIFICAR LA NECESIDAD DE QUE LA VÁLVULA MANUAL DE 34" VM-03014 UBICADA AGUAS ABAJO DE LA TRAMPA DE ENVÍO L-0302 FUNCIONE COMO UNA VÁLVULA DE PARADA DE EMERGENCIA PARA PERMITIR SECTORIZAR LA ESTACIÓN SARDINAS DEL OLEODUCTO	INGENIERÍA	IA
5. BLOQUEO DE LA VÁLVULA MANUAL DE 34" VM-03014 DE SALIDA DE LA ESTACIÓN SARDINAS	5.1. SIMILAR A LAS CONSECUENCIAS IDENTIFICADAS Y ANALIZADAS EN LA CAUSA 2 NODO 4		53. IDENTIFICAR LA NECESIDAD DE QUE LA VÁLVULA MANUAL DE 34" VM-03014 UBICADA AGUAS ABAJO DE LA TRAMPA DE ENVÍO L-0302 FUNCIONE COMO UNA VÁLVULA DE PARADA DE EMERGENCIA PARA PERMITIR SECTORIZAR LA ESTACIÓN SARDINAS DEL OLEODUCTO	INGENIERÍA	IA
6. BLOQUEO DE CUALQUIERA DE LAS VÁLVULAS DE SECCIONAMIENTO DEL OLEODUCTO SARDINAS - PÁRAMO	6.1. SIMILAR A LAS CONSECUENCIAS IDENTIFICADAS Y ANALIZADAS EN LA CAUSA 2 NODO 4		26. VERIFICAR LOS VALORES DE AJUSTES DEL LINE BREAK SYSTEM (LBS) DE FORMA TAL QUE NO GENERE PAROS NO DESEADOS DURANTE LAS DIFERENTES MANIOBRAS OPERACIONALES DEL OLEODUCTO	INGENIERÍA	I
			27. ASEGURAR QUE EL NIVEL SIL ASOCIADO AL SISTEMA DE SECCIONAMIENTO DEL OLEODUCTO SATISFACE EL RIESGO META PARA LOS DIFERENTES TRAMOS	INGENIERÍA	I
7. BLOQUEO DE LA VÁLVULA MANUAL DE 34" VM-04001 DE ENTRADA A LA ESTACIÓN PÁRAMO	7.1. SIMILAR A LAS CONSECUENCIAS IDENTIFICADAS Y ANALIZADAS EN LA CAUSA 2 NODO 4		54. IDENTIFICAR LA NECESIDAD DE QUE LA VÁLVULA MANUAL DE 34" VM-04001 UBICADA AGUAS ARRIBA DE LA TRAMPA DE RECIBO R-0401 FUNCIONE COMO UNA VÁLVULA DE PARADA DE EMERGENCIA PARA PERMITIR SECTORIZAR LA ESTACIÓN PÁRAMO DEL OLEODUCTO	INGENIERÍA	IA

Fuente:(OCP, 2013)

Causas	Consecuencias	Protecciones	Recomendaciones	Responsable	Categoría
8. FALLA CERRADA DE LA ESDV-04004	8.1. SIMILAR A LAS CONSECUENCIAS IDENTIFICADAS Y ANALIZADAS EN LA CAUSA 2 NODO 4		55. DECLARAR LAS VÁLVULAS ESDV-04004 Y ESDV-04003 COMO VÁLVULAS OPERACIONALES QUE SERÁN DEMANDADAS DURANTE LA ACTIVIDAD DE CORRIDA DE HERRAMIENTA	INGENIERÍA	IA
			56. DETERMINAR EN FUNCIÓN DEL NIVEL SIL LA NECESIDAD DE INCLUIR VÁLVULA DE PARADA DE EMERGENCIA EN LA LÍNEA DE 34" DE LLEGADA DEL OLEODUCTO EN LA ESTACIÓN PÁRAMO Y DETERMINAR LA NECESIDAD DE LAS ESDV-04004 Y ESDV-04003	INGENIERÍA	IA
9. TAPONAMIENTO DEL FILTRO F-0404	9.1. SIMILAR A LAS CONSECUENCIAS IDENTIFICADAS Y ANALIZADAS EN LA CAUSA 2 NODO 4		57. EVALUAR EL DESTINO DE LOS RESIDUALES PRODUCTO DE LAS CORRIDAS DE HERRAMIENTAS DE FORMA DE IDENTIFICAR LA POSIBILIDAD DE DERIVARLO A UN SISTEMA ALTERNO TAL QUE SE PREVENGA LA AFECTACIÓN DE FILTROS, SELLOS DE BOMBAS Y ARRASTRE DE SEDIMENTOS HACIA LOS TANQUES FINALES DEL TERMINAL MARÍTIMO	INGENIERÍA	II
			58. EVALUAR LA CARACTERÍSTICA DEL PERFIL HIDRÁULICO PARA EL TRANSPORTE DEL FLUIDO A LO LARGO DEL OLEODUCTO DE FORMA DE IDENTIFICAR LOS FACTORES QUE GENERAN DEPOSICIÓN DE SÓLIDOS, FORMACIÓN DE TAPONES Y SEPARACIÓN DE FASES EN EL OLEODUCTO TAL QUE SE INCORPOREN LAS ACCIONES CORRECTIVAS NECESARIAS PARA REDUCIR ESTE EVENTO ASÍ COMO SUS CONSECUENCIAS SOBRE LOS EQUIPOS DE PROCESO	INGENIERÍA	II

Fuente:(OCP, 2013)

Causas	Consecuencias	Protecciones	Recomendaciones	Responsable	Categoría
10. BLOQUEO DE CUALQUIERA DE LAS VÁLVULAS MANUALES ASOCIADAS AL FILTRO F-0404	10.1. SIMILAR A LAS CONSECUENCIAS IDENTIFICADAS Y ANALIZADAS EN LA CAUSA 2 NODO 4		1. NO SE SUGIEREN RECOMENDACIONES		
11. BLOQUEO DE LA VÁLVULA MANUAL DE 16" DE ENTRADA DE CRUDO AL INTERCAMBIADOR E-0401	11.1. SIMILAR A LAS CONSECUENCIAS IDENTIFICADAS Y ANALIZADAS EN LA CAUSA 2 NODO 4		59. CONSIDERAR MODIFICAR EL ESQUEMA NORMAL DE OPERACIÓN DE FORMA TAL QUE EL CRUDO NO PASE A TRAVÉS DEL INTERCAMBIADOR E-0401 SINO SEA DIRECCIONADO A TRAVÉS DEL DESVÍO A LA SUCCIÓN DE LAS BOMBAS P-0401. EN CASO DE QUE ESTA CONDICIÓN PUEDA AFECTAR AL SISTEMA DE HOT OIL INCLUIR LAS VARIANTES NECESARIAS EN DICHO SISTEMA PARA ASEGURAR LA CALIDAD DEL SERVICIO (PARA PREVENIR LA HUMEDAD EN EL ACEITE TÉRMICO)	INGENIERÍA Y OPERACIONES	I
12. BLOQUEO DE LA VÁLVULA MANUAL DE 16" DE SALIDA DE CRUDO DEL INTERCAMBIADOR E-0401	12.1. SIMILAR A LAS CONSECUENCIAS IDENTIFICADAS Y ANALIZADAS EN LA CAUSA 2 NODO 4		59. CONSIDERAR MODIFICAR EL ESQUEMA NORMAL DE OPERACIÓN DE FORMA TAL QUE EL CRUDO NO PASE A TRAVÉS DEL INTERCAMBIADOR E-0401 SINO SEA DIRECCIONADO A TRAVÉS DEL DESVÍO A LA SUCCIÓN DE LAS BOMBAS P-0401. EN CASO DE QUE ESTA CONDICIÓN PUEDA AFECTAR AL SISTEMA DE HOT OIL INCLUIR LAS VARIANTES NECESARIAS EN DICHO SISTEMA PARA ASEGURAR LA CALIDAD DEL SERVICIO (PARA PREVENIR LA HUMEDAD EN EL ACEITE TÉRMICO)	INGENIERÍA Y OPERACIONES	I

Fuente:(OCP, 2013)

Causas	Consecuencias	Protecciones	Recomendaciones	Responsable	Categoría
13. FALLA CERRADA DE LA FV-04661	13.1. SIMILAR A LAS CONSECUENCIAS IDENTIFICADAS Y ANALIZADAS EN LA CAUSA 2 NODO 4		59. CONSIDERAR MODIFICAR EL ESQUEMA NORMAL DE OPERACION DE FORMA TAL QUE EL CRUDO NO PASE A TRAVÉS DEL INTERCAMBIADOR E-0401 SINO SEA DIRECCIONADO A TRAVÉS DEL DESVÍO A LA SUCCIÓN DE LAS BOMBAS P-0401. EN CASO DE QUE ESTA CONDICIÓN PUEDA AFECTAR AL SISTEMA DE HOT OIL INCLUIR LAS VARIANTES NECESARIAS EN DICHO SISTEMA PARA ASEGURAR LA CALIDAD DEL SERVICIO (PARA PREVENIR LA HUMEDAD EN EL ACEITE TÉRMICO)	INGENIERÍA Y OPERACIONES	I
14. APERTURA DE LA VÁLVULA MANUAL DE DESVÍO DEL INTERCAMBIADOR E-0401	14.1. NO SE IDENTIFICARON CONSECUENCIAS RELEVANTES EN EL PROCESO AUN CUANDO PUDIERA AFECTARSE LA CALIDAD DEL ACEITE TÉRMICO DEBIDO A LA DISMINUCIÓN DE TEMPERATURA		59. CONSIDERAR MODIFICAR EL ESQUEMA NORMAL DE OPERACIÓN DE FORMA TAL QUE EL CRUDO NO PASE A TRAVÉS DEL INTERCAMBIADOR E-0401 SINO SEA DIRECCIONADO A TRAVÉS DEL DESVÍO A LA SUCCIÓN DE LAS BOMBAS P-0401. EN CASO DE QUE ESTA CONDICIÓN PUEDA AFECTAR AL SISTEMA DE HOT OIL INCLUIR LAS VARIANTES NECESARIAS EN DICHO SISTEMA PARA ASEGURAR LA CALIDAD DEL SERVICIO (PARA PREVENIR LA HUMEDAD EN EL ACEITE TÉRMICO)	INGENIERÍA Y OPERACIONES	I
15. CIERRE DE LA MOV-04410A	15.1. SIMILAR A LAS CONSECUENCIAS IDENTIFICADAS Y ANALIZADAS EN LA CAUSA 2 NODO 4		60. CONFIGURAR ENCLAVAMIENTO PARA PARADA DE LA BOMBA P-0401A POR POSICIÓN DE LA MOV-04410A DE FORMA TAL QUE SIEMPRE ESTÉ TOTALMENTE ABIERTA	INGENIERÍA Y OPERACIONES	III
16. TAPONAMIENTO DEL FILTRO DE SUCCIÓN DE LA BOMBA P-0401A	16.1. SIMILAR A LAS CONSECUENCIAS IDENTIFICADAS Y ANALIZADAS EN LA CAUSA 2 NODO 4		1. NO SE SUGIEREN RECOMENDACIONES		

Fuente:(OCP, 2013)



Causas	Consecuencias	Protecciones	Recomendaciones	Responsable	Categoría
1. PARADA DE LA BOMBA P-0401A	1.1. INCREMENTO DE PRESIÓN AGUAS ARRIBA DE LA BOMBA CON AFECTACIÓN DE LAS ESTACIONES PÁRAMO, SARDINAS, CAYAGAMA Y AMAZONAS	1.1. PROTECCIONES ASOCIADAS A LA ESTACIÓN AMAZONAS	61. EVALUAR EL SISTEMA DE BOMBEO DE PÁRAMO DE FORMA DE INCREMENTAR EN LA MEDIDA DE LO POSIBLE LA PRESIÓN DE DESCARGA CON LA FINALIDAD DE PREVENIR BAJAS PRESIONES EN EL TRAYECTO PÁRAMO-CHIQUILPE TAL QUE SE ORIGINE FLASHING DE PRODUCTO	INGENIERÍA Y OPERACIONES	II
	1.2. CORTE EN LA TRANSFERENCIA DE FLUIDO A TRAVÉS DEL OLEODUCTO DE OCP HACIA EL TERMINAL MARÍTIMO	1.2. PROTECCIONES ASOCIADAS A LA ESTACIÓN CAYAGAMA	59. CONSIDERAR MODIFICAR EL ESQUEMA NORMAL DE OPERACIÓN DE FORMA TAL QUE EL CRUDO NO PASE A TRAVÉS DEL INTERCAMBIADOR E-0401 SINO SEA DIRECCIONADO A TRAVÉS DEL DESVÍO A LA SUCCIÓN DE LAS BOMBAS P-0401. EN CASO DE QUE ESTA CONDICIÓN PUEDA AFECTAR AL SISTEMA DE HOT OIL INCLUIR LAS VARIANTES NECESARIAS EN DICHO SISTEMA PARA ASEGURAR LA CALIDAD DEL SERVICIO (PARA PREVENIR LA HUMEDAD EN EL ACEITE TÉRMICO)	INGENIERÍA Y OPERACIONES	I
		1.3. PROTECCIONES ASOCIADAS A LA ESTACIÓN SARDINAS	58. EVALUAR LA CARACTERÍSTICA DEL PERFIL HIDRÁULICO PARA EL TRANSPORTE DEL FLUIDO A LO LARGO DEL OLEODUCTO DE FORMA DE IDENTIFICAR LOS FACTORES QUE GENERAN DEPOSICIÓN DE SÓLIDOS, FORMACIÓN DE TAPONES Y SEPARACIÓN DE FASES EN EL OLEODUCTO TAL QUE SE INCORPOREN LAS ACCIONES CORRECTIVAS NECESARIAS PARA REDUCIR ESTE EVENTO ASÍ COMO SUS CONSECUENCIAS SOBRE LOS EQUIPOS DE PROCESO	INGENIERÍA	II
		1.4. PROTECCIONES ASOCIADAS A LA ESTACIÓN PÁRAMO			

Fuente:(OCP, 2013)

Causas	Consecuencias	Protecciones	Recomendaciones	Responsable	Categoría
2. CIERRE DE LA MOV-04415A	2.1. INCREMENTO DE PRESIÓN EN LA DESCARGA DE LA BOMBA P-0401A CON POSIBLE AFECTACIÓN DE LA INTEGRIDAD MECÁNICA DEL SISTEMA	2.1. PT-04415A CON ALARMA POR ALTA PRESIÓN Y MUY ALTA PRESIÓN Y ENCLAVAMIENTO PARA PARADA DE LA BOMBA	62. CONFIGURAR ENCLAVAMIENTO PARA PARADA DE LA BOMBA P-0401A POR POSICIÓN DE LA MOV-04415A DE FORMA TAL QUE SIEMPRE ESTÉ TOTALMENTE ABIERTA	INGENIERÍA Y OPERACIONES	III
	2.2. INCREMENTO DE PRESIÓN AGUAS ARRIBA DE LA BOMBA CON AFECTACIÓN DE LAS ESTACIONES PÁRAMO, SARDINAS, CAYAGAMA Y AMAZONAS	2.2. PSV-04417A/18A			
	2.3. CORTE EN LA TRANSFERENCIA DE FLUIDO A TRAVÉS DEL OLEODUCTO DE OCP HACIA EL TERMINAL MARÍTIMO	2.3. PROTECCIONES ASOCIADAS A LA ESTACIÓN AMAZONAS			
		2.4. PROTECCIONES ASOCIADAS A LA ESTACIÓN CAYAGAMA			
		2.5. PROTECCIONES ASOCIADAS A LA ESTACIÓN SARDINAS			
		2.6. PROTECCIONES ASOCIADAS A LA ESTACIÓN PÁRAMO			

Fuente:(OCP, 2013)

Causas	Consecuencias	Protecciones	Recomendaciones	Responsable	Categoría
3. APERTURA DE LA MOV-04414A	3.1. RECIRCULACIÓN CONTINUA DE FLUIDO A LA SUCCIÓN DE LAS BOMBAS P-0401A CON INCREMENTO DE PRESIÓN EN LA SUCCIÓN	3.1. FT-04410A CON ALARMA POR ALTO FLUJO Y MUY ALTO FLUJO Y ENCLAVAMIENTO PARA PARADA DE LA BOMBA	63. CONFIGURAR ENCLAVAMIENTO EN LA DESCARGA DE LAS BOMBAS DE LAS ESTACIONES AMAZONAS, CAYAGAMA, SARDINAS Y PARAMO PARA QUE LAS VÁLVULAS DE RECIRCULACIÓN SOLO PUEDAN OPERARSE (ENERGIZARSE) CUANDO LA BOMBA ESTÉ EN CONDICIÓN DE ARRANQUE	INGENIERÍA	I
	3.2. INCREMENTO DE PRESIÓN AGUAS ARRIBA DE LA BOMBA CON AFECTACIÓN DE LAS ESTACIONES PÁRAMO, SARDINAS, CAYAGAMA Y AMAZONAS	3.2. TT-04410A CON ALARMA POR ALTA TEMPERATURA Y MUY ALTA TEMPERATURA ENCLAVAMIENTO PARA PARADA DE LA BOMBA			
	3.3. CORTE EN LA TRANSFERENCIA DE FLUIDO A TRAVÉS DEL OLEODUCTO DE OCP HACIA EL TERMINAL MARÍTIMO	3.3. PROTECCIONES ASOCIADAS A LA ESTACIÓN AMAZONAS			
		3.4. PROTECCIONES ASOCIADAS A LA ESTACIÓN CAYAGAMA			
3.5. PROTECCIONES ASOCIADAS A LA ESTACIÓN SARDINAS					
	3.6. PROTECCIONES ASOCIADAS A LA ESTACIÓN PÁRAMO				
4. FALLA CERRADA DE LA ESDV-04014	4.1. SIMILAR A LAS CONSECUENCIAS IDENTIFICADAS Y ANALIZADAS EN LA CAUSA 2 NODO 5		64. DECLARAR LAS VÁLVULAS ESDV-04014 Y ESDV-04013 COMO VÁLVULAS OPERACIONALES QUE SERÁN DEMANDADAS DURANTE LA ACTIVIDAD DE CORRIDA DE HERRAMIENTA	INGENIERÍA	IA

Fuente:(OCP, 2013)

Causas	Consecuencias	Protecciones	Recomendaciones	Responsable	Categoría
			65. DETERMINAR EN FUNCIÓN DEL NIVEL SIL LA NECESIDAD DE INCLUIR VÁLVULA DE PARADA DE EMERGENCIA EN LA LÍNEA DE 34" DE SALIDA DEL OLEODUCTO EN LA ESTACIÓN PÁRAMO Y DETERMINAR LA NECESIDAD DE LAS ESDV-04014 Y ESDV-04013	INGENIERÍA	IA
			66. IDENTIFICAR LA NECESIDAD DE QUE LA VÁLVULA MANUAL DE 32" VM-04014 UBICADA AGUAS ABAJO DE LA TRAMPA DE ENVÍO L-0402 FUNCIONE COMO UNA VÁLVULA DE PARADA DE EMERGENCIA PARA PERMITIR SECTORIZAR LA ESTACIÓN PÁRAMO DEL OLEODUCTO	INGENIERÍA	IA
5. BLOQUEO DE LA VÁLVULA MANUAL DE 32" VM-04014 UBICADA AGUAS ABAJO DE LA TRAMPA DE ENVÍO L-0402 A LA SALIDA DE LA ESTACIÓN PÁRAMO	5.1. SIMILAR A LAS CONSECUENCIAS IDENTIFICADAS Y ANALIZADAS EN LA CAUSA 2 NODO 5		66. IDENTIFICAR LA NECESIDAD DE QUE LA VÁLVULA MANUAL DE 32" VM-04014 UBICADA AGUAS ABAJO DE LA TRAMPA DE ENVÍO L-0402 FUNCIONE COMO UNA VÁLVULA DE PARADA DE EMERGENCIA PARA PERMITIR SECTORIZAR LA ESTACIÓN PÁRAMO DEL OLEODUCTO	INGENIERÍA	IA
6. BLOQUEO DE CUALQUIERA DE LAS VÁLVULAS DE SECCIONAMIENTO DEL OLEODUCTO PÁRAMO - CHIQUILPE	6.1. SIMILAR A LAS CONSECUENCIAS IDENTIFICADAS Y ANALIZADAS EN LA CAUSA 2 NODO 5		26. VERIFICAR LOS VALORES DE AJUSTES DEL LINE BREAK SYSTEM (LBS) DE FORMA TAL QUE NO GENERE PAROS NO DESEADOS DURANTE LAS DIFERENTES MANIOBRAS OPERACIONALES DEL OLEODUCTO	INGENIERÍA	I
			27. ASEGURAR QUE EL NIVEL SIL ASOCIADO AL SISTEMA DE SECCIONAMIENTO DEL OLEODUCTO SATISFACE EL RIESGO META PARA LOS DIFERENTES TRAMOS	INGENIERÍA	I

Fuente:(OCP, 2013)

## ANEXO D: PROBABILIDAD DE IGNICIÓN

Fluido	Situación	Probabilidad de ignición
Gas	Confinado	0.5
	Semi Confinado	0.3
	Abierto	0.2
Aceite	Confinado	0.15
	Semi Confinado	0.08
	Abierto	0.05

Realizado por: Ojeda, 2017.

Fuente:(OCP and TECNIEQUIPOS, 2016a)

## ANEXO E: PROBABILIDAD DE CAPAS DE PROTECCIÓN

Medidas de reducción de riesgo	PFD	RRF
Válvula de alivio	2,00E-02	100
Disco de ruptura	2,00E-02	100
BPCS	1,00E-01	10
Válvula Check	1,00E-01	10
SIF	Mirar en la norma IEC: 61508	
SIL 1 SIS	1,00E-02	10-100
	1,00E-01	
SIL 2 SIS	1,00E-03	100-1000
	1,00E-02	
SIL 3 SIS	1,00E-04	1000-10000
	1,00E-03	

Realizado por: Ojeda, 2017.

Fuente:(OCP and TECNIEQUIPOS, 2016a)

## ANEXO F: BASE DE DATOS DE FALLAS DE EQUIPOS

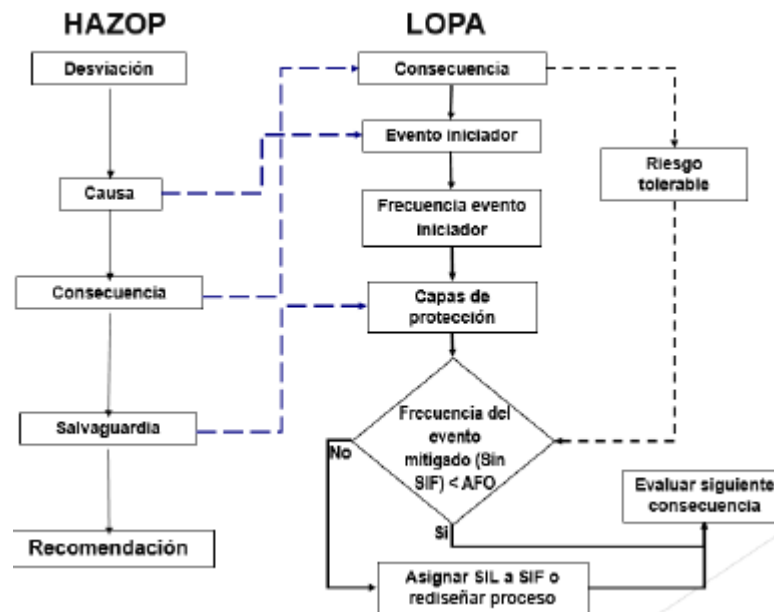
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
ESTACION	OT	TIPO	TAG	DESCRIPCION	F. INI REAL	NODC	CRITICI	DETE	MEC	CAUSA	COD A	MDO	SER	MATERIA	HERR	EN US	HORAS		
6	CAYAGAMA	3114	Mtto - Correctivo U-02258	REVISION PROGRAMA DE PURIFICAC	05-nov-10 00:00:00	#	SPO	XV	3	3.5-	1.0	3.5-	0	0	0	0	0	0	0
93	OFFSHORE	3132	Mtto - Condicion PE-113018	Cambio kit de bomba	16-dic-10 00:00:00	#	SPO	I	3	1.1-	3.4	1	0	0	2,146.79	0	2,146.79	6	
103	AMAZONAS	3230	Mtto - Correctivo AMAZONAS.CAL	PREPARACION QUEMADORES BAJO	22-ene-11 00:00:00	#	SPO	XVI	2	1.1-	3.1	1	0	0	3	0	3	78	
158	CAYAGAMA	3256	Mtto - Correctivo U-0229A-M01	REVISION HOT BOX U-0229A	12-feb-11 00:00:00	#	SPO	XVI	6	1.6-	3.0	5.1-	10,94	0	0	0	10,94	4	
188	PUERTO.QUI	3266	Mtto - Correctivo GEA-0711A	CAMBIO DE ROTOR SEAL	20-feb-11 00:00:00	#	SPO	XVI	2	1.0-	3.4	2	0	0	172,46	0	172,46	12	
196	OFFSHORE	3223	Mtto - Condicion CRA-11401	Mantenimiento general de grua Bucy	28-feb-11 00:00:00	#	SPO	VIII	3	1.3-	3.4	3.4	0	0	0	0	0	1	
216	AMAZONAS	3285	Mtto - Correctivo FMC-01001	Actualización Sybervisor	09-mar-11 00:00:00	#	SPO	XV	9	3.5-	5.5	5.0	0	0	0	0	0	4	
221	CAYAGAMA	3292	Mtto - Correctivo GT.02.009.Z2	CAMBIO DE SENSOR DE GAS P-0201	13-mar-11 00:00:00	#	SPO	XVI	5	3.3-	2.0	SPO	0	0	0	0	0	12	
264	CAYAGAMA	3296	Mtto - Correctivo LIT-02110	REVISION RADAR TANQUE DE ALIVI	07-abr-11 00:00:00	#	SPO	XVI	5	3.3-	3.4	SPO	0	0	0	0	0	4	
265	CAYAGAMA	3324	Mtto - Correctivo GT.02.009.Z2	CAMBIO DETECTOR DE GAS	07-abr-11 00:00:00	#	SPO	XVI	A	5.2-	3.2	SPO	0	0	0	0	0	2	
271	CAYAGAMA	3330	Mtto - Correctivo D-0202	INSTALACION DE BORNERAS EN CAI	11-abr-11 00:00:00	#	SPO	XVI	5	4.2-	2.2	SPO	0	0	0	0	0	10	
275	CAYAGAMA	3330	Mtto - Correctivo D-0201	INSTALACION DE BORNERAS CABLE	13-abr-11 00:00:00	#	SPO	XVI	5	4.2-	2.2	SPO	0	0	44,98	0	44,98	6	
276	CAYAGAMA	3324	Mtto - Correctivo GT.02.007.Z2	CAMBIO DETECTOR DE GAS	13-abr-11 00:00:00	#	SPO	XVI	A	5.2-	3.2	SPO	0	0	977,2	0	977,2	3	
309	CAYAGAMA	3357	Mtto - Correctivo ZSO-02015A	CAMBIO DE SWITCH DE NIVEL	09-may-11 00:00:00	#	SPO	XVI	6	6.0-	3.3	SPO	0	0	2	0	2	2	
311	CAYAGAMA	3362	Mtto - Correctivo PSV-02041A	MANTENIMIENTO VALVULA PSV-021	10-may-11 00:00:00	#	SPO	XVI	7	1.6-	3.4	SPO	87,52	0	0	0	87,52	8	
312	AMAZONAS	3362	Mtto - Correctivo G-0104	REV CONTROL BRAKER PRINCIPAL G	10-may-11 00:00:00	#	SPO	XVI	9	3.1-	2.0	FTF	0	0	0	0	0	4	
353	AMAZONAS	3394	Mtto - Correctivo FMC-01002	ACTUALIZACION SOFTWARE SYBER	07-jun-11 00:00:00	#	SPO	XVI	6	3.5-	5.5	6	0	0	0	0	0	0	
383	AMAZONAS	3395	Mtto - Correctivo D-0101D	CALIBRACION GOVERNOR	08-jun-11 00:00:00	#	SPO	XI	7	3.4-	3.0	3.0	0	0	0	0	0	4	
401	AMAZONAS	3436	Mtto - Correctivo AMAZONAS.COI	REV / CAMBIO DE SENSOR UV/IR BT	11-jul-11 00:00:00	#	SPO	XVI	7	3.3-	2.0	2.0	0	0	0	0	0	8	
418	AMAZONAS	3286	Mtto - Correctivo C-0102A	Revisión control	10-mar-11 00:00:00	#	SPO	XVI	2	3.1-	3.1	2	0	0	1,590.14	0	1,590.14	32	
447	CAYAGAMA	3146	Mtto - Correctivo FQJ-02165	CAMBIO DE MEDIDOR	03-ago-11 00:00:00	#	SPO	XVI	9	3.4-	5.5	3.4-	0	0	3,083.38	0	3,083.38	2	
486	CAYAGAMA	3495	Mtto - Correctivo U-0225A-B03	CAMBIO SENSOR DE TEMPERATURA	27-ago-11 00:00:00	#	SPO	XVI	5	3.3-	3.4	AIR	0	0	1,714.58	0	1,714.58	3	
508	CAYAGAMA	3431	Mtto - Correctivo U-0225C-V22	CAMBIO DE REGULADOR DE AGUA	06-sep-11 00:00:00	#	SPO	XVI	6	2.1-	3.4	SPO	0	0	1,265.92	0	1,265.92	2	
514	CAYAGAMA	3505	Mtto - Correctivo CAYAGAMA.AGI	REPARACION BOMBA DE AGUA CAM	09-sep-11 00:00:00	#	SPO	XVI	9	4.2-	3.4	4.2-	0	0	93,41	0	93,41	16	
533	CAYAGAMA	3527	Mtto - Correctivo U-0224A-B004	CAMBIO DE CONTACTORES CALENT	22-sep-11 00:00:00	#	SPO	XVI	5	4.3-	3.4	SPO	0	0	104,93	0	104,93	1	
540	TERMINAL	3525	Mtto - Correctivo PLC-10001	PLC MT mantenimiento correctivo	23-sep-11 00:00:00	#	SPO	XV	4	3.3-	3.1	3.0-	0	0	45,36	0	45,36	12	
551	CAYAGAMA	3537	Mtto - Correctivo UPS-0201	REVISION DE UPS E INVERSOR	29-sep-11 00:00:00	#	SPO	XVI	5	4.2-	3.4	SPO	86,59	0	379,07	0	465,66	19	
556	AMAZONAS	3541	Mtto - Correctivo C-01018	MANTENIMIENTO SISTEMA DE CON	02-oct-11 00:00:00	#	SPO	VIII	6	3.1-	2.2	2.2	0	0	0	0	0	15	

## ANEXO G: INTERFAZ DE GESTIÓN DE ACTIVOS EMPRESARIALES (EAM)

Posición	Descripción	Organización	Estado	Departamento	Clase	Fecha de inicio	Producción	Fuera de servicio	Asignado a
U-0128A-B-VM01	VALVE ERMETO DN6W PN16 DN15	00100	Instalado	AMAZONAS	VALVULA	19-MAR-2001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
U-0128A-B-VM02	VALVE ERMETO DN6W PN16 DN15	00100	Instalado	AMAZONAS	VALVULA	19-MAR-2001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
U-0128C-D-VM01	VALVE ERMETO DN6W PN16 DN15	00100	Instalado	AMAZONAS	VALVULA	19-MAR-2001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
U-0128C-D-VM02	VALVE ERMETO DN6W PN16 DN15	00100	Instalado	AMAZONAS	VALVULA	19-MAR-2001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
U-0128E-F-VM01	VALVE ERMETO DN6W PN16 DN15	00100	Instalado	AMAZONAS	VALVULA	19-MAR-2001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
U-0128E-F-VM02	VALVE ERMETO DN6W PN16 DN15	00100	Instalado	AMAZONAS	VALVULA	19-MAR-2001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
U-0128G-H-VM01	VALVE ERMETO DN6W PN16 DN15	00100	Instalado	AMAZONAS	VALVULA	19-MAR-2001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
U-0128G-H-VM02	VALVE ERMETO DN6W PN16 DN15	00100	Instalado	AMAZONAS	VALVULA	19-MAR-2001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
U-0128I-J-VM01	VALVE ERMETO DN6W PN16 DN15	00100	Instalado	AMAZONAS	VALVULA	19-MAR-2001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
U-0128I-J-VM02	VALVE ERMETO DN6W PN16 DN15	00100	Instalado	AMAZONAS	VALVULA	19-MAR-2001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
U-0140A-VM01	VALVE ERMETO DN6W PN16 DN15	00100	Instalado	AMAZONAS	VALVULA	19-MAR-2001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
U-0140A-VM02	VALVE ERMETO DN6W PN16 DN15	00100	Instalado	AMAZONAS	VALVULA	19-MAR-2001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
U-0140B-VM01	VALVE ERMETO DN6W PN16 DN15	00100	Instalado	AMAZONAS	VALVULA	19-MAR-2001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
U-0140B-VM02	VALVE ERMETO DN6W PN16 DN15	00100	Instalado	AMAZONAS	VALVULA	19-MAR-2001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
U-0140C-VM01	VALVE ERMETO DN6W PN16 DN15	00100	Instalado	AMAZONAS	VALVULA	19-MAR-2001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
U-0140C-VM02	VALVE ERMETO DN6W PN16 DN15	00100	Instalado	AMAZONAS	VALVULA	19-MAR-2001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
U-0228A-B-VM01	VALVE ERMETO DN6W PN16 DN15	00100	Instalado	CAYAGAMA	VALVULA	19-MAR-2001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Fuente:(OCP, 2013)

## ANEXO H: FLUJO GRAMA HAZOP-LOPA



Fuente:(OCP, 2013)

ANEXO I: HOJAS OREDA

Taxonomy no 4.3.5.3		Item Control and Safety Equipment Valves Gate Flare, vent & blow-down									
Population 42	Installations 19	Aggregated time in service (10 <sup>6</sup> hours)						No of demands			
		Calendar time *			Operational time †			Active rep.hrs	Repair (manhours)		
Failure mode	No of failures	Failure rate (per 10 <sup>6</sup> hours)					n /c		Min	Mean	Max
		Lower	Mean	Upper	SD	n /c					
Critical	13 <sup>†</sup>	0.00	5.40	22.91	8.82	4.36	9.8	1.0	14.2	60.0	
	13 <sup>†</sup>	0.17	134.65	552.13	209.19	65.41					
Fail to close on demand	2 <sup>†</sup>	0.00	0.71	2.66	0.96	0.67	1.5	2.0	2.0	2.0	
	2 <sup>†</sup>	0.00	18.50	94.35	40.76	10.06					
Fail to open on demand	10 <sup>†</sup>	0.00	4.49	22.02	9.26	3.96	11.6	1.0	17.2	60.0	
	10 <sup>†</sup>	0.00	110.09	516.04	210.03	50.31					
Spurious operation	1 <sup>†</sup>	0.00	0.29	1.51	0.68	0.34	8.0	8.0	8.0	8.0	
	1 <sup>†</sup>	0.00	5.52	31.87	17.29	5.03					
Degraded	7 <sup>†</sup>	0.00	2.59	12.95	5.53	2.35	7.3	3.0	9.0	30.0	
	7 <sup>†</sup>	0.00	65.22	316.42	131.21	35.22					
External leakage - Process medium	7 <sup>†</sup>	0.00	2.59	12.95	5.53	2.35	7.3	3.0	9.0	30.0	
	7 <sup>†</sup>	0.00	65.22	316.42	131.21	35.22					
Incipient	54 <sup>†</sup>	4.28	19.77	44.57	12.89	18.13	2.1	1.0	3.3	80.0	
	54 <sup>†</sup>	60.05	441.15	1115.90	345.50	271.70					
Abnormal instrument reading	48 <sup>†</sup>	2.70	18.20	45.39	13.93	16.11	2.2	1.0	3.5	80.0	
	48 <sup>†</sup>	41.79	400.82	1073.00	342.26	241.51					
Delayed operation	2 <sup>†</sup>	0.00	0.63	3.38	1.56	0.87	1.0	1.0	1.0	1.0	
	2 <sup>†</sup>	0.37	11.68	35.43	12.20	10.06					
External leakage - Utility medium	4 <sup>†</sup>	0.00	1.21	5.31	2.07	1.34	1.5	1.0	1.5	3.0	
	4 <sup>†</sup>	0.00	29.96	163.71	76.52	20.13					
All modes	74 <sup>†</sup>	6.31	27.84	61.91	17.74	24.84	4.0	1.0	5.8	80.0	
	74 <sup>†</sup>	93.03	652.14	1633.42	503.23	372.32					
Comments											

Taxonomy no 4.3.1.3		Item Control and Safety Equipment Valves Ball Gas systems									
Population 224	Installations 17	Aggregated time in service (10 <sup>6</sup> hours)						No of demands			
		Calendar time *			Operational time †			Active rep.hrs	Repair (manhours)		
Failure mode	No of failures	Failure rate (per 10 <sup>6</sup> hours)					n /c		Min	Mean	Max
		Lower	Mean	Upper	SD	n /c					
Critical	87 <sup>†</sup>	0.00	10.40	50.64	21.10	13.27	5.8	1.0	9.0	113.0	
	87 <sup>†</sup>	0.00	10.90	52.34	21.57	13.71					
Delayed operation	1 <sup>†</sup>	0.00	0.18	0.93	0.42	0.15	56.5	113.0	113.0	113.0	
	1 <sup>†</sup>	0.00	0.21	1.16	0.54	0.16					
Fail to close on demand	52 <sup>†</sup>	0.00	5.86	33.01	17.44	7.93	5.2	1.0	7.1	46.0	
	52 <sup>†</sup>	0.00	6.00	33.76	17.83	8.19					
Fail to open on demand	26 <sup>†</sup>	0.48	3.83	9.84	3.07	3.97	5.3	1.0	9.2	78.0	
	26 <sup>†</sup>	0.46	3.98	10.36	3.25	4.10					
Spurious operation	6 <sup>†</sup>	0.09	0.78	2.05	0.65	0.92	4.3	2.0	7.8	24.0	
	6 <sup>†</sup>	0.10	0.81	2.08	0.65	0.95					
Structural deficiency	2 <sup>†</sup>	0.00	0.29	0.95	0.35	0.31	2.0	2.0	2.0	2.0	
	2 <sup>†</sup>	0.00	0.30	0.97	0.35	0.32					
Degraded	65 <sup>†</sup>	2.48	18.42	46.72	14.48	9.92	9.7	1.0	13.6	92.0	
	65 <sup>†</sup>	2.63	19.29	48.76	15.09	10.24					
Abnormal instrument reading	3 <sup>†</sup>	0.00	0.57	1.94	0.71	0.46	3.5	2.0	4.3	6.0	
	3 <sup>†</sup>	0.01	0.58	1.92	0.70	0.47					
Delayed operation	14 <sup>†</sup>	0.22	2.94	6.40	2.06	2.14	5.5	1.0	9.5	36.0	
	14 <sup>†</sup>	0.16	2.45	7.11	2.35	2.21					
External leakage - Process medium	10 <sup>†</sup>	0.00	2.80	11.82	4.54	1.53	10.8	1.0	13.6	36.0	
	10 <sup>†</sup>	0.00	2.96	12.48	4.79	1.58					
External leakage - Utility medium	17 <sup>†</sup>	0.10	3.33	10.13	3.51	2.59	9.0	1.0	15.2	92.0	
	17 <sup>†</sup>	0.13	3.52	10.62	3.63	2.68					
Internal leakage	10 <sup>†</sup>	0.01	2.27	8.52	3.14	1.53	12.8	4.0	24.6	48.0	
	10 <sup>†</sup>	0.01	2.31	8.59	3.17	1.58					
Other	7 <sup>†</sup>	0.00	3.66	15.78	6.12	1.07	-	2.0	2.3	4.0	
	7 <sup>†</sup>	0.00	3.83	16.55	6.42	1.10					
Plugged/Choked	1 <sup>†</sup>	0.00	0.40	2.07	0.90	0.15	-	-	-	-	
	1 <sup>†</sup>	0.00	0.41	2.10	0.91	0.16					
Structural deficiency	2 <sup>†</sup>	0.00	1.04	5.18	2.21	0.31	-	6.0	6.0	6.0	
	2 <sup>†</sup>	0.00	1.10	5.48	2.33	0.32					
Valve leakage in closed position	1 <sup>†</sup>	0.00	0.17	0.88	0.38	0.15	58.0	70.0	70.0	70.0	
	1 <sup>†</sup>	0.00	0.18	0.91	0.39	0.16					
Incipient	69 <sup>†</sup>	1.35	12.18	32.12	10.16	10.53	5.3	1.0	7.8	67.0	
	69 <sup>†</sup>	1.50	12.62	32.78	10.27	10.87					
Abnormal instrument reading	19 <sup>†</sup>	0.11	3.31	10.01	3.43	2.90	8.1	1.0	11.5	67.0	
	19 <sup>†</sup>	0.13	3.51	10.59	3.61	2.99					
External leakage - Process medium	2 <sup>†</sup>	0.00	0.42	1.98	0.81	0.31	4.0	1.0	4.0	7.0	
	2 <sup>†</sup>	0.00	0.44	2.09	0.86	0.32					
External leakage - Utility medium	18 <sup>†</sup>	0.00	1.37	7.55	3.81	2.75	3.7	2.0	7.4	20.0	
	18 <sup>†</sup>	0.00	1.44	7.90	3.82	2.84					
Comments											

(cont.)

Fuente: (OREDA, 2002)

## ANEXO J: IPLs DE OPERADORES

Medidas de reducción de riesgo	PFD	RRF
Acción de operador en 10 min de respuesta	1,00E-01	10
Acción de operador ante alarma del BPCS en 40 min de respuesta	1,00E-01	10
Acción de operador con 40 min de respuestas	1,00E-01	10

Realizado por: Ojeda, 2017.

Fuente:(OCP and TECNIEQUIPOS, 2016a)

## ANEXO K: INSTRUMENTOS PS-4

VM-04001



Realizado por: Ojeda, 2017.



ESDV-04004, ESDV-04014 y ESDV-04013



Fuente: (OCP, 2017)

F-04004, VM-04002 y VM-4003



Fuente: (OCP, 2017)

L-04002



Fuente: (OCP, 2017)

FV-04661



Fuente: (OCP, 2017)

MOV-4410



Fuente: (OCP, 2017)

P-0411 A/B y F-0413 A/B



Fuente: (OCP, 2017)

## ESTACIÓN PÁRAMO



Realizado por: Ojeda, 2017.

## ANEXO L: FRECUENCIAS DE CAUSAS INICIANTES

Causa Iniciante	Probabilidad de falla (Evanetos por año)
Fallo residual del recipiente de presión	1,00E-06
Falla residual de la tubería	1,00E-05
Fuga de tubería	1,00E-03
Fallo del tanque atmosférico	1,00E-03
Falla de instrumentos del BPCS	1,00E-01
Falla de regulación	1,00E-01
Falla del equipo fijo	1,00E-02
Bombas y otros equipos rotativos	1,00E-01
Perdida de energía	1,00E-01
Error humano	1,00E-01
Exceso de velocidad del motor diesel con ruptura de la carcasa	1,00E-04
Intervención de terceros	1,00E-02
Abertura de valvula de seguridad	2,00E-02
Falla del sello de la bomba	1,00E-01
Pequeño fuego externo	1,00E-01
Gran fuego externo	1,00E-02
Falla de operador	1,00E-01
Otros	Usando la experiencia personal

Realizado por: Ojeda, 2017.

Fuente:(OCP and TECNIEQUIPOS, 2016a)

## ANEXO M: CARACTERÍSTICAS InTouch PANEL

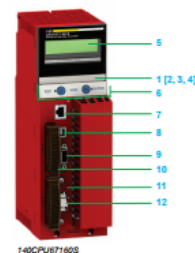
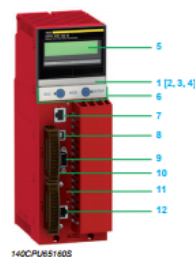
InTouch Panel PC		
	Standard	Premium
<b>Software Configuration</b>		
OS	Windows Embedded Standard 7 32-bit	Windows Embedded Standard 7 64-bit
Bundled Software	InTouch Runtime	
<b>System Hardware</b>		
Processor	Intel® Atom™ E3845 1.91 GHz	Intel® Core™ i7-4650U 3.30 GHz
Memory	4 GB DDR3	8 GB DDR3
Expandable	Y - up to 8GB	Y - up to 16GB
Graphics Processor	Intel HD graphics: DirectX 11.1, OpenCL/GL, 4K videos Quick Sync encoder	
<b>Drives</b>		
Mass Storage	180 GB SATA SSD	
Drive Mounting	Tool-less Single cage	Tool-less Dual cage
SD Expansion	N	N
Disaster-Recovery	Dedicated Media	
<b>Interface Ports</b>		
Ethernet	2 x 10/100/1000 Mbps (isolated)	
USB	4 x USB 2.0	4 x USB 3.0
Serial	1 x RS-232/422/485 (isolated)	1 x RS-232/422/485, 1 x RS-232 (isolated)
External Video	1 x HDMI, 1 x VGA	
Audio	Line-in, Line-out	
<b>General Features</b>		
Modular Components	Y	Y
Fanless	Y	Y
Expansion Slots	N	Y - 1 x half-sized PCIe
Rated Input Voltage	12-24 VDC (100-240 VAC external adapter included) (isolated)	
<b>Environmental</b>		
Protection Class	Front: IP66/NEMA 4/4X; Rear: IP20 / Fanless	
Operating Temperature	0°C to 50°C (32°F to 122°F)	
Operating Humidity	5 to 95% non-condensing	
Storage Temperature	-25°C to +60°C (-13°F to 140°F)	
Shock	DIN EN 60068-2-27 / Operating: 15G, 11 ms duration	
Vibration	DIN EN 60068-2-64 / Operating: 10-500 Hz: 1G / 3 axis	
MTBF	LED-backlight up to 100,000 hours in Eco mode	
<b>Certifications</b>		
<b>Safety Standards</b>		
Europe	CE, based on 2006/95/EC	
U.S.A. / Canada	UL/cUL/CB 61010, UL/cUL/CB 62368	
<b>EMC Standards</b>		
Europe	EN 61000-6-4, EN 61000-6-3, CISPR22, RoHS	
U.S.A. / Canada	FCC47 CFR PART 15, Class B level; IECS-003 Class B	

Fuente:(Schneider, 2016)

## ANEXO M: CARACTERÍSTICAS DEL PROCESADOR DEL SPLC

### Description

### Modicon Quantum automation platform Safety CPUs



#### Description

##### Safety CPUs

140CPU65160S and 140CPU67160S CPUs have the following on the front panel:

- 1 An LCD display cover, providing access to:
  - 2 A key switch:
    - Unlocked: all system operations can be invoked and all changeable module parameters can be modified by the operator via the LCD and keypad. The memory is not write-protected.
    - Locked: no system operations can be invoked and all changeable module parameters are read-only. The memory is write-protected.
  - 3 A backup battery slot (†)
  - 4 A reset button (Restart)
  - 5 An LCD display (2 lines of 16 characters) with brightness and contrast controls
  - 6 A 5-button keypad with 2 LEDs (ESC, ENTER, MOD,  $\uparrow$ ,  $\downarrow$ )
  - 7 An RJ45 connector for connecting to the Modbus bus
  - 8 A type B female USB connector for connecting the programming PC terminal
  - 9 A 9-way female SUB-D connector for connecting to the Modbus Plus network
  - 10 A slot for PCMCIA memory expansion cards (slot A)
  - 11 Two LEDs:
    - COM LED (green): activity on the Ethernet port (model 140CPU65160S), activity on the Hot Standby primary or standby drop (model 140CPU67160S)
    - ERR LED (red): Ethernet frame collisions (model 140CPU65160S), communication error between Hot Standby primary and standby drops (model 140CPU67160S)
  - 12 One connector:
    - RJ45 for connection to the Ethernet network (model 140CPU65160S)
    - MT-RJ optical fibre connector for interconnecting the primary and standby PLCs in the Hot Standby architecture (model 140CPU67160S)

(†) Internal RAM memory backup battery:  
 - Product reference: 990XCP98000  
 - Type: Lithium 3 V =  
 - Capacity: 1200 mAh  
 - Storage life: 10 years

Fuente: (Schneider, 2016)

