



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**TEMA: ESTUDIO DE LA FIABILIDAD DE UN SISTEMA  
INSTRUMENTADO DE SEGURIDAD EN RELACIÓN A LAS  
PRÁCTICAS ONLINE EN UN PROTOTIPO DE UNA PLANTA  
DE NIVEL CON DEPÓSITO DE VOLUMEN VARIABLE EN EL  
LABORATORIO DE PLC'S DE LA UNIVERSIDAD DE LAS  
FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA.**

**AUTORES: LUIS ENRIQUE LOOR CEBALLOS**

**EDWIN ISMAEL RAMÍREZ VELÁSTEGUI**

**DIRECTOR: ING. FREDDY WILLIAM SALAZAR PAREDES**

**LATACUNGA**

**2018**



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**  
**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo titulado ***“ESTUDIO DE LA FIABILIDAD DE UN SISTEMA INSTRUMENTADO DE SEGURIDAD EN RELACIÓN A LAS PRÁCTICAS ONLINE EN UN PROTOTIPO DE UNA PLANTA DE NIVEL CON DEPÓSITO DE VOLUMEN VARIABLE EN EL LABORATORIO DE PLC’S DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA.”*** realizado por LUIS ENRIQUE LOOR CEBALLOS Y EDWIN ISMAEL RAMÍREZ VELÁSTEGUI ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teórico, científicos, técnico, metodológicos, y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores LUIS ENRIQUE LOOR CEBALLOS y EDWIN ISMAEL RAMÍREZ VELÁSTEGUI para que lo sustenten públicamente.

Latacunga, Febrero del 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Freddy Salazar Paredes', is written over a horizontal line. The signature is stylized and cursive.

Ing. Freddy Salazar Paredes  
DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, **LUIS ENRIQUE LOOR CEBALLOS** con cédula de ciudadanía N°0502920481 y **EDWIN ISMAEL RAMÍREZ VELÁSTEGUI** con cédula de ciudadanía N°0503508202, declaramos que el trabajo de titulación denominado ***“ESTUDIO DE LA FIABILIDAD DE UN SISTEMA INSTRUMENTADO DE SEGURIDAD EN RELACIÓN A LAS PRÁCTICAS ONLINE EN UN PROTOTIPO DE UNA PLANTA DE NIVEL CON DEPÓSITO DE VOLUMEN VARIABLE EN EL LABORATORIO DE PLC’S DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA.”***, ha sido desarrollado basándose en una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes y cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría. En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Latacunga, Febrero del 2018.

Luis Enrique Loor Ceballos

C.C.: 050292048-1

Edwin Ismael Ramírez Velástegui

C.C.: 050350820-2



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA**

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Nosotros, **LUIS ENRIQUE LOOR CEBALLOS** con cédula de ciudadanía N°0502920481 y **EDWIN ISMAEL RAMÍREZ VELÁSTEGUI** con cédula de ciudadanía N°0503508202, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE la publicación en el repositorio institucional el proyecto de titulación denominado ***“ESTUDIO DE LA FIABILIDAD DE UN SISTEMA INSTRUMENTADO DE SEGURIDAD EN RELACIÓN A LAS PRÁCTICAS ONLINE EN UN PROTOTIPO DE UNA PLANTA DE NIVEL CON DEPÓSITO DE VOLUMEN VARIABLE EN EL LABORATORIO DE PLC’S DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA.”***, cuyo contenido, ideas y criterios de diseño son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Latacunga, Febrero del 2018.

Luis Enrique Loor Ceballos

C.C.: 050292048-1

Edwin Ismael Ramírez Velástegui

C.C.: 050350820-2

**DEDICATORIA**

*A mis padres y hermanos.*

**LUIS ENRIQUE LOOR CEBALLOS**

*Este es el fruto de años de perseverancia y esfuerzo, el cual se lo dedico a todos quienes me acompañaron a lo largo de esta travesía con su apoyo y amor incondicional, en especial a mi Abuelo Miguel y a mi Madre Myrian quienes son y serán el pilar fundamental de mi vida, que con su ejemplo y dedicación supieron guiarme y me animaron a levantarme en los momentos difíciles, gracias también a cada miembro de mi familia que con su amor y apoyo me brindaron el aliento necesario para continuar.*

**EDWIN ISMAEL RAMÍREZ VELÁSTEGUI**

**AGRADECIMIENTO**

*A esta prestigiosa Universidad por sus conocimientos impartidos y lecciones de vida aprendidas.*

**LUIS ENRIQUE LOOR CEBALLOS**

*Agradezco a Dios por darme la fuerza para continuar, a mis Padres quienes con su sacrificio me apoyaron incondicionalmente para que pueda cumplir mis objetivos, a mi Abuelo Miguel que es un ejemplo de vida y me enseñó el valor de la familia. A mi estimado tutor, directora de carrera y asesores por su apoyo durante todo este trayecto, finalmente agradezco a esta Universidad por su labor en pro de la educación.*

**EDWIN ISMAEL RAMÍREZ VELÁSTEGUI**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

PORTADA .....	i
CERTIFICACIÓN.....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....	iii
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN.....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
RESUMEN .....	xv
ABSTRACT .....	xvi

## CAPÍTULO I

1. PROBLEMÁTICA.....	1
1.1. Planteamiento del problema .....	1
1.1.1. Formulación del problema .....	1
1.2. Antecedentes.....	1
1.3. Justificación .....	2
1.4. Importancia.....	2
1.5. Objetivos.....	2
1.5.1. Objetivo General.....	2
1.5.2. Objetivos Específicos .....	2

## CAPÍTULO II

<b>2.</b>	<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>4</b>
2.1.	Antecedentes Investigativos .....	4
2.2.	Fundamentación teórica .....	5
2.2.1.	Seguridad Industrial.....	5
2.2.2.	Ingeniería en automatización.....	5
2.2.3.	Antecedentes de la investigación .....	6
2.3.	Fundamentación conceptual.....	7
2.3.1.	Definición de Seguridad Funcional .....	7
2.3.2.	Tasa de fallas .....	8
2.3.3.	Determinación de la tasa de fallas.....	9
2.3.4.	Modos de falla .....	10
2.3.5.	Parámetros de medida .....	12
2.3.6.	Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) .....	14
2.3.7.	Sistemas de Control Básico de Proceso (BPCS) .....	15
2.3.8.	Función Instrumentada de Seguridad (SIF).....	16
2.3.9.	Clasificación de la Función Instrumentada de Seguridad (SIF).....	17
2.3.10.	Nivel de Integridad de Seguridad (SIL).....	17
2.3.11.	Determinación de un SIL .....	18
2.3.12.	HazOp .....	20
2.3.13.	Etapas de un HazOp .....	21
2.3.14.	Esquema para el diseño del HazOp .....	22
2.3.15.	Capas de Protección .....	23
2.3.16.	Análisis de Capas de protección (LOPA).....	25
2.3.17.	Representación de capas de protección (LOPA).....	27
2.3.18.	Modelado y confiabilidad de SIS .....	28
2.3.19.	Diagramas de bloques de los lazos de seguridad del SIS.....	29

2.3.20.	Ciclo de vida de seguridad .....	30
2.3.21.	Estándares y Regulaciones .....	33
2.3.22.	IEC 61508.....	33
2.3.23.	IEC 61511.....	34
2.3.24.	Ingeniería concurrente.....	36
2.3.25.	Diseño para la fabricación .....	36
2.3.26.	Método de elementos finitos.....	37
2.3.27.	Diseño para el montaje.....	38
2.3.28.	Montaje.....	40
2.3.29.	Recomendaciones en el diseño para el montaje .....	41
2.3.30.	Diseño para el entorno .....	41
2.3.31.	Ergonomía en el diseño.....	42
2.3.32.	Seguridad de las máquinas .....	42
2.3.33.	Factores de diseño .....	43
2.3.34.	Diseño eléctrico .....	45
2.3.35.	Diseño general, normativas, potencia instalada .....	46
2.3.36.	Elección de arquitectura .....	48
2.3.37.	Protección de los circuitos .....	49
2.3.38.	Diseño del sistema de control.....	50
2.3.39.	Control de procesos industriales .....	50
2.3.40.	Sensores .....	51
2.3.41.	Elementos finales .....	52
2.3.42.	Redundancia .....	52
2.3.43.	Depósito de volumen variable .....	53
2.3.44.	Análisis estadístico .....	54
2.3.45.	Métodos de análisis.....	55

**CAPÍTULO III**

<b>3.</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>57</b>
3.1.	Modalidad de investigación .....	57
3.2.	Tipos de investigación .....	57
3.3.	Niveles de la investigación .....	58
3.4.	Población y muestra .....	58
3.5.	Técnicas de recolección de datos .....	58
3.5.1.	Instrumentos .....	59
3.5.2.	Validez y confiabilidad .....	60
3.6.	Técnicas de análisis de datos.....	60
3.7.	Técnicas de comprobación de la hipótesis .....	60

**CAPÍTULO IV**

<b>4.</b>	<b>RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>61</b>
4.1.	Análisis de resultados.....	61
4.1.1.	Medición de fallas ocurridas en la microplanta de nivel.....	61
4.2.	Discusión de los resultados .....	63
4.2.1.	Resultados del número de fallas ocurridas en el sistema.....	63
4.3.	Comprobación de hipótesis .....	63

**CAPÍTULO V**

<b>5.</b>	<b>PROPUESTA .....</b>	<b>65</b>
5.1.	Datos informativos.....	65
5.2.	Antecedentes de la propuesta .....	65
5.3.	Justificación .....	66
5.4.	Objetivos.....	67
5.5.	Fundamentación propuesta .....	67

5.6.	Diseño de la propuesta.....	67
5.6.1.	Sistemas del diseño.....	67
5.7.	Metodología para ejecutar la propuesta .....	68
5.7.1.	Diseño de un Sistema Instrumentado de Seguridad. ....	68
5.7.2.	Diseño Eléctrico.....	107
5.7.3.	Resultado de diseño de un sistema instrumentado de seguridad.	107

## **CAPÍTULO VI**

<b>6.</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>110</b>
6.1.	Conclusiones .....	110
6.2.	Recomendaciones.....	112

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>113</b>
---	------------

<b>ANEXO A</b>	<b>CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS</b>
<b>ANEXO B</b>	<b>DATASHEET SENSORES ULTRASÓNICOS</b>
<b>ANEXO C</b>	<b>BITÁCORA DE FALLAS</b>
<b>ANEXO D</b>	<b>CASA DE LA CALIDAD</b>
<b>ANEXO E</b>	<b>DIAGRAMA DE CONTROL</b>
<b>ANEXO F</b>	<b>DIAGRAMAS ELÉCTRICOS Y DE CONEXIÓN</b>
<b>ANEXO G</b>	<b>PROGRAMACIÓN</b>
<b>ANEXO H</b>	<b>MANUAL DE OPERACIÓN</b>
<b>ANEXO I</b>	<b>CHECKLIST DESARROLLADOS</b>
<b>ANEXO J</b>	<b>DATASHEET PLC CONTROL LOGIX 1756</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Nivel de integridad de seguridad (SIL).....	18
Tabla 2. Esquema de HazOp.....	22
Tabla 3. Técnicas de identificación de riesgos.....	25
Tabla 4. Representación de las capas de protección .....	27
Tabla 5. Configuración de tiempo medido para las fallas .....	28
Tabla 6. Requisitos del ciclo de vida para la norma.....	35
Tabla 7. Factores de seguridad recomendados para material dúctil.....	44
Tabla 8. Factores de seguridad recomendados para material frágil .....	44
Tabla 9. Metodología para el diseño eléctrico .....	45
Tabla 10. Disposiciones legales de tensión IEC .....	46
Tabla 11. Clasificación de procesos industriales .....	50
Tabla 12. Características de los sensores .....	51
Tabla 13. Partes de un elemento final .....	52
Tabla 14. Defunción de pruebas estadísticas para regresión .....	56
Tabla 15. Recolección de información .....	59
Tabla 16. Información de fallas.....	61
Tabla 17. Tasa de fallas real del sistema.....	62
Tabla 18. Tasa de fallas ideal del sistema .....	62
Tabla 19. Tasas de falla.....	64
Tabla 20. Resultados calculados .....	64
Tabla 21. Etapas de desarrollo de un SIS (HazOp).....	68
Tabla 22. Posibles fallos en el proceso.....	69
Tabla 23. Etapas de desarrollo de un SIS (LOPA).....	72
Tabla 24. Rango de probabilidad de falla .....	73
Tabla 25. Estado del sistema con SIS .....	74
Tabla 26. Estado del sistema con SIS (Capas de Protección).....	74
Tabla 27. Etapas de desarrollo de un SIS (SRS).....	75
Tabla 28. Requerimientos funcionales de un SIS .....	78
Tabla 29. Requerimientos funcionales (Falla Bomba B1) .....	79
Tabla 30. Requerimientos funcionales (Falla Bomba B2) .....	79
Tabla 31. Requerimientos funcionales (Controlador).....	80
Tabla 32. SIL y bloques de seguridad.....	81

Tabla 33. Manual de equipos OREDA.....	82
Tabla 34. Tabla de resultados. Sensor de nivel 1oo1 .....	83
Tabla 35. Tabla de resultados. Sensor de nivel 2oo2.....	85
Tabla 36. Tabla de resultados. Controlador de seguridad 1oo1 .....	87
Tabla 37. Tolerancia a fallas para solucionador lógico .....	90
Tabla 38. Tolerancia a fallas para sensores y elementos finales.....	90
Tabla 39. Etapas de desarrollo de un SIS (Ciclo de Vida).....	95
Tabla 40. Etapas cumplidas en el SIS .....	95
Tabla 41. Etapa de instalación del sistema.....	97
Tabla 42. Etapa de mantenimiento del sistema .....	98
Tabla 43. Etapa de desinstalación .....	99
Tabla 44. Requerimientos de diseño .....	100
Tabla 45. Exigencias del cliente.....	102
Tabla 46. Resultados de esfuerzos.....	105
Tabla 47. Resumen diseño eléctrico.....	107
Tabla 48. Valores obtenidos .....	108
Tabla 49. Resultado de la prueba-T.....	109

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de reducción de riesgo .....	7
Figura 2. Curva de la bañera .....	8
Figura 3. Modos de falla .....	10
Figura 4. Gráfica de MTTF, MTBF y MTRH.....	12
Figura 5. Sistema instrumentado de seguridad.....	14
Figura 6. Ejemplo de SIS y BPCS.....	15
Figura 7. Funciones instrumentadas de seguridad SIF.....	16
Figura 8. Capas de protección (Modelo de la cebolla).....	23
Figura 9. Diagrama de bloques para configuración 1oo1 .....	29
Figura 10. Diagrama de bloque para configuración 1oo2 .....	29
Figura 11. Ciclo de vida de seguridad.....	30
Figura 12. Ejemplo de discretización .....	37
Figura 13. Proceso de discretización .....	38
Figura 14. Diagrama para elegir la arquitectura eléctrica .....	48
Figura 15. Pasos del análisis estadístico .....	54
Figura 16. Diagrama PI&D del sistema.....	68
Figura 17. Modelo en V.....	76
Figura 18. Incógnitas a resolver en el análisis .....	89
Figura 19. Diagrama de bloques lazo 1 .....	91
Figura 20. Diagrama de bloques lazo 1 .....	92
Figura 21. Diagrama de bloques lazo 3 .....	92
Figura 22. Diagrama de bloques lazo 3 .....	93
Figura 23. Diagrama de bloques lazo 2 .....	93
Figura 24. Diagrama de bloques lazo 4-5 .....	94
Figura 25. Esquema final del sistema con SIS.....	94
Figura 26. Diagrama funcional del prototipo .....	101
Figura 27. Estudio del entorno .....	101
Figura 28. Dibujo del prototipo.....	103
Figura 29. Estrés de Von Mises.....	104
Figura 30. Esfuerzo de desplazamiento.....	104
Figura 31. Esfuerzo de tensión .....	105

## RESUMEN

La ejecución del presente trabajo de titulación abarca los principios elementales sobre el mantenimiento y la seguridad que debe tener cualquier proceso industrial a nivel nacional e internacional; además analiza la fiabilidad al usar elementos de seguridad más confiables junto a sistemas de prevención de daños que determinará la diferencia de confiabilidad que existe entre un sistema convencional de seguridad con un sistema instrumentado de seguridad a la hora de mitigar eventos o fallas peligrosas en el transcurso del proceso. Se debe enfatizar de manera técnica el diseño y la implementación de una micro planta de nivel con fines didácticos para ensayos en el laboratorio de PLC de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga, ya que de manera colectiva será utilizada por los alumnos como parte del proceso de enseñanza, referente a los temas control y sistemas instrumentados de seguridad. Finalmente este trabajo de titulación obtendrá una visión clara e integra del funcionamiento de este tipo de sistemas de seguridad, identificando los aspectos vulnerables y fuertes del tema estudiado, permitiendo reducir efectos de falla o eventos peligrosos que suceden comúnmente en el área industrial.

### **Palabras claves:**

- **SISTEMA DE SEGURIDAD**
- **AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIAL**
- **SEGURIDAD INDUSTRIAL**

## **ABSTRACT**

The execution of this project covers the basic principles on the maintenance and safety of any industrial process at national and international level; the analysis of the reliance using more secure elements and more advanced failure prevention systems defines the differences that exist between a conventional security system and a safety instrumented system when mitigating dangerous events or failures in the course of the process. The design and implementation of a micro level plant for teaching purposes should be emphasized in a technical manner for testing in the PLC laboratory of the Armed Forces University, since it will be used by students as part of the process of learning, focusing in the control and safety instrumented system. Finally, this work is a clear and integral vision of the operation of this type of security systems, identifying the vulnerable and strong aspects of the studied subject, which allows to reduce the effects of the failure or dangerous events that happen in the industrial area.

### **Key words:**

- **SAFETY SYSTEM**
- **INDUSTRIAL PROCESS AUTOMATION SYSTEMS**
- **INDUSTRIAL SAFETY**

# CAPÍTULO I

## 1. PROBLEMÁTICA

### 1.1. Planteamiento del problema

Conforme avanzan las tecnologías de comunicación, los sistemas industriales van requiriendo menos monitoreo por parte de los operarios en la planta, actualmente se pueden controlar una infinidad de procesos electromecánicos y de automatización mediante internet o redes industriales, lo cual representa una ventaja al momento de optimizar los recursos tanto humanos como económicos.

Al no tener una supervisión directa, este tipo de sistemas deben contar con métodos de control redundantes, que en caso de fallo minimicen al máximo las consecuencias negativas que se podrían presentar.

A nivel nacional, las industrias han empezado a implementar sistemas más sofisticados para sus operaciones lo que les permite aumentar su productividad y eficiencia. Es por este motivo que se requieren de sistemas de control más eficientes para garantizar la seguridad y el funcionamiento adecuados de este tipo de procesos.

#### 1.1.1. Formulación del problema

¿Cuáles son los efectos y beneficios para los estudiantes y docentes el estudio de la fiabilidad de un sistema instrumentado de seguridad en relación a las prácticas online en un prototipo de una planta de nivel con depósito de volumen variable en el laboratorio de PLC'S de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga?

### 1.2. Antecedentes

Anteriormente en el laboratorio de Controladores Lógicos Programables se implementó un sistema de supervisión vía Internet para prácticas online, el que actualmente se encuentra funcionando de manera óptima, pero para profundizar en el desarrollo de las prácticas y en la fundamentación de conocimientos se requiere de un prototipo de proceso

industrial que permita a los estudiantes trasladar los conocimientos adquiridos a ambientes prácticos, teniendo en cuenta que este será un sistema el cual no tendrá supervisión humana directa en su funcionamiento, se deben tomar todas las medidas de seguridad para garantizar el buen funcionamiento de los equipos y la seguridad en las instalaciones.

### **1.3. Justificación**

Este proyecto es justificable debido a que actualmente en el laboratorio no existen este tipo de módulos, los cuales ofrece la oportunidad de estudiar la fiabilidad de un sistema industrial en condiciones de trabajo continuas para prácticas online.

### **1.4. Importancia**

La importancia de este tema radica en que al estar ya desarrollada la primera parte de este sistema en una tesis anterior, se requiere de este prototipo para complementar el trabajo ya realizado, aplicando un sistema de control redundante que permita al módulo protegerse activamente frente a fallos que pueden ocurrir de manera aleatoria, resguardando la integridad del proceso como el equipo en sí.

### **1.5. Objetivos**

#### **1.5.1. Objetivo General**

Estudiar la fiabilidad de un Sistema Instrumentado de Seguridad mediante la implementación de un prototipo para una planta de control de nivel con depósito de volumen variable para prácticas online en el laboratorio de programadores lógicos controlables.

#### **1.5.2. Objetivos Específicos**

- Diseñar un prototipo para una planta de nivel para prácticas online.
- Construir un prototipo de una planta de nivel para prácticas online.
- Implementar un módulo didáctico de una planta de nivel.

- Realizar un estudio estadístico sobre la fiabilidad del sistema instrumentado de seguridad en el prototipo para determinar el desempeño del módulo.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes Investigativos

El presente trabajo de titulación se basa en la necesidad de generar un estudio de fiabilidad de un sistema instrumentado de seguridad (SIS) en relación con un sistema para el control de procesos, aplicado a las prácticas online en un prototipo de una planta de nivel con depósito de volumen variable.

Como antecedentes para el desarrollo de este trabajo de titulación existen proyectos realizados por otros investigadores que dan valioso aporte en este estudio. Las condiciones de seguridad deben siempre garantizarse y adoptarse en los procesos industriales y son responsabilidad tanto de empleadores como de empleados. Téngase en mente que el primer concepto de las regulaciones de seguridad es garantizar que todos los sistemas sean instalados y manejados de manera segura y el segundo es que instrumentos y alarmas involucrados en seguridad funcionen con fiabilidad y eficiencia. (Smar S.A, 2014)

Para que EPANET evalúe en cada instante el nivel del agua, es necesario introducir el diámetro del depósito, este valor es sencillo en el caso de depósitos cilíndricos, pero en la realidad, la mayoría de depósitos acuden a formas diferentes, por tanto no es tan evidente la caracterización de este parámetro. (Olivares, 2013)

En el informe de Proyecto de Graduación “LA SEGURIDAD FUNCIONAL EN LA INDUSTRIA DE PROCESOS: CONCEPTOS Y METODOLOGÍAS DE DISEÑO” (2014). Previo a la obtención de Grado de Magister en Control y Automatización Industriales el autor Fernando Vanegas Riera detalla el ahorro benéfico para la empresa TUGALT al invertir en el sistema de seguridad para prevenir accidentes o eventos inesperados que pudieran evitarse por la aplicación del Sistema Instrumentado de Seguridad. (Vanegas, 2014)

## **2.2. Fundamentación teórica**

### **2.2.1. Seguridad Industrial**

La seguridad industrial es un campo necesario y obligatorio en toda empresa en el que se estudian, aplican y renuevan constantemente los procesos para de esta forma minimizar los riesgos; toda industria debe tener la responsabilidad de cumplir con una serie de normas y condiciones que deben ofrecer a sus trabajadores para garantizar su seguridad y protección.

Un aspecto muy importante de la seguridad industrial es el uso de estadísticas, que le permite advertir en que sectores suelen producirse los accidentes para extremar las precauciones. La innovación tecnológica, el recambio de maquinarias, la capacitación de los trabajadores y los controles habituales son algunas de las actividades vinculadas a la seguridad industrial, sin embargo la seguridad industrial es relativa, ya que a pesar de que una compañía ofrezca los más altos estándares de calidad, es imposible determinar cuándo sucederá un accidente, y también es improbable saber si la seguridad que tenga esa industria será adecuada para restringir los efectos del daño causado, todo esto dependerá de la magnitud del siniestro.

### **2.2.2. Ingeniería en automatización**

La ingeniería en automatización integra conocimientos de: diseño mecánico, ciencias de la computación, desarrollo de hardware, ingeniería de control y redes de comunicación industrial; que maximicen los estándares de productividad de los sistemas volviéndolos óptimos y eficientes.

Esta rama de la ingeniería se complementa con disciplinas como la supervisión de datos, instrumentación industrial, redes de comunicación industrial, sistemas de control y control de procesos.

La ingeniería en automatización es una rama que cada día tiene mayor demanda en el ámbito industrial debido a que los procesos de producción de las empresas están en una constante carrera contra el tiempo debido a retrasos por fallas que pueden generar grandes pérdidas de carácter económico.

### **2.2.3. Antecedentes de la investigación**

Ocasionalmente, los accidentes mayores ocurren durante el procesamiento o el almacenaje de los materiales o sustancias. Este tipo de accidentes plantea peligros para la salud y la seguridad de los trabajadores, el público y el ambiente. Además pueden originar una responsabilidad económica para las empresas y la comunidad. El costo real total y las causas raíz de este tipo de accidentes, a veces, no llegan a conocerse con exactitud. (Varela, 2014)

En el caso de las máquinas, la seguridad funcional suele ser sinónimo de sistemas fiables que monitorizan las aplicaciones de la máquina, llegando a asumir el control si el funcionamiento seguro se viera comprometido. Por lo tanto, un sistema de este tipo implementa las funciones de seguridad necesaria para detectar situaciones de peligro y para que su funcionamiento tenga lugar dentro de los límites de seguridad. (ABB, 2010)

## 2.3. Fundamentación conceptual

### 2.3.1. Definición de Seguridad Funcional

La seguridad funcional hace referencia a la respuesta de forma adecuada de componentes o subsistemas eléctricos, electromecánicos y electrónicos programables implicados en materia de seguridad antes cualquier estímulo externo, incluyendo errores humanos, fallos de hardware o cambios en su entorno para llevar el proceso a un estado seguro. El objetivo último es minimizar el riesgo. (L. I. Ruiz, 2008)

Seguridad Funcional es la parte de la seguridad que depende de un equipo o sistema que opera correctamente en respuesta a sus entradas, para reducir el riesgo a una magnitud tolerable. (Pecsén, Sistemas instrumentados de seguridad, 2010)

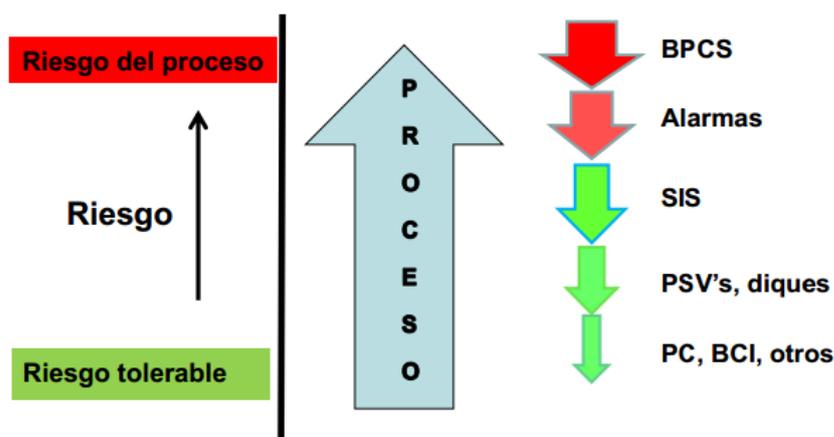


Figura 1. Esquema de reducción de riesgo

Fuente: (Bergstrom, 2009)

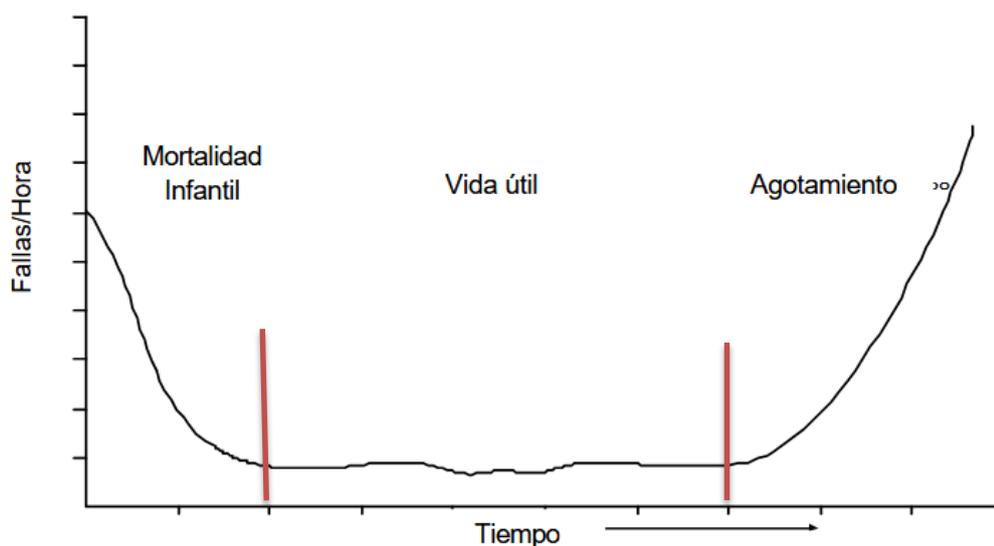
La Figura 1 muestra que todo proceso tiene un riesgo alto de falla, esto se puede reducir con las capas de protección que se indican en la parte derecha. La primera capa es el diseño adecuado del proceso y de su sistema básico de control de proceso, siguiendo por un sistema de alarmas con la intervención del operador, pero en ciertos casos, no es suficiente para reducir el riesgo a un rango tolerable y es donde diseñan los sistemas instrumentados de seguridad. (Bergstrom, 2009)

### 2.3.2. Tasa de fallas

Se lo representa con el símbolo lambda ( $\lambda$ ) y se define como una desaprobación a un concepto definido del funcionamiento de una máquina o sistema.

La tasa de fallas se define como la cantidad de fallas que tiene un equipo en un tiempo determinado (generalmente  $10^6$  horas).

Técnicamente las fallas ocurren cuando los esfuerzos superan los niveles de un conjunto de fortaleza (seguridad del sistema). Los equipos son vulnerables a varios tipos de esfuerzos (pueden ser fallas de diseño, fallas de manufactura, esfuerzos normales del medio ambiente y el uso normal), por lo tanto la tasa de falla nunca puede ser un valor constante en todo tiempo. Según el libro de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad RCM de J. Mourbay: “Los dispositivos tienen tres etapas durante su vida útil, en referencia a la tasa de fallas. Al inicio de la vida del producto se espera una tasa de fallas muy alta y decreciente. Luego, comienza un período con una tasa de falla baja y constante. Por último, existe el período de agotamiento en el que su tasa de falla empieza a incrementarse rápidamente, hasta cumplir con la vida útil”. (Mourbay, 1991).



**Figura 2. Curva de la bañera**

**Fuente:** (Mourbay, 1991)

### 2.3.3. Determinación de la tasa de fallas

Para contar con un valor definido de la tasa de fallas que ocurre en los equipos es necesario tener una base de datos histórica de los eventos que provocaron accidentes en el pasado.

La mejor opción para obtener los datos es usando el record de fallas previas y de mantenimiento de los equipos en la planta. Esta información es mejor debido a que la tasa de fallas aplica a las condiciones bajo las cuales operan los dispositivos o equipos. Desafortunadamente estos datos no están disponibles en la mayoría de los casos o en ciertas ocasiones no están como se los quisiera, debido a falta de modelos de mantenimientos más rigurosos. En modo que no se cuenta con una base de datos específica es posible hacer uso de una base de datos genérica que arroje resultados muy parecidos a los que se presentan el sistema.

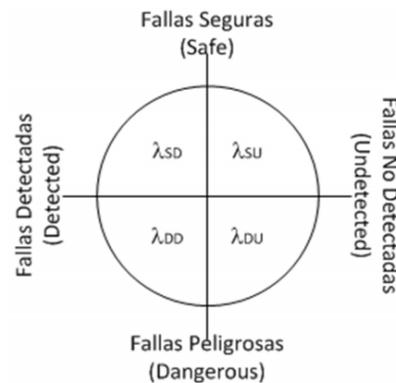
Es posible calcular la tasa de fallas de un equipo el cual tenga un registro de datos, conociendo el número de veces que ha fallado y el tiempo total de operación del mismo y haciendo algunas suposiciones como asumir que la tasa de fallas es constante, esto quiere decir que la falla tiene la misma probabilidad de ocurrir en cualquier momento, de este modo ignoramos la parte mortalidad infantil que es la incidencia de fallas que podrían ocurrir en el instalado inicial y cuando está cerca del final de su vida útil (agotamiento) ya que esta es muy baja por tanto se analizara el tramo de la curva de la bañera donde la tasa de falla es constante y reducida, esto se expresa con la ecuación siguiente.

$$\lambda = \frac{\text{Nº de Fallas}}{\text{Tiempo total de operación}} \quad [1]$$

### 2.3.4. Modos de falla

El modo de falla de un dispositivo es la señal de indicio en la que éste falla. También se puede identificar a un modo de falla como una pérdida de función o simplemente una característica de modo de falla que está empezando a desarrollarse, por ejemplo una fuga, que se observa durante una inspección rutinaria.

Para un sistema de seguridad, la principal preocupación debería ser como podría fallar y no como opera el sistema; por esta razón, los sistemas instrumentados de seguridad difieren de los sistemas activos de control.



**Figura 3. Modos de falla**

**Fuente: (Grunh, 2006)**

Las fallas son catalogadas en seguras y peligrosas, pero también como detectadas y no detectadas, de acuerdo a la Figura 3 en la que se muestran en la parte superior las fallas seguras y las peligrosas en la parte inferior, así también, las fallas no detectadas en la parte derecha y las fallas detectadas son mostradas en la parte izquierda. (Watson, 2001)

#### **Fallas Seguras/Peligrosas**

Los sistemas pueden sufrir fallas en cualquier momento que podrían ocasionar el apagado del algún proceso cuando no existe una emergencia real. El término utilizado en los estándares es “falla segura”, las fallas seguras llegan a ser muy costosas por la acción de paros innecesarios en la producción, cuando un sistema tiene demasiadas fallas seguras aumenta la

desconfianza del personal con el proceso, por lo cual se crean desvíos (bypass) para anular dichas fallas, varios accidentes fatales han tenido lugar debido al desvío de sensores o partes del SIS mientras el proceso seguía ejecutándose. (Watson, 2001)

Otro tipo de fallas son aquellas en las que el sistema no responde ante una demanda real, estas pueden denominarse fallas ocultas que pueden ser fallas peligrosas. Si un sistema funciona de esta manera podría ser potencialmente peligroso, la única manera de revelar estas fallas es realizando pruebas en el sistema antes de que entre en operación. (Watson, 2001)

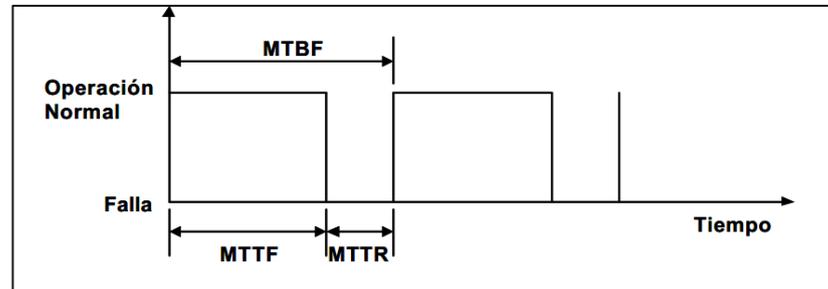
### **Fallas sin efecto**

Es la falla de un componente que no tiene un efecto en la misma pero es parte de la función de seguridad. Son clasificadas como fallas seguras o no detectadas de acuerdo a la norma IEC 6508. Estas fallas tienen cero efectos en la confiabilidad del sistema, por lo tanto, no son incluidas en cálculos de activaciones esporádicas. (Smith D. J., 2011)

La pérdida o falta de protección resulta de diferentes modos de falla sin embargo, las fallas peligrosas detectadas pueden ser descubiertas y reparadas rápidamente (su tiempo de reparación de falla es corto), al contrario de las fallas ocultas, que se manifiestan cuando ocurre una demanda, por lo cual son más importantes para el modelamiento del sistema. (Smith D. J., 2011)

### 2.3.5. Parámetros de medida

**Tiempo medio para fallas (MTTF, Mean Time To Failure).**- Valor esperado de tiempo en el cual se espera que un equipo no presente fallas.



**Figura 4. Gráfica de MTTF, MTBF y MTRH**

**Fuente: (IR-S-02, 1995)**

La Figura 4 indica el Tiempo Promedio entre Fallas (MTBF) el cual mide el tiempo (normalmente en miles de horas) que transcurre desde que un dispositivo o equipo falla y es reparado hasta que falla nuevamente. Esto incluye el concepto de Tiempo Promedio para Reparar (MTTR), que quiere decir el período que transcurre un equipo o dispositivo en volver a operar de manera normal en el sistema luego de la falla.

**Tasa de fallas ( $\lambda$ , Failure rate).**- Número de fallas por unidad de tiempo.

$$\lambda = \frac{1}{MTTF} \quad [2]$$

**Tiempo medio para reparar (MTTR, Mean Time To Repair).**- Valor esperado de tiempo para reparar un sistema.

**Tasa de reparación ( $\mu$ , Failure rate).**- Número de fallas por unidad de tiempo.

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad [3]$$

**Tiempo medio entre fallas (MTBF, Mean Time between Failures).** - Período de tiempo promedio de un ciclo falla/reparación.

$$MTBF = MTF + MTTR \quad [4]$$

**Probabilidad de falla a la demanda (PFD, Probability of Failure on Demand).**- Depende de la tasa de fallas de los equipos, además la PFD depende del modo de falla de los mismo (pudiendo ser una falla segura o falla peligrosa) y el intervalo de tiempo entre pruebas funcionales hechas a los equipos. Si estas pruebas no son realizadas frecuentemente, una vez al año como mínimo, se incrementa el tiempo de ocurrencia a la falla debido a que las fallas tienden a no ser corregidas.

Probabilidad de que un sistema responda como se espera al presentarse una condición peligrosa.

$$PFD = \frac{\lambda t}{2} \quad [5]$$

Esta aproximación es verdadera siempre y cuando la tasa de fallas e intervalo de tiempo entre pruebas sea pequeño, esta simplificación puede ser correcta si la PFD calculada es para valores entre 0.1 y 0.3

### 2.3.6. Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS)

Sistema compuesto por sensores, procesadores lógicos y elementos finales de control cuyo propósito es implementar funciones de seguridad necesarias en caso de existir un evento de riesgo, y llevar al proceso a un estado seguro. (Grunh, 2006)

La Figura 5 muestra de manera simplificada un sistema instrumentado de seguridad el cual es muy parecido a un sistema de control básico, esto quiere decir que los dos sistemas contienen los mismos elementos pero se manejan de una manera diferente.



**Figura 5. Sistema instrumentado de seguridad**

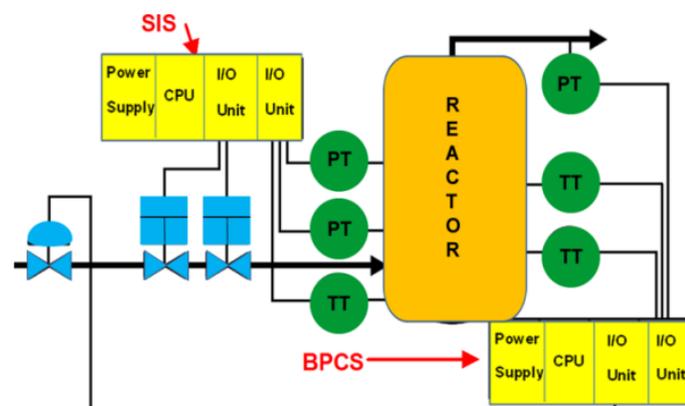
**Fuente: (Siemens, 2008)**

Generalmente el sensor es un transmisor de presión, nivel, temperatura o flujo que continuamente mide la variable del proceso y envía una señal a la unidad lógica o controlador, el cual decide si se ha excedido en su valor límite, posteriormente enviará una señal al elemento final la cual puede ser una válvula de control, válvula de cierre rápido o un pistón. La diferencia principal del sistema de control es que regula y controla el proceso, mientras que el sistema instrumentado de seguridad (SIS) brinda seguridad al proceso utilizando los mismos elementos que el sistema de control pero además evalúa detalladamente las posibles fallas que puedan ocurrir.

### 2.3.7. Sistemas de Control Básico de Proceso (BPCS)

Es la capa de control automatizado que permite al proceso mantener las variables de operación dentro de los valores permitidos por el sistema. Es la primera capa de protección que se implementa y es considerada como una capa de protección, siendo totalmente independiente a un Sistema Instrumentado de Seguridad. (M. A. Lundteigen, Common cause failures in safety instrumented systems on oil and gas installations, 2007)

La Figura 6 muestra un BPCS mostrado en la parte derecha, este consta de dos transmisores de temperatura y un transmisor de presión instalados a la salida del reactor que envían señales al Logic Solver, este procesa los datos y envía una señal a la válvula de control para regular la entrada al reactor. Con la posibilidad de una desviación de la presión o temperatura del reactor, usando una válvula de control para eliminar la desviación y estabilizar el proceso:



**Figura 6. Ejemplo de SIS y BPCS**

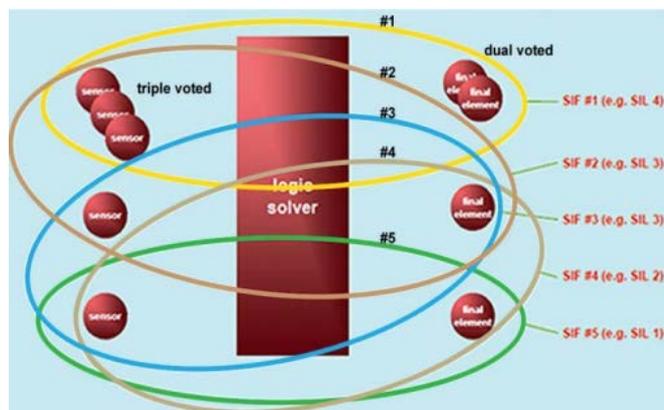
**Fuente: (EXIDA)**

En la parte izquierda de la figura se muestra un SIS, este consta de dos transmisores de presión y un transmisor de temperatura instalados a la salida del reactor enviando señales al Logic Solver, el cual procesa datos y envía una señal a dos válvulas de cierre rápido “shut off valves”. Dada la circunstancia que haya, una desviación excesiva y peligrosa de la presión o temperatura del reactor hace que actúen las válvulas de cierre rápido para brindar seguridad a las instalaciones.

Existe una redundancia en los dos sistemas, tanto el SIS como el BPCS, con sensores y actuadores pero cumplen el propósito de seguridad, brindando mayor confiabilidad al sistema. (M. A. Lundteigen, The effect of partial stroke testing on the reliability of safety valves, 2007)

### 2.3.8. Función Instrumentada de Seguridad (SIF)

Es una capa de protección a ser implementada por un SIS para lograr o mantener los procesos en un estado seguro frente a un evento peligroso específico y se define como un conjunto de acciones específicas del equipo correspondiente, necesario para identificar un peligro sencillo y actuar para llevar al proceso a un estado seguro:



**Figura 7. Funciones instrumentadas de seguridad SIF**

**Fuente: (T18A02D00-E00-N, 2003)**

La Figura 7 muestra que un SIS puede tener varios SIF. Cada SIF es un lazo de seguridad que cuenta con los mismos elementos de un BPCS, y tiene un SIL (Nivel de Integridad de Seguridad) que puede ser diferente. Resulta ambiguo e incorrecto asignar un único SIL para todo un SIS. (T18A02D00-E00-N, 2003)

Existen varios ejemplos de una función instrumentada de seguridad como en el cierre del suministro de combustible a un horno, en caso de una pérdida de llama, también está la apertura de una válvula para reducir el exceso de presión, la activación de la alarma de fuego en caso de un incendio, la activación de mensajes de emergencia pregrabados para el equipo de respuesta o dirigir un derrame hacia el sistema de manejo de residual.

### **2.3.9. Clasificación de la Función Instrumentada de Seguridad (SIF)**

Las Funciones Instrumentadas de Seguridad son clasificadas en dos categorías, las que operan de modo continuo y las que operan bajo demanda. (Salinas, 2010)

#### **Modo Continuo**

En la ocurrencia de una falla peligrosa dentro de la función instrumentada de seguridad se puede generar un potencial peligro y este puede ocurrir sin necesidad que se presente un fallo a menos que se tomen medidas para prevenirlo. (Salinas, 2010)

#### **Modo de Demanda**

Acción específica (por ejemplo, el cierre de una válvula) la cual se toma en respuesta a las condiciones de proceso o de otras demandas, en el caso de una falla peligrosa de la función instrumentada de seguridad generando un peligro potencial del proceso. (Salinas, 2010)

### **2.3.10. Nivel de Integridad de Seguridad (SIL)**

Se define como un nivel relativo de reducción del riesgo que provee una función de seguridad, o bien para especificar el nivel objetivo para la reducción de este riesgo. También podría definirse simplemente como una medida de la prestación requerida para una SIF. (L. I. Ruiz, 2008)

Cada nivel tiene la probabilidad de que un sistema referido a la seguridad realice satisfactoriamente las funciones establecidas en un periodo de tiempo dado.

### 2.3.11. Determinación de un SIL

Para determinar los factores de desempeño del SIS es necesario obtener el nivel de SIL con el cual diseñar, a continuación se explican varias definiciones principales:

- a. **Probabilidad de Falla a la demanda (PFD, Probability of Failure on Demand).**- Es un valor que indica a probabilidad de que un sistema falle al responder a una demanda.
- b. **Disponibilidad de Seguridad.**- Indica la probabilidad de disponibilidad del sistema ante un evento. Este dato se puede obtener de la ecuación.

$$A = 1 - PFD \quad [6]$$

- c. **Factor de Reducción de Riesgo (RRF, Risk Reduction Factor).**- Es un valor que revela la cantidad en la que se puede reducir un riesgo ante un evento. Este dato se puede obtener de la ecuación.

$$RRF = \frac{1}{PFD} \quad [7]$$

**Tabla 1.**

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

SIL	Probabilidad de falla a la demanda (PFD)	Disponibilidad Segura (1-PFD)	Factor de Reducción de Riesgo (1/PFD)
4	0.0001 - 0.00001	99.99 - 99.999%	10.000 - 100.000
3	0.001 - 0.0001	99.9 - 99.99%	1.000 - 10.000
2	0.01 - 0.01	99 - 99.9%	100 - 1.000
1	0.1 - 0.01	90 - 99%	10 - 100

**Fuente: (Grunh, 2006)**

El objetivo principal del proceso de selección del Nivel de Integridad de Seguridad (SIL) es reducir el riesgo del proceso bajo control a un nivel de riesgo tolerable. El SIL escogido implica un nivel real de reducción de riesgo como parte de las especificaciones de los requerimientos de seguridad, dado que define el rango de la Probabilidad de Falla a la Demanda (PFD) que la Función Instrumentada de Seguridad (SIF) debe proveer.

El análisis del SIL en instalaciones de proceso permitirá:

- Incrementar la seguridad de las instalaciones.
- Detectar las necesidades de seguridad de los distintos procesos industriales.
- Reducir la contaminación medio ambiental.
- Verificar los niveles de seguridad de las distintas capas de protección implantadas en las instalaciones.
- Adecuarse a las normativas ANSI/ISA-S84.01 2004 e IEC 61508&61511 sobre SIS y seguridad funcional.

Para determinar la probabilidad de Falla de la Demanda (PFD) se involucra en los cálculos, ciertos parámetros que se muestran a continuación.

$\lambda_T$  = Tasa de fallas

$\lambda_S$  = Tasa de falla segura =  $\lambda_T * 50\%$  [8]

$\lambda_d$  = Tasa de fallas peligrosas =  $\lambda_T * 50\%$  [9]

$\lambda_{dd}$  = Tasa de fallas peligrosas detectadas =  $\frac{\lambda_T}{2*DC}$  [10]

$\lambda_{du}$  = Tasa de fallas peligrosas no detectadas =  $\frac{\lambda_T}{2*(1-DC)}$  [11]

Fracción de falla segura (SFF) =  $\frac{\lambda_S + \lambda_{dd}}{\lambda_T}$  [12]

Cobertura de diagnóstico DC

$\beta$  = Factor de causa común para fallas no detectadas

$\beta_D$  = Factor de causa para fallas detectadas

La configuración de los elementos se describe de la siguiente manera:

1oo2 = 1 out of 2, es decir, de un arreglo de dos sensores, uno presenta falla.

2oo2 = 2 out of 2, es decir, de un arreglo de dos sensores, los dos presentan falla.

En el caso que se tome la configuración 1oo2 , 2oo2 o 2oo3 se agrega las siguientes fórmulas ya que se habla de dos o más elementos donde pueden ocurrir una falla, teniendo más de una posibilidad de que exista un evento peligroso.

Tiempo medio de paro en el subsistema:

$$t_{CE} = \frac{\lambda_{du}}{\lambda_D} \left( \frac{T1}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{dd}}{\lambda_D} MTTR \quad [13]$$

Probabilidad de falla a la demanda:

$$PFD_{AV} = 2 * [(1 - \beta_D) * \lambda_{DD} + (1 - \beta) * \lambda_{DU}]^2 * t_{CE} * t_{GE} + (\beta_D * \lambda_{DD} * MTTR) + \beta * \lambda_{DU} * \left( \frac{T1}{2} + MTTR \right) \quad [14]$$

### 2.3.12. HazOp

Es una técnica de identificación de riesgos basada en la premisa de que los riesgos, accidentes o los problemas de operabilidad se producen como consecuencia de una desviación de las variables de proceso con respecto a los parámetros normales de operación en un sistema dado y en una etapa determinada. Por lo tanto, consiste en evaluar las consecuencias de posibles desviaciones en todas las unidades de proceso. La técnica consiste en analizar sistemáticamente las causas y las consecuencias de unas desviaciones de las variables de proceso (Macdonald, 2004).

Los principales objetivos de un HazOp son:

- Identificar y evaluar los peligros dentro de un proceso planificado u operación.
- Identificar los problemas significativos de funcionamiento o calidad.
- Identificar los problemas prácticos asociados con las operaciones mantenimiento.

### 2.3.13. Etapas de un HazOp

1. **Definición del área de estudio.-** Consiste en delimitar las áreas a las cuales aplica la técnica. En una determinada instalación de proceso se considera una área de objeto de estudio, además definirá subsistemas o líneas de proceso que correspondan a entidades funcionales propias, por ejemplo, una línea de descarga a un depósito. (Macdonald, 2004)
2. **Definición de los nodos.-** En cada uno de los subsistemas o líneas de proceso se identifican puntos localizados en el proceso llamados nodos, por ejemplo, un depósito de almacenamiento. La técnica HAZOP se aplica a cada uno de estos nodos. Cada nodo está caracterizado por variables de proceso como presión, temperatura, caudal, nivel y viscosidad. El documento de soporte principal de esta técnica es el diagrama de tuberías e instrumentación (Piping and Instrumentación Diagrama, P&ID). (Macdonald, 2004)
3. **Aplicación de las palabras guía.-** Las “palabras guía” se utilizan para indicar la ocurrencia de un evento en uno de los nodos definidos anteriormente. Se aplican tanto a acciones (reacciones y transferencias) como a parámetros específicos (presión, caudal y temperatura).
4. **Definición de los eventos a estudiar.-** Para cada nodo se plantea de forma sistemática todos los eventos que implican el uso de cada palabra guía a una determinada variable o actividad. Para realizar un análisis exhaustivo, se deben aplicar todas las combinaciones posibles entre palabra guía y variable de procesos. También se debe indicar las posibles causas de dichos eventos así como sus consecuencias. (Macdonald, 2004)
5. **Sesiones HazOp.-** Tienen como objetivo la realización sistemática del proceso descrito anteriormente, analizando los eventos en todos los nodos seleccionados a partir de las palabras guía aplicadas a determinadas variables o procesos. Se determinan las posibles causas, consecuencias, respuestas que se proponen y las acciones a tomar. (Macdonald, 2004)

### 2.3.14. Esquema para el diseño del HazOp

En relevancia a lo mostrado anteriormente, se desarrollara un cuadro técnico en donde se muestran las características de seguridad que satisfagan nuestro prototipo para una reducción de riesgo (Ver Tabla 2).

**Tabla 2.**

**Esquema de HazOp**

NODO	DESVIACIÓN	CAUSAS	CONSECUENCIAS	RIESGO			RECOMENDACIÓN
				CONSECUENCIA	PROBABILIDAD	RIESGO	
				4	5	M/S	

Donde:

**Nodo.-** Es el punto o la trayectoria que se toma del esquema del sistema para realizar el estudio de riesgos que puedan ocurrir

**Desviación.-** Son los posibles eventos que pueden ocurrir en el nodo (la provocación de las fallas)

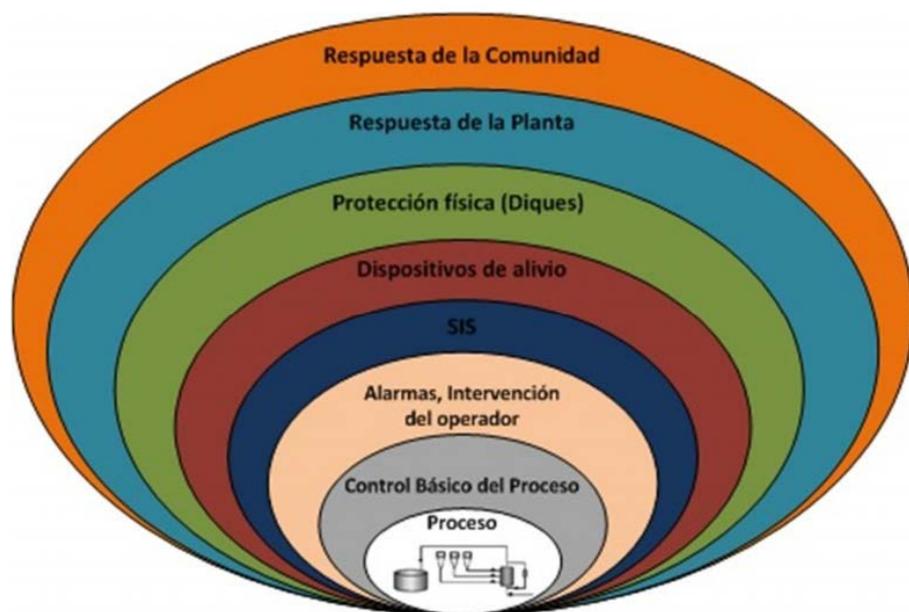
**Causas.-** Son las acciones peligrosas que ocurren por la desviación que se presenta

**Consecuencias.-** Son los efectos negativos que tiene el producto de la falla

**Riesgo.-** Se lo indica de tres maneras, la consecuencia y la probabilidad se la analiza usando una escala del 1 al 10, mientras que el riesgo se lo cataloga como Severo "S" o Moderado "M"

### 2.3.15. Capas de Protección

Para reducir los riesgos a niveles tolerables es necesario tener varias medidas de seguridad, así, proteger a la planta y a su personal contra daños si ocurre un incidente peligroso. Por esta razón, la seguridad se implementa en forma de capas protectoras, que integran dispositivos mecánicos en secuencia que resguardan al sistema de un evento peligroso. En caso que falle una capa de protección, estará otra capa más, y así en secuencia, para llevar el proceso a un estado seguro. La confiabilidad y seguridad del proceso aumenta de acuerdo al número de capas. (Grunh, 2006)



**Figura 8. Capas de protección (Modelo de la cebolla)**

**Fuente: (Grunh, 2006)**

En la Figura 8 notamos las diferentes capas protectoras que hay en un proceso, cabe recalcar que en el ámbito de seguridad no es necesario instalar u ocupar todas las capas posibles de manera aleatoria ya que implica costos adicionales al proceso, para esto es necesario utilizar únicamente las capas necesarias de acuerdo a las fallas que pueden provocarse en el sistema, sin embargo, la confiabilidad y seguridad depende del número de capas que se instale.

## Capas de Prevención

- **Proceso:** El proceso por sí mismo debe ser intrínsecamente seguro, es decir, proporcionar seguridad al operador. (Grunh, 2006)
- **Sistema de control básico de procesos (BPCS):** El BPCS brinda seguridad a través del diseño apropiado del control de proceso. Este nivel consiste de controles básicos, alarmas y supervisión del operador. (Grunh, 2006)
- **Alarmas, Intervención del operador:** Esta capa aporta alarmas críticas que alertan a los operadores acerca de una condición en la cual una medición ha excedido a sus límites especificados y podría requerir intervención. (Grunh, 2006)
- **Dispositivos de alivio:** Esta capa activa, emplea válvulas, dispositivos de alivio de presión o un sistema de antorcha (si hay presencia de combustibles) para impedir una ruptura, derrame u otro escape no controlado. (Grunh, 2006)

## Capas de Mitigación

- **Protección física:** Esta capa de protección es pasiva ya que hace referencia a la infraestructura física de la planta que se encarga de contener derrames (combustibles o sustancias químicas) que pudieran darse. Por ejemplo: Diques. (Grunh, 2006)
- **Respuesta de la planta:** Esta capa a igual que la anterior también es pasiva consiste en barreras de contención contra fuego o explosiones como así también procedimientos para evacuación. (Grunh, 2006)
- **Repuesta de la comunidad:** El nivel final (externo) de protección es la acción de respuesta de emergencia implementada por la comunidad y se refiere a bomberos y otros servicios de emergencia. (Grunh, 2006)

### 2.3.16. Análisis de Capas de protección (LOPA)

Las medidas de seguridad o capas de protección más adecuadas a adoptar en las instalaciones se derivaran de la elaboración de un análisis de riesgos específico en las mismas, mediante la aplicación de una o varias técnicas de identificación de riesgos. (Pecsen, Sistemas instrumentados de seguridad, 2010)

Existe una gran variedad de técnicas de identificación de riesgos, tal como se indica en la Tabla 3. La técnica de identificación seleccionada dependerá de los propósitos perseguidos con la identificación de riesgos, así como de los datos y recursos disponibles.

**Tabla 3.**

#### Técnicas de identificación de riesgos

Técnicas	¿Cuándo utilizarlas?
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revisión de seguridad</li> <li>• Lista de verificación</li> <li>• Análisis preliminar de peligros</li> <li>• Análisis de situaciones</li> <li>• Estudio HAZOP</li> </ul>	<p>Se usan en estudios de evaluación de peligros preliminares para proporcionar un panorama general de los riesgos existentes. Generalmente no consumen demasiado tiempo</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lista de verificación</li> <li>• Estudio HAZOP detallado y completo</li> <li>• Análisis de evento y modo de fallo</li> </ul>	<p>Se usan en combinación con el análisis más detallado de los riesgos potenciales.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis de árbol de fallas</li> <li>• Análisis de árbol de eventos</li> <li>• Análisis causa-consecuencia</li> <li>• Análisis de fiabilidad humana</li> </ul>	<p>Se usan en combinación con el análisis cuantitativo de riesgos para establecer un alto nivel de detalle acerca de los riesgos. Generalmente se usan sólo para áreas u operaciones unitarias específicas.</p>

**Fuente: (Garcín, 2007)**

LOPA utiliza el concepto de capas de protección. Una salvaguarda puede ser considerada como capa de protección cuando cumple cuatro características. (Grunh, 2006)

- a) Especificidad.-** Está diseñada únicamente para prevenir o mitigar las consecuencias de un evento peligroso potencial. Causas múltiples pueden llevar al mismo evento peligroso. (Grunh, 2006)
  
- b) Independencia.-** Es independiente de otras capas de protección asociadas con identificar el peligro. La falla de una capa no impedirá que otra realice su trabajo. (Grunh, 2006)
  
- c) Confiabilidad.-** Se puede contar con ella para hacer aquello para lo que fue diseñada para hacer. Fallas aleatorias y sistemáticas son abordadas en el diseño. (Grunh, 2006)
  
- d) Auditabilidad.-** Está diseñada para facilitar la validación periódica de las funciones de protección. Pruebas y mantenimiento son necesarios. (Grunh, 2006)

### 2.3.17. Representación de capas de protección (LOPA)

Es en donde se realiza la reducción de riesgos con ayuda de las capas de protección, es obtenida mediante un criterio técnico y representada en una tabla, tomando en cuenta las características específicas que tienen las capas de protección en relación con las posibles fallas que pueden ocurrir en los distintos puntos (nodos) del sistema, la representación de cada uno de los ítems se lo representara como en la Tabla 4.

**Tabla 4.**

#### Representación de las capas de protección

<b>Descripción del evento</b>	<b>Relato breve de las posibles fallas que pueden ocurrir</b>
<b>Nivel de severidad</b>	Es catalogado como Medio "M" o Severo "S" de acuerdo al grado de falla
<b>Causa de inicio</b>	Acción de donde proviene la falla
<b>Probabilidad de inicio</b>	Valor inicial de probabilidad de falla del sistema, sin contar con el sistema de seguridad
<b>Ocurrencia por año</b>	El número de veces que ocurre la falla en un periodo de 365 días
<b>Diseño del proceso general</b>	Normalmente se lo denomina con 1, representa el valor máximo que puede llegar el sistema en seguridad
<b>Capas de Protección</b>	Son los diferentes elementos que se usan para reducir los posibles eventos peligrosos
<b>Probabilidad de evento intermedio</b>	Es el producto de la probabilidad de inicio con la ocurrencia de falla por año
<b>Nivel de integridad de SIL</b>	Es la división entre el valor de diseño del proceso general y el valor de la tasa de falla del elemento estudiado
<b>Probabilidad de falla</b>	Es el resultado del producto de todos lo antes mencionado, incluido las capas de protección

### 2.3.18. Modelado y confiabilidad de SIS

Las medidas usuales en un SIS son:

- $\lambda$  = Número de fallas por unidad de tiempo.
- MTTF = Tiempo Medio para Fallas (Mean Time To Fail)
- $MTTF_{SP}$  = (sp = Spurious, falla segura)
- PFD, RRF, SFF

Las siguientes fórmulas se muestran en su forma aproximada y completa para sistemas con arquitectura 1oo1, 1oo2, 2oo2 y 2oo3.

Su significado es el siguiente:

1oo2 = 1 out of 2, es decir, de un arreglo de dos sensores, uno presenta falla.

2oo2 = 2 out of 2, es decir, de un arreglo de dos sensores, los dos presentan falla.

#### Tabla 5.

#### Configuración de tiempo medido para las fallas

Configuración	$MTTF_{SP}$
1oo1	$\frac{1}{\lambda_s}$
1oo2	$\frac{1}{(2 * \lambda_s)}$
2oo2	$\frac{1}{((2 * \lambda_s^2 * MTTR) + (\beta * \lambda_s))}$
2oo3	$\frac{1}{((6 * \lambda_s^2 * MTTR) + (\beta * \lambda_s))}$

**Fuente: (Summers, 2002)**

En donde:

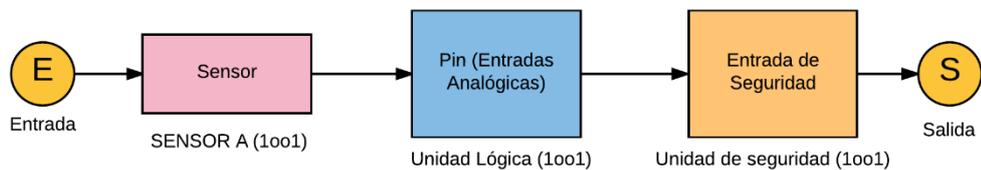
MTTR = Tiempo medio para reparación

$\lambda_s$  = Tasa de fallas seguras

$\beta$  = Factor de falla común (fracción de fallas que impacta en uno o más canales de los sistemas redundantes) (Summers, 2002)

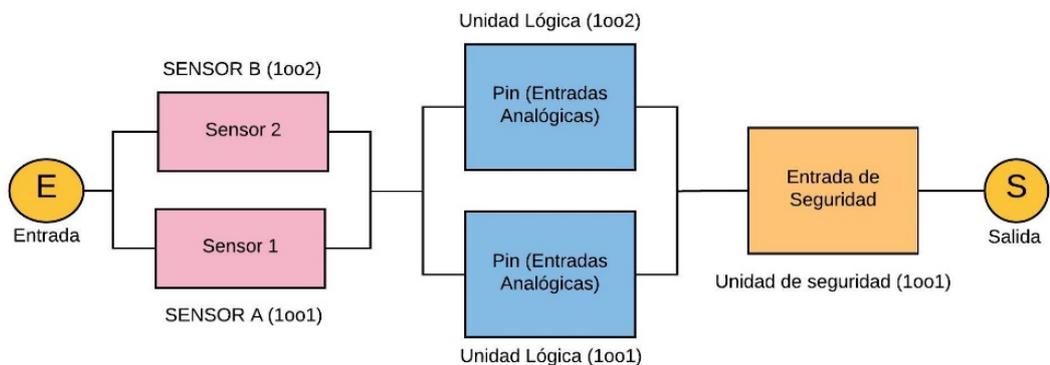
### 2.3.19. Diagramas de bloques de los lazos de seguridad del SIS

Los diagramas de bloques son una representación gráfica que muestra las relaciones existentes entre varios componentes de un conjunto que forma un sistema. “Bloque” puede tratarse de un grupo de elementos con características comunes o de una agrupación de entidades u organizaciones similares. Los lazos de seguridad para un nivel integrado de seguridad (SIL), están representados mediante el diagrama de bloques que se muestra en la Figura 9. El diagrama de bloques puede variar dependiendo del nivel que se le asigna a la parte específica del sistema que se está analizando.



**Figura 9. Diagrama de bloques para configuración 1oo1**

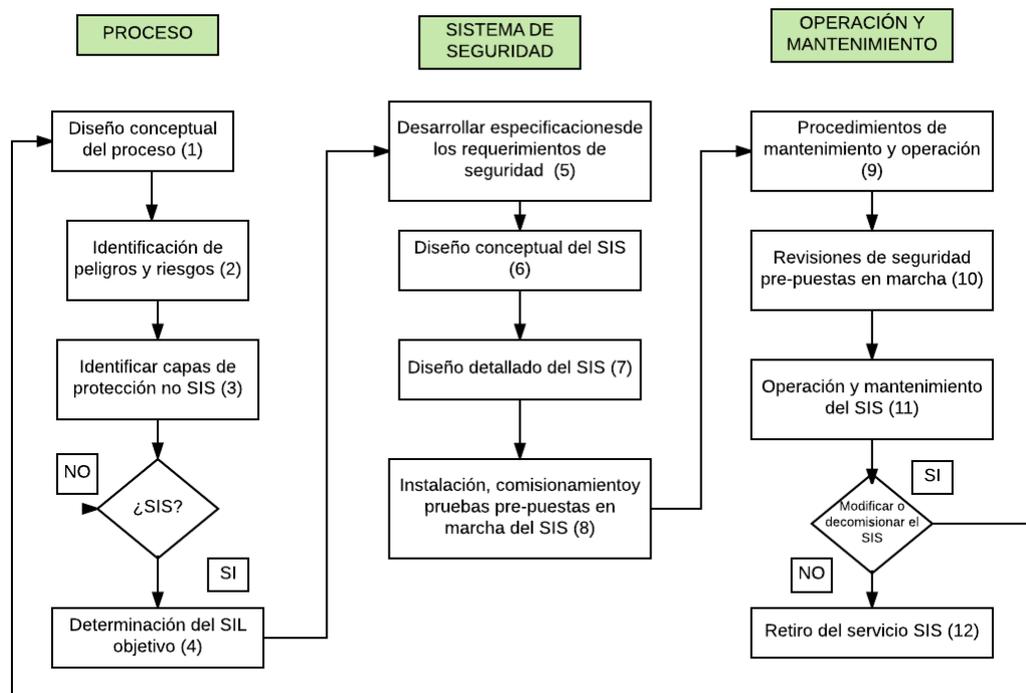
Para los lazos de seguridad que cuentan con dos o más entradas, es decir que tengan varias opciones de alarma en el momento de corregir una falla, se usa el diagrama de bloques mostrado en la Figura 10, este tipo de diagramas están relacionados en casos de control de nivel, temperatura, entre otros.



**Figura 10. Diagrama de bloque para configuración 1oo2**

### 2.3.20. Ciclo de vida de seguridad

Su objetivo es la reducción de riesgos a niveles tolerables. Usa una metodología práctica que delimita los pasos necesarios a seguir para alcanzar la seguridad integral de las plantas de proceso, definiendo la secuencia a seguir y la documentación de cada fase. Para ellos la normativa IEC 61511 establece una serie de etapas que ayudan y sirven de guía para conseguir este objetivo como muestra la Figura 11. (IEC-61511, 2003)



**Figura 11. Ciclo de vida de seguridad**

**Fuente:** (International Electrotechnical Commission, 1997)

- 1. Diseño conceptual del proceso.-** Es la etapa inicial donde el conocimiento de proceso entrega una idea preliminar de los peligros y riesgos potenciales a fallar en los equipos y materiales.
- 2. Identificación de peligros y riesgos.-** Se requiere una detallada información para identificar los riesgos y peligros potenciales asociados al proceso. Una vez identificados los riesgos y peligros, se implementará tecnología adecuada para eliminar la amenaza, así reducir sus consecuencias en eventos peligrosos.

3. **Identificar capas de protección no SIS.-** Se considera las capas de protección necesarias para mitigar los efectos de un evento peligroso, dichas capas deben actuar antes que el sistema instrumentado de seguridad.
4. **Determinación el SIL.-** La asignación del nivel SIL de una SIF es basada en el análisis de riesgos, aparte, el nivel de riesgo tolerable se toma en cuenta basado en una filosofía de gestión de riesgo.
5. **Desarrollar especificaciones de requerimientos en seguridad.-** Se desarrollan los SRS, documento en donde se recogen los resultados de la fase de análisis del ciclo de vida. No hay reglas generales que puedan aplicarse en forma global ya que los requerimientos de seguridad dependerán del proceso analizado.
6. **Diseño conceptual del SIS.-** Inicialmente se selecciona una tecnología, arquitectura e intervalo de prueba. Posteriormente se debe proceder a la verificación cuantitativa para ver si el sistema propuesto cumple los requerimientos de operación.
7. **Diseño detallado del SIS.-** El objetivo es finalizar y documentar el diseño conceptual. Se elaboran planos eléctricos, protocolo de pruebas, diseño de programación, es decir, toda la documentación entregada al constructor.
8. **Instalación, condicionamiento y pruebas pre-puesta en marcha del SIS.-** Se debe asegurar que el sistema sea instalado de acuerdo al diseño conceptual elegido siguiendo procedimientos estrictos para evitar errores en su implementación y que opere de acuerdo a la SRS. Una vez instalado se debe verificar que el sistema esté de acuerdo al diseño detallado incluyendo los dispositivos de campo.
9. **Procedimientos de mantenimiento y operación.-** Son importantes para mantener la integridad del SIS. Deben incluir detalles de cómo operar y mantener el SIS. Procedimientos alternativos de operación del SIS en una condición de disminución de seguridad, procedimientos operativos en condiciones normales y de emergencia, mantenimiento preventivo, repuestos y procedimientos para la administración de cambios.

- 10. Revisiones de seguridad pre-puesta en marcha.-** En esta etapa se realiza un estudio funcional y una inspección completa del SIS con el fin de demostrar que cumple con los requerimientos de la especificación de diseño y asegurar así su integridad, permitiendo validar el SIS.
- 11. Operación y mantenimiento del SIS.-** Esta es la etapa más larga del ciclo de vida del SIS, es el periodo durante el cual la planta es operativa. Es importante una política de operación y mantenimiento adecuada que garantice que el SIL de cada SIF no se degrade y se mantenga dentro de los límites especificados, además que la seguridad funcional del SIS se mantiene dentro de las SRS.
- 12. Retiro del servicio del SIS.-** La etapa final del ciclo de vida se refiere a las precauciones que deben ser tomadas cuando el SIS es de comisionado y desmantelado. (Marzal, 2002)

### 2.3.21. Estándares y Regulaciones

#### 2.3.22. IEC 61508.

La comisión Electrotécnica Internacional lanzó este estándar global para sistemas instrumentados de seguridad que abarca múltiples industrias como transporte, medica, nuclear y procesos. (IEC-61508, 1997)

Su objetivo principal es servir de guía para que otras industrias individuales puedan desarrollar sus propios estándares para que cumplan los requerimientos de esta norma. Otra aplicación de este estándar es la validación de nuevas tecnologías desarrolladas para aplicaciones relacionadas con seguridad, por ellos a esta norma también se la conoce como el “estándar de los vendedores”. Este documento consta de siete partes:

- a) **Requerimientos generales.-** Describe los pasos que son necesarios para la identificación de peligros y riesgos, para de esta manera definir la reducción de estos, necesaria para diferentes sistemas y las actividades necesarias para realizar la integración total del sistema.
- b) **Requerimientos para sistemas Eléctricos, Electrónicos, Electrónicos Programables (E/EEP) relacionados con seguridad.-** Provee los requisitos para el diseño del hardware y su integración con el software.
- c) **Requerimientos de software.-** Define los requerimientos para la selección, implementación y verificación de las herramientas de software, aplicaciones y lenguajes de programación.
- d) **Definiciones y abreviaciones.-** Es una lista de definiciones y abreviaciones utilizadas en el estándar.
- e) **Ejemplos de métodos para la determinación de los niveles integrados de seguridad.-** Hace referencia a métodos para determinar el SIL.
- f) **Guías en la aplicación de IEC 61508-2 y IEC 61508-3.-** Se refieren a lineamientos para aplicación de la parte 2.
- g) **Revisión de técnicas y medidas.-** Recomendaciones específicas.

Las primeras tres partes son normativas mientras que las otras cuatro partes proveen anexos informativos al estándar. (IEC-61508, 1997)

### **2.3.23. IEC 61511**

La norma IEC 61511 denominada “Seguridad Funcional: SIS para el Sector de la Industria del Proceso” fue desarrollada para el sector de la industrias de proceso y aplicable, no solo a fabricantes y suministradores, sino también a diseñadores del nivel de seguridad, integradores y usuarios. Fue publicada en el 2003 y en ocasiones es llamada “El estándar de los usuarios”. Esta norma aplica los mismos conceptos de la IEC 51508 con algunos cambios en la práctica, conceptos y término en la industria de procesos. Consta de tres partes:

- a. Marco, definiciones, sistemas, requisitos de hardware y software.
- b. Guías para la aplicación de la IEC 61511, parte 1
- c. Guía para la determinación de los niveles de integridad de seguridad requeridos. (IEC-61511, 2003)

Es una norma técnica que establece las prácticas en la ingeniería de sistemas que garantizan la seguridad de un proceso industrial mediante el uso de la instrumentación, estos sistemas se denominan SIS. El sistema de gestión del SIS debe definir como un propietario/operador tiene intención de evaluar, diseñar, verificar, instalar, validar, operar, mantener y mejorar continuamente sus SIS. Las funciones esenciales del personal asignado a la gestión del SIS deben estar contempladas y bien definidas en procedimientos, para apoyar la ejecución coherente de sus responsabilidades. (IEC-61511, 2003)

El sector de la industria de procesos incluye muchos tipos de procesos de fabricación, tales como refinerías, petroquímicas, químicas, energía y farmacéuticas, por ello la norma IEC 61511 cubre el uso de equipos eléctricos, electrónicos y electrónicos programables, así también es aplicable a los equipos que utilizan sistemas hidráulicos o neumáticos para manipular elementos finales, pero no cubre el diseño e implementación de la lógica neumática o hidráulica. (International Electrotechnical Commission, 1997).

En resumen la IEC se enfoca en el uso de cinco etapas principales de ciclo de vida con el fin de entender los requisitos que se establece, incluyendo la verificación y documentación a lo largo de todo ciclo de vida:

**Tabla 6.**

**Requisitos del ciclo de vida para la norma**

Etapa del ciclo de vida	Requisitos de IEC 61511
<b>1. Ingeniería básica del proyecto y diseño conceptual</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluación de peligro y riesgo (Cláusula 8)</li> <li>• Asignación de funciones de seguridad a capas de protección (Cláusula 9)</li> <li>• Especificación de requisitos de seguridad para sistemas instrumentados de seguridad (Cláusulas 10 y 11)</li> </ul>
<b>2. Diseño e ingeniería de detalle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño e ingeniería del sistema instrumentado de seguridad (Cláusulas 11 y 12.4)</li> <li>• Construcción del sistema instrumentado de seguridad, integración y pruebas FAT (Cláusula 13)</li> </ul>
<b>3. Instalación y puesta en marcha</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instalación y condicionamiento del sistema instrumentado de seguridad (Cláusula 14)</li> <li>• Validación de seguridad del sistema instrumentado de seguridad (Cláusula 12.4, 12.7 y 15)</li> </ul>
<b>4. Provisión de seguridad funcional</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operación y mantenimiento del sistema instrumentado de seguridad (Cláusula 16)</li> </ul>
<b>5. Modificación y actualización</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modificación del sistema instrumentado de seguridad (Cláusula 17)</li> </ul>
<b>6. Verificación y documentación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificación (Cláusulas 7,12.4,12.7)</li> <li>• Documentación (Cláusula 19)</li> </ul>

**Fuente:** (IEC-61511, 2003)

### **2.3.24. Ingeniería concurrente**

Se define como “un enfoque sistemático para el diseño paralelo e integrado de productos y los procesos relacionados, incluyendo manufactura y servicios de apoyo, con la intención de que los desarrolladores consideren, desde el inicio del proyecto, todos los elementos de ciclo de vida del producto, desde su concepción hasta su eliminación y reciclaje; incluyendo calidad, costo, planeación y requerimientos del usuario” (Crefeld., 1994). Cuando se implanta esta filosofía, los productos se desarrollan de forma eficiente, son más propensos a entrar al mercado exitosamente y son de calidad satisfactoria para los clientes.

### **2.3.25. Diseño para la fabricación**

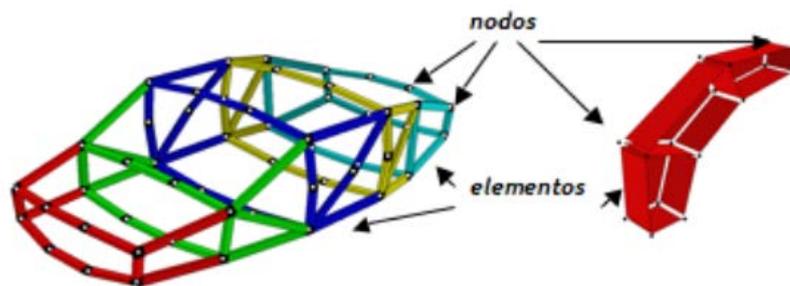
También se llama DFM (por sus siglas en inglés “Design For Manufacturing”, es el primer requisito para llegar hacia una ingeniería concurrente, además de la función principal el producto se diseña para que sea fácil y económico de producir. El significado de fabricar principalmente es, partir de materias primas, productos semielaborados y componentes de mercado para construir un prototipo o máquina lo que generaliza dos tipos de actividades que se muestran a continuación (Romeva, 2002):

- La conformación de piezas consiste en dar forma a las piezas y a los componentes básicos del prototipo o máquina, por medio de una gran variedad de procesos como mecanizado, extrusión, inyección, entre otros y también realizar primeras composiciones y uniones permanentes
- El montaje del producto es componer (armar) el prototipo o máquina a partir de las piezas y componentes elementales, comprende trabajos de inserción, de referenciación, de unión, además comprende operaciones de puesta a punto y ajuste, llenado de fluidos, de inicialización y para terminar comprobaciones del correcto funcionamiento del conjunto. (Romeva, 2002)

### 2.3.26. Método de elementos finitos

Es un método numérico destinado para la resolución de ecuaciones diferenciales, se lo utiliza en varios problemas de ingeniería y física.

El método se basa en dividir el cuerpo, estructura o dominio sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema como se muestra en la figura 12, es una serie de subdominios no intrínsectantes entre si denominados elementos finitos. El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también llamada discretización.

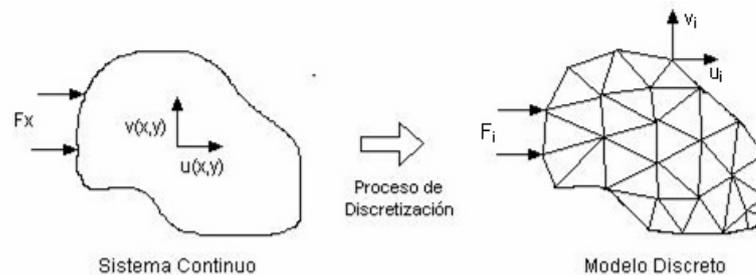


**Figura 12. Ejemplo de discretización**

**Fuente: (UNAM, 2010)**

En cada elemento se resalta una serie de puntos representativos llamados nodos, como se observa en la Figura 12, dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito, también, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se conoce como malla. Los cálculos se realizan sobre una malla o discretización creada a partir del dominio con programas generadores de malla, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso, de acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad.

Usualmente, el método de elemento finito se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos, que luego a través de relaciones cinemáticas, las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o generalmente un problema de mecánica del medio continuo como lo muestra la Figura 13. El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos en dos o tres dimensiones. (UNAM, 2010)



**Figura 13. Proceso de discretización**

**Fuente: (UNAM, 2010)**

Una importante propiedad del método es la convergencia, si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas (un número mayor de mallas), la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones.

### **2.3.27. Diseño para el montaje**

El diseño para el montaje (DFA por sus siglas en inglés “Design For Assembly”) comprende la manipulación, composición de diversas piezas y componentes de un producto, la unión, su ajuste, la puesta a punto y la verificación del conjunto para que adquiera funcionalidad y así cumplir el propósito requerido. Hay varias operaciones a realizarse el momento de su análisis las cuales se muestran a continuación:

**Manipulación de piezas y componentes:**

- Reconocimiento de una pieza o componente
- Determinación de la zona de presión
- Realización de la operación de presión
- Composición de piezas y de componentes
- Yuxtaposición de piezas
- Inserción
- Colocación de cables y conducciones
- Llenado de recipientes y depósitos (engrase, líquidos, gases)

**Unión de piezas y de componentes**

- Uniones desmontables (roscadas, pasadores chavetas)
- Encaje por fuerza (calado de piezas, unión elástica)
- Uniones por deformación (remaches, rebordeado)
- Uniones permanentes (soldadura, encolado)

**Operaciones de ajuste**

- Retoque de piezas (rebabas, lima, ajuste por deformación)
- Operaciones de ajuste mecánico (conos, micro ruptores)
- Operaciones de ajuste eléctrico (potenciómetros, condensadores)

**Operaciones de verificación**

- Puesta a punto (regulaciones, inicialización informática)
- Verificación de la funcionalidad del producto

Cabe recalcar que las operaciones de puesta a punto y verificación no corresponden al montaje propiamente aunque están íntimamente ligadas, por lo que es convenientemente incluirlas. (Romeva, 2002)

### **2.3.28. Montaje**

Durante las últimas décadas, a través de la incorporación progresiva del control numérico y mejora de los sistemas automáticos de manipulación, se han realizado importantes progresos en la automatización de los procesos de fabricación de piezas y componentes. Sin embargo, si bien ha habido significativos avances en los procesos de montaje, buena parte de ellos continúan siendo manuales y requieren un volumen en mano de obra que incide entre el 25% y el 75% de los costos totales de producción. (Romeva, 2002)

#### **Montaje Manual**

Es el trabajo manual necesario para la fabricación de un prototipo, su trabajo es plenamente humano por lo que corre cierto grado de error en su finalización, en ciertos casos es necesario la introducción de ciertos útiles para facilitar el montaje manual como la inserción, pre compresión, utilización de elementos de referencia, soldadura, entre otros. El sistema es muy utilizado en la actualidad a pesar de contar con sistema más avanzados.

#### **Montaje Automatizado (medios genéricos)**

Se realiza a través de aplicar medios genéricos de montaje, especialmente con sistemas robóticos y el correspondiente utillaje. Presenta la ventaja de la flexibilidad y la posible reutilización de los equipos, si bien la productividad es menor que con medios específicos. (Romeva, 2002)

#### **Montaje Automatizado (medios específicos)**

Se realiza a través de la construcción de medios específicos (máquinas y líneas construidas expresamente) destinadas al montaje automatizado de un producto determinado. Son sistemas de gran productividad que, sin embargo, requieren una elevada inversión difícilmente recuperable. (Romeva, 2002)

### 2.3.29. Recomendaciones en el diseño para el montaje

Las principales recomendaciones en el diseño de un nuevo producto o en el rediseño de un producto existente teniendo presente el montaje son:

- **Estructurar en módulos.-** Establecer una adecuada estructuración modular del producto con funciones correctamente definidas y asignadas, unas adecuadas interfaces mecánicas de materiales, energía y señales.
- **Disminuir la complejidad.-** Minimizar el número y la diversidad de las piezas y componentes que intervienen en cada módulo o en el producto completo, así como el número de uniones, enlaces y otras interfaces.
- **Establecer un elemento de base.-** Asegurar que cada módulo (o el producto, si este es de estructura simple) tenga un elemento estructural adecuado que a la vez sustente y sirva de base o de referencia al resto de las piezas y componente del módulo.
- **Limpiar las direcciones de montaje.-** Procurar que el montaje de un producto tenga el número mínimo de direcciones de montaje.
- **Facilitar la composición.-** Facilitar la composición de piezas (especialmente las inserciones) por medio de chaflanes, planos inclinados, superficies de guía y otros elementos que faciliten estas operaciones.
- **Simplificar las uniones.-** Disminuir o evitar, si es posible, las uniones. En todo caso, reducir al máximo las uniones de mayor coste en tiempo de montaje y de materiales (uniones atornilladas soldadura). (Romeva, 2002)

### 2.3.30. Diseño para el entorno

El número de circunstancias peligrosas que suceden alrededor de los productos aumenta cada día de igual forma las máquinas y sistemas que participan, todo esto condiciona su diseño desde numerosos puntos de vista, más concreto nos referimos a los siguientes términos:

- La disponibilidad de los productos y sistemas
- La relación hombre-máquina
- La seguridad de las máquinas
- El ahorro energético y los impactos ambientales
- La problemática del fin de vida de los productos

El método de diseño de entorno busca dar comodidad al diseñador para cumplir su función, o estar en condiciones de hacerlo. La funcionabilidad en el entorno también abarca el concepto moderno de ergonomía que es “adaptar el trabajo al hombre”, la ergonomía es una disciplina que trata los aspectos siguientes: a) estudio pluridisciplinario de la relación entre las personas y su entorno, especialmente de sus limitaciones y condicionantes; b) Intervención en la realidad exterior, tanto la natural como la artificial, para mejorar la relación de las personas con su entorno en vista a la eficacia, el confort, la salud y la seguridad. (Romeva, 2002)

### **2.3.31. Ergonomía en el diseño**

Los productos, máquinas y sistemas son concebidos para satisfacer las necesidades de las personas, por lo que los principios ergonómicos son uno de los principales aspectos que deben tenerse presentes en el diseño. No todos los productos y máquinas tienen el mismo tipo de requerimientos en función de los usos previstos. Por ejemplo, no es lo mismo el diseño de un automóvil donde son prioritarios aspectos relacionados con la carga física, que con el diseño de un computador donde es prioritario la carga mental (facilitar la comunicación, eliminar operaciones mentales innecesarias), o en el diseño de un sistema automático industrial donde hay que asegurar respuestas precisas y rápidas. (Romeva, 2002)

### **2.3.32. Seguridad de las máquinas**

Las maquinas deberán ser aptas para realizar su función y mantenimiento sin que las personas se expongan a peligro, siempre que las operaciones se lleven a cabo en las condiciones previstas por el fabricante (usos previstos y usos no previstos, contenidos en los manuales de utilización y de mantenimiento). Las medidas que se tomen deben ir encaminadas a

suprimir riesgos durante la vida útil previsible, incluidas las fases de montaje, desmontaje e inclusive cuando los riesgos se presenten en situaciones anormales pero previsible, por ejemplo introducir los dedos en las aspas de un ventilador funcionando es una situación anormal, sin embargo es previsible que un niño de corta edad lo haga. (Romeva, 2002)

Al optar por soluciones más adecuadas para la seguridad de las máquinas, el fabricante debe aplicar los siguientes principios y por el orden que se indica:

- Eliminar si es posible la causa del riesgo
- Adoptar protecciones
- Informar del riesgo a los usuarios.

### **2.3.33. Factores de diseño**

El factor de diseño es una ponderación de la seguridad relativa que tiene un componente bajo la acción de una carga. Es decir, que la resistencia del material con que se fabricará el componente se divide entre el factor de diseño para determinar un esfuerzo de diseño que a veces se llama esfuerzo admisible ( $\sigma_d$ ) o esfuerzo permisible, lo que denota claramente que el esfuerzo real del componente debe ser menor al que se calcula para el factor de diseño, además se lo determina con la letra N.

$$N = \frac{\sigma}{\sigma_d} [15]$$

El valor del factor de diseño está definido por códigos establecidos por organizaciones de normalización, como la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos, el Departamento de la Defensa de Engranajes, entre otros. En el caso que no se cuenta con códigos o normas el diseñador debe aplicar su juicio para especificar el factor de diseño adecuado. Parte de la filosofía de diseño, se refiere a asuntos como la naturaleza de la aplicación, el análisis de esfuerzos, las propiedades del material y el grado de confianza en los datos que se emplean en el desarrollo del diseño. (Mott, Diseño de elementos de máquinas, 2006)

Tabla 7.

**Factores de seguridad recomendados para material dúctil**

<b>Materiales Dúctiles</b>	
<b>N = 1.25 a 2.0</b>	Para el diseño de estructuras bajo cargas estáticas, para las que hay un alto grado de confianza en todos los datos del diseño
<b>N = 2.0 a 2.5</b>	Diseño de bajo cargas dinámicas con una confianza promedio en todos los datos del diseño
<b>N = 2.5 a 4.0</b>	Diseño bajo cargas dinámicas con incertidumbre acerca de las cargas, propiedades de los materiales, análisis de esfuerzos o el ambiente.
<b>N = 4.0 o más</b>	Diseño bajo cargas dinámicas, con incertidumbre en cuanto a alguna combinación de cargas.

**Fuente: (Mott, Diseño de elementos de máquinas, 2006)**

Tabla 8.

**Factores de seguridad recomendados para material frágil**

<b>Materiales Dúctiles</b>	
<b>N = 3.0 a 4.0</b>	Para el diseño de estructuras bajo cargas estáticas, para las que hay un alto grado de confianza en todos los datos del diseño
<b>N = 4.0 a 8.0</b>	Diseño bajo cargas dinámicas con incertidumbre acerca de las cargas, propiedades de los materiales, análisis de esfuerzos o el ambiente.

**Fuente: (Mott, Diseño de elementos de máquinas, 2006)**

En general como se muestran en las tablas anteriores existen diferentes factores de diseño dependiendo del tipo de material a usar, el diseño para cargas estática implica aplicar el factor de diseño a la resistencia de fluencia, o la resistencia ultima del material, en las cargas dinámicas se requiere la aplicación del factor de diseño a la resistencia a la fatiga.

### 2.3.34. Diseño eléctrico

Para el diseño eléctrico se recurre a la guía de instalación eléctrica presentada por Schneider según las normas internacionales IEC, con el propósito de optimizar recursos y dar un ambiente seguro para el usuario, la Tabla 9 muestra la metodología de uso de esta guía, cabe recalcar que en nuestro caso se utiliza una instalación de baja tensión (es una maqueta prototipo de uso educativo) por lo que no requiere grandes corrientes o voltajes para su funcionamiento.

**Tabla 9.**

#### **Metodología para el diseño eléctrico**

<b>Metodología de Diseño</b>
<b>A. Diseño general – normativas – potencia Instalada</b>
<b>B. Conexión a la red</b>
<b>C. Guía de elección de arquitecturas</b>
<b>D. Protección de los circuitos</b>

**Fuente: (Schneider Electric España, 2010)**

La parte “A” (diseño general-normativas-potencia instalada) mostradas en la tabla anterior, debe tener una correcta comprensión en todas las reglas y normas que la rigen, la demanda total de energía se puede obtener a partir de los datos relacionados con el voltaje y la corriente de los equipos a utilizarse, obteniendo la potencia necesaria que suministra la fuente de alimentación para que si es necesario incrementar la capacidad de la fuente y así alcanzar una potencia adecuada a los requerimientos del diseño.

En la parte “B” (Conexión a la red) la instalación se conectará a la red local de suministro eléctrico. En la sección “C” (Guía de elección de arquitecturas) la red de distribución de toda la instalación se estudia como un sistema completo, se definen el número y características de las fuentes de alimentación, la disposición de montaje, el equipo de distribución (cuadros, interruptores, conexiones de circuitos, entre otros) esto se determina a partir de los planos de construcción y la ubicación de las cargas.

El índice “D” (Protección de los circuitos) estudia cada circuito en detalle, tomando en cuenta las corrientes nominales de las cargas, el nivel de la corriente de cortocircuito y el tipo de dispositivo protector, además se puede determinar la sección de los cables conductores del circuito, es posible que estos circuitos indiquen que es necesario usar un conductor de mayor sección que el que se seleccionó en un principio por lo que se estima el criterio del diseñador.

### 2.3.35. Diseño general, normativas, potencia instalada

Las instalaciones de baja tensión están regidas por numerosos textos legales y técnicos que se pueden clasificar por disposiciones legales (decretos, reglamentos, etc.), código de práctica, disposiciones legales publicadas por instituciones profesionales, normas nacionales e internacionales para instalaciones, además de normas nacionales e internacionales para productos.

**Tabla 10.**

#### Disposiciones legales de tensión IEC

Sistemas trifásicos de tres o cuatro hilos Tensión nominal (V)		Sistemas de fase única de tres hilos Tensión nominal (V)
50 Hz	60 Hz	60 Hz
-	120/208	120/240
-	240	-
<b>230/400</b>	277/480	-
<b>400/690</b>	480	-
-	347/600	-
<b>1000</b>	600	-

**Fuente: (Schneider Electric España, 2010)**

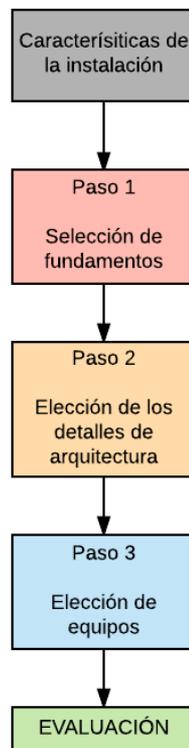
Las tensiones que se muestran en la Tabla 10 están entre 100 V y 1000 V de acuerdo a la norma IEC (*IEC 60038 Edición 6.2 2002-07*), la tensión nominal de los sistemas existentes de 220/380 V y de 240/415 V pueden evolucionar hacia el valor recomendado de 230/400 V.

Las autoridades de suministro de electricidad de los países que tengan sistemas de 220/380 V deberían establecer la tensión la tensión en 230/400 V +6%, -10% y los países que tengan sistemas de 240/415 V deberían establecer la tensión en el rango de 230/400 V +10%, -6%. Al final de este periodo de transición, se debería haber alcanzado la tolerancia de 230/400 V más menos 10%. Todas las consideraciones anteriores se aplican también al valor presente de 380/660 V con respecto al valor recomendado de 400/690 V. (Schneider Electric España, 2010)

En la mayoría de los países las instalaciones eléctricas deberán cumplir diferentes disposiciones legales publicadas por las autoridades nacionales o por organismos privados reconocidos. Es primordial tener en cuenta estas restricciones locales antes de comenzar el diseño. Así mismo las normas en las que se basa esta guía es de la IEC pertinentes, en particular la IEC-60364, la cual ha sido establecida por parte de expertos e ingenieros de todos los países del mundo con una experiencia equiparable en un nivel internacional. En la actualidad, los principios de seguridad de la IEC-60364 y la 60479-1 son los fundamentos de la mayoría de las disposiciones legales del mundo. Para diseñar una instalación se debe evaluar la demanda máxima de potencia que se puede solicitar en el sistema obtenida de la suma aritmética de todas las cargas existentes en la instalación. La mayor parte de los dispositivos y aparatos eléctricos se marcan para indicar su potencia nominal ( $P_n$ ), aunque esta no es la potencia absorbida realmente es la inicial para empezar nuestro diseño. (Schneider Electric España, 2010)

### 2.3.36. Elección de arquitectura

Implica el espacio físico que ocupa el proyecto, la elección de fuentes de alimentación, la definición de diferentes niveles de distribución y la elección de equipos, una mejor arquitectura se basa normalmente en el criterio de rendimiento que le interese al cliente el cual utilizara la instalación a lo largo de su ciclo de vida, mientras encontremos soluciones de optimización son mayores las posibilidades de fiabilidad que el sistema ofrecerá. La Figura 14 muestra un método para elegir la arquitectura eléctrica del proyecto, cabe recalcar que esta guía no se considera la única solución, sin embargo es de gran aporte al diseño.



**Figura 14. Diagrama para elegir la arquitectura eléctrica**

**Fuente: (Schneider Electric España, 2010)**

Según el diagrama para elegir la arquitectura eléctrica, los procedimientos de instalación se dividen en 3 pasos, en donde finalmente se obtiene una evaluación total del funcionamiento para aprobar o desaprobar el diseño de acuerdo a las exigencias establecidas por el cliente.

**Paso 1.-** Implica la definición de las características generales de la instalación eléctrica. Se tienen en cuenta las características macroscópicas referentes a la instalación y su uso.

**Paso 2.-** Implica la definición de la instalación eléctrica con mayor detalle. Se basa en los resultados del paso anterior, así como en el cumplimiento de los criterios relativos a la implantación y utilización de la instalación.

**Paso 3.-** En esta fase lleva a cabo la elección de los equipos que se van a implantar y resulta de la elección de la arquitectura. La elección se realiza a partir de los catálogos del fabricante, con el fin de cumplir determinados criterios.

**Evaluación.-** Este paso permite a la ingeniería disponer de cifras que podrán utilizarse como base para las conversaciones mantenidas con el cliente y los demás participantes.

### **2.3.37. Protección de los circuitos**

Para mantener al sistema eléctrico protegido y garantizar una instalación segura y fiable, es importante tener en cuenta las siguientes condiciones:

- Deben soportar la corriente a plena carga permanente y las sobreintensidades normales de corta duración.
- No provocar caídas de tensión que pudieran perjudicar el rendimiento de ciertas cargas, por ejemplo: un periodo de aceleración demasiado largo al arrancar un motor, etc.

De este modo los dispositivos de protección deben:

- Proteger el cableado y las barras conductoras para cualquier nivel de sobre intensidad, hasta las corrientes de cortocircuito
- Garantizar la protección de personas contra el riesgo de contacto indirecto.

Es decisión del diseñador la selección del diámetro del cable. (Schneider Electric España, 2010)

### 2.3.38. Diseño del sistema de control

El diseño de sistema de control se centra en los aspectos de diseño de automatización, es decir, plantea metodologías que permiten la aplicación de tecnologías en el ámbito técnico, incluso da recomendaciones para la ergonomía y la interacción hombre-máquina. La clasificación al control de los procesos que se manejan en el campo industrial se muestra en la Tabla 11.

**Tabla 11.**

#### Clasificación de procesos industriales

Tipos de Procesos industriales	
<b>Proceso Continuo</b>	Se caracteriza por la salida del proceso en forma de flujo continuo de material, como por ejemplo la purificación de agua o la generación de electricidad.
<b>Proceso Discreto</b>	Contemplan la salida del proceso en forma de unidades o numero finito de piezas, siendo el ejemplo más relevante la fabricación de automóviles
<b>Proceso batch</b>	Son aquellos en los que la salida del proceso se lleva a cabo en forma de cantidades o lotes de material, como por ejemplo la fabricación de productos farmacéuticos o la producción de cerveza.

**Fuente:** (Pere Ponsa, 2010)

El concepto de proceso está claramente relacionado con los conceptos de productos, programas y diseño de plantas. El diseñador o la empresa debe contar con una clara relación entre estos conceptos, por lo tanto el ciclo de diseño está basado en la idea de ingeniería concurrente.

### 2.3.39. Control de procesos industriales

Abarca la teoría de control básica de realimentación y acción PID, la instrumentación de control como sensores, actuadores, dispositivos electrónicos, entre otros. Las estructuras de control como Feedback, feedforward, cascada, etc.

Respecto a la instrumentación de control, los tres elementos básicos capaces de llevar a cabo el control secuencial o la regulación continua dentro del control de procesos industriales son el mando autómatas programable PLC,

el ordenador industrial y los reguladores industriales. Durante mucho tiempo la utilización de autómatas programables en la industria ha destacado su labor eficaz en el control secuencial de procesos. El ordenador aparece en el control de procesos industriales y dispone de funciones presentes en la industria como: monitorización, vigilancia, control y supervisión. (Pere Ponsa, 2010)

#### 2.3.40. Sensores

Los sensores son usados para medir diversas variables físicas. Al igual que cualquier otro dispositivo pueden fallar de diferentes maneras, pueden fallar de forma segura (activarse de manera errónea) o de forma peligrosa (no activarse en un caso de emergencia). Muchos sistemas de seguridad son diseñados para dar fallas seguras, es decir, cuando se retira la alimentación eléctrica el sistema de seguridad lleva el proceso a un estado seguro. Algunas mediciones pueden ser interpretadas de otras variables, por ejemplo, si un sistema está diseñado para realizar el apagado del proceso debido a una alarma de alta presión; podría también ser efectivo monitorear la temperatura ya que una elevada temperatura podría implicar un aumento súbito en la presión. (Grunh, 2006)

#### Tabla 12.

##### Características de los Sensores

Características de los Sensores	
<b>La naturaleza</b>	Voltaje, rango de amplitud, respuesta en frecuencia, precisión, señalan el tipo de acondicionamiento de señal.
<b>Señales de ruido</b>	La influencias de estas perturbaciones como también los efectos de carga del hardware de adquisición de datos sobre el sensor
<b>La calibración</b>	Si la respuesta del sensor a los cambios de la variable física es lineal o no, una mala calibración va a tender a producir respuestas erróneas.
<b>La precisión</b>	Es la capacidad de medir el mismo valor repetidas veces en idénticas condiciones.
<b>Respuesta</b>	El tiempo requerido para responder a un cambio brusco de la variable que está siendo censada
<b>La histéresis</b>	Se define como la dependencia de la salida del sensor de la respuesta anterior

**Fuente:** (UNET, 2008)

### 2.3.41. Elementos finales

Son utilizados para ejecutar el apagado de un proceso. Los más comunes son válvulas. Estos elementos tienen la tasa más elevada de fallas que cualquier otro componente dentro de un sistema ya que al ser elementos mecánicos están sujetos a condiciones extremas del proceso. (Grunh, 2006)

Un elemento final de control, es un mecanismo que modifica el valor de la variable manipulada (se activa) en respuesta a una señal de salida desde el dispositivo de control automático. Usualmente recibe la señal del controlador y manipula un flujo de material o energía para el proceso, este consta generalmente de dos partes (Ver Tabla 13).

**Tabla 13.**

**Partes de un elemento final**

<b>Partes de un elemento final</b>	
<b>Actuador</b>	El cual convierte la señal del controlador en un comando para el dispositivo manipulador
<b>Mecanismo</b>	Sirve para ajustar la variable manipulada

**Fuente: (Academia, 2009)**

### 2.3.42. Redundancia

La redundancia es la técnica usada para conseguir un sistema tolerante a fallas. El sistema más común de redundancia de hardware es la votación por mayoría. Es adecuada para fallas imprevistas que afectan a las acciones del sistema y se compensan con funciones redundantes del mismo. La redundancia del sistema vendrá definida por la arquitectura seleccionada, dicha selección es una actividad que debe ser definida durante el paso del diseño conceptual. La arquitectura tiene un fuerte impacto sobre la integridad de la seguridad del sistema. Se debe determinar qué nivel de redundancia se requiere para lograr el SIL objetivo y la disponibilidad para todos los elementos que conforman el SIS. (Grunh, 2006)

### 2.3.43. Depósito de volumen variable

Se llama depósito de volumen variable al dispositivo de almacenamiento que también será sometido a un cambio en su volumen total, por el ingreso de diferentes tipos de cuerpos sólidos al tanque, lo que alteraría de manera peligrosa el sistema provocando una falla.

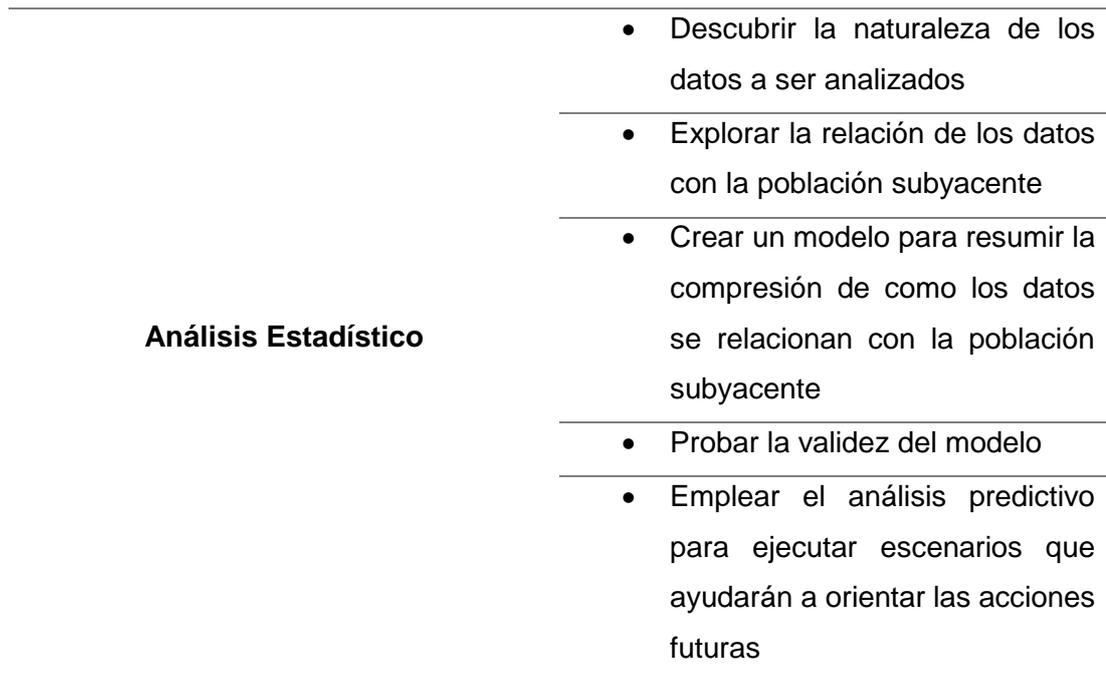
Para evaluar en cada instante el nivel de agua, es necesario introducir el diámetro del depósito, en la situación de un depósito cilíndrico es sencillo pero en la mayoría de casos los depósitos acuden a formas diferentes, por lo tanto, para estos casos donde la sección del depósito es variable en función del fluido (agua por ejemplo) se permite introducir la curva de cubicación, la cual su volumen viene expresada por la siguiente fórmula representada en una figura cónica invertida.

$$V = \frac{A1 + A2}{2} * h \quad [16]$$

Esta curva relaciona el volumen de agua acumulado en función del nivel máximo de altura. La cubicación se basa en describir tres capacidades o volúmenes característicos: el volumen muerto, el volumen útil y el volumen total (suma de los volúmenes anteriores). (Morán, 2010)

### 2.3.44. Análisis estadístico

El análisis estadístico es un conjunto de técnicas que se basan en el análisis de datos, esto quiere decir que su principal función es recoger e indagar cada muestra individual de una serie de artículos en los cuales se puede extraer una muestra, el análisis estadístico puede ser dividido en cinco pasos discretos como se muestra en la Figura 15.



**Figura 15. Pasos del análisis estadístico**

**Fuente: (TechTarget, 2010)**

El objetivo del análisis estadístico es identificar tendencias. Un negocio de venta al por menor, por ejemplo, podría utilizar el análisis estadístico para encontrar patrones en los datos no estructurados y semi-estructurados de los clientes que se puedan utilizar para crear una experiencia para el cliente, más positiva y aumentar las ventas. (TechTarget, 2010)

### 2.3.45. Métodos de análisis

De acuerdo a los criterios anteriores el análisis estadístico no solo forma parte de las finanzas o economía sino también de aspectos sociales y técnicos, para nuestro caso, este análisis debe ser acertado para confirmar la fiabilidad del sistema en ejecución a comparación con sistemas de seguridad convencionales, con el objetivo de demostrar la confiabilidad del sistema en empresas industriales para brindar mayor seguridad a los usuarios. De este modo se analiza diferentes métodos para formular un estudio estadístico que agrupe a las exigencias de los diseñadores.

**Frecuencia.-** Se utiliza cuando sus variables son categóricas o nominales, por ejemplo, la variable “género”, que contiene solamente a dos categorías (masculino y femenino) (Maria Belén Castañeda, 2010)

**Prueba-T (T-Test).-** Se utiliza para determinar si existen diferencias significativas entre 2 grupos de participantes. Por ejemplo, si se desea comparar el rendimiento académico de un grupo de estudiantes y determinar si existe una diferencia entre hombres y mujeres, la prueba-T permitirá efectuar esta comparación. (Maria Belén Castañeda, 2010)

**Análisis de correlaciones.-** El análisis de correlaciones es muy útil para investigar o administrador, muchas veces levantamos encuestas con el propósito de determinar si existe alguna relación o asociación entre diversas variables de interés. El análisis de correlaciones simple permitirá determinar si dichas variables están asociadas antes de continuar con un análisis más sofisticado de causa-efecto. (Maria Belén Castañeda, 2010)

**Análisis predictivo.-** Es cuando el investigador quiere determinar el efecto de una variable sobre la otra (causa-efecto), el análisis más adecuado sería el análisis predictivo utilizando una regresión final. Sin embargo, para conducir este tipo de análisis se deberán cumplir diversos supuestos estadísticos. (Maria Belén Castañeda, 2010)

El análisis predictivo proporciona varias pruebas para determinar la correlación entre las variables dependientes e independientes, se utilizan pruebas estadísticas para determinar que la regresión sea la correcta, las distintas pruebas que se realizan se describen en la Tabla 14.

**Tabla 14.**

**Defunción de pruebas estadísticas para regresión**

Prueba	Definición	Hipótesis nula en SPSS	Regla de decisión en SPSS
<b>Prueba – F</b>	Prueba global que indica si en su conjunto las variables independientes se relacionan con la variable dependiente.	No existe correlación entre las variables independientes y dependientes	Se rechaza la hipótesis nula si el valor $p$ es menor a .05
<b>Prueba – T</b>	Prueba individual para cada coeficiente beta de las variables independientes.	$H_0: \beta = 0$	Se rechaza la hipótesis nula si el valor $p$ es menor .05

**Fuente:** (Maria Belén Castañeda, 2010)

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Modalidad de investigación

Las modalidades utilizadas en la presente investigación son la bibliográfica y la de campo, producto de ello se presentó la solución al problema que beneficia directamente a la adquisición de variables electromecánicas mediante un módulo con carácter educativo de una micro planta de nivel.

##### **De campo**

La investigación se realizó en la ciudad de Latacunga en el Laboratorio de PLC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga.

##### **Bibliográfica**

La investigación se fundamenta en los estudios técnicos referente al diseño y construcción de una micro planta de nivel para el estudio de fiabilidad de un sistema instrumentado de seguridad en fuentes confiables que contribuyen a la ejecución del proceso investigativo.

#### 3.2. Tipos de investigación

##### **Cualitativo**

Para la medición de los datos obtenidos, esta vez se tomó valores estandarizados que se muestran en el manual de OREDA para obtener un tasa de falla en cada instrumento de seguridad que se implementa al sistema de acuerdo a las especificaciones del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), NTE INEN-ISO 27013:2012 para la técnicas de seguridad (Normalización, 2012).

##### **Diseño de la investigación**

El trabajo pretende realizar la obtención de una tasa de falla inicial para cada instrumento instalado al sistema, para determinar cómo se comportan

en un tiempo determinado. Para ello se utiliza el enfoque Empirista-Inductivo, que consta de:

**Método de hallazgo inductivo.-** Se trata del análisis en donde al adquirir los valores de la tasa de falla en cada instrumento de seguridad permite establecer los parámetros de diseño para el sistema instrumentado de seguridad.

**Método de hallazgo deductivo.-** Debido a que se procede de la necesidad de adquisición de variables de tasa de fallas para cada instrumento de seguridad, se procede a obtener los valores de probabilidad de fallas mediante las ecuaciones de cálculo respectivas.

### **3.3. Niveles de la investigación**

#### **Exploratoria**

En la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE de la ciudad de Latacunga no se dispone de un módulo didáctico de un sistema instrumentado de seguridad en el laboratorio de PLC.

#### **Descriptiva**

En la investigación se recolectó datos, aspectos, medidas y características de la problemática a estudiar de forma independiente, relacionados con los conceptos de tasa de fallas en diferentes instrumentos de seguridad, control y actuadores.

### **3.4. Población y muestra**

No es considerada la población en la presente investigación porque está orientada al análisis de resultados de la medición de la probabilidad de fallas que puedan ocurrir en un instrumento de seguridad.

### **3.5. Técnicas de recolección de datos**

Será necesario contar con suficiente información como se detalla en la Tabla 15.

Tabla 15.

## Recolección de información

PREGUNTAS BÁSICAS	EXPLICACIÓN
1. ¿Para qué?	Para investigar la fiabilidad de un sistema instrumentado de seguridad
2. ¿De qué personas u objetos?	De equipos de seguridad que conforman un sistema en conjunto
3. ¿Sobre qué aspecto?	Estudio de variables de tasa de fallas.
4. ¿Quién? ¿Quiénes?	Investigador
5. ¿Cuándo?	2017
6. ¿Dónde?	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE
7. ¿Cuántas veces?	Una vez
8. ¿Qué técnicas de recolección?	Inductivo
9. ¿Con que?	Manuales
10. ¿En qué situación?	Normal

## 3.5.1. Instrumentos

Los instrumentos utilizados para registrar la información durante la ejecución del presente proyecto fueron de tipo estadístico tomadas del manual de OREDA para mitigar tasas de fallas en cada instrumento de seguridad. Para el soporte estadístico se usa los valores de la probabilidad de falla que existen en un instrumento en su etapa inicial de vida útil y la probabilidad de que falle el mismo instrumento implementado en un sistema instrumentado de seguridad.

### **3.5.2. Validez y confiabilidad**

Para el procesamiento de la información se seguirán varios procedimientos en base a criterios establecidos como:

- Revisión crítica de la información recogida: es decir, limpieza de la información defectuosa, contradictoria, incompleta, no pertinente, etc.
- Repetición de la recolección, en ciertos casos individuales, para corregir fallas de medición.
- Tabulación o cuadros según variables de cada hipótesis: cuadros de una sola variable, cuadro con cruce de variables, etc.
- Manejo de información (mediante gráficos y diagramas que asocian a las variables y a los parámetros involucrados, y utilizando también tablas explicativas) con el apoyo de herramientas informáticas.
- Estudio estadístico de los datos para la presentación de los resultados.

### **3.6. Técnicas de análisis de datos**

Para el procesamiento de la información se seguirán varios procedimientos en base a criterios establecidos como:

- Tabulación o cuadros según variables de cada hipótesis: cuadros de una sola variable, cuadro con cruce de variables, etc.
- Manejo de información (mediante gráficos y diagramas que asocian a las variables y a los parámetros involucrados, y utilizando también tablas explicativas) con el apoyo de herramientas informáticas.

### **3.7. Técnicas de comprobación de la hipótesis**

- Análisis de los resultados estadísticos, destacando tendencias o relaciones fundamentales de acuerdo con los objetivos e hipótesis.
- Interpretación de los resultados en el aspecto pertinente.
- Comprobación de la hipótesis planteada.
- Establecimiento de conclusiones y recomendaciones en base a los objetivos de la investigación.

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 4.1. Análisis de resultados

Para determinar si es necesario implementar un sistema instrumentado de seguridad (SIS) en la microplanta de nivel, se obtuvo una bitácora de fallas (Ver ANEXO C), durante un tiempo de 180 días de estudio, evidenciando un promedio de tasa de fallas de 0,033 en el sistema.

##### 4.1.1. Medición de fallas ocurridas en la microplanta de nivel

La medición consiste en enumerar la fallas que ocurrieron en cada elemento que conforma la microplanta de nivel durante un lapso de tiempo determinado (6 meses, 180 días), los valores del número de fallas son mostrados en la Tabla 16. (Ver ANEXO C para una descripción mas detallada)

**Tabla 16.**

#### Información de fallas

Elemento	Número de fallas ocurridas en 180 días	
	Sistema Deseado	Sistema Actual
<b>Sistema de control</b>	1	10
<b>Relés de control</b>	1	8
<b>Sensores</b>	1	4
<b>Bombas</b>	1	3
<b>Fuente de poder</b>	1	2

De acuerdo a la Tabla 16 donde se indica el número de fallas ocurridas se calcula la tasa de fallas en cada elemento de la microplanta.

$$\text{Tasa de falla } (\lambda) = \frac{\text{Nº de Fallas}}{\text{Tiempo total de operación}}$$

Siendo el tiempo total de operación los 6 meses en donde estuvo a prueba el sistema.

Los valores de la tasa de fallas en cada elemento del sistema se muestran en la Tabla 17.

**Tabla 17.**

**Tasa de fallas real del sistema**

<b>Elemento</b>	<b>Sistema Actual</b>
<b>Sistema de control</b>	0,055
<b>Relés de control</b>	0,044
<b>Sensores</b>	0,022
<b>Bombas</b>	0,016
<b>Fuente de poder</b>	0,011

Para que los componentes sean confiables y desempeñen su función básica durante un periodo de tiempo preestablecido es necesario que el valor de la tasa de falla real sea baja, por lo tanto, se toma a criterio una “Tasa de falla ideal”, es decir, el valor aproximado de ocurrencia de falla que satisfaga las necesidades del cliente (para este caso se desea que el valor de tasa de fallas sea de 0.005 que corresponde a 1 falla en un periodo de 6 meses), como se muestra en la Tabla 18.

**Tabla 18.**

**Tasa de fallas ideal del sistema**

<b>Elemento</b>	<b>Tasa de Falla Ideal</b>
<b>Sistema de control</b>	0,005
<b>Relés de control</b>	0,005
<b>Sensores</b>	0,005
<b>Bombas</b>	0,005
<b>Fuente de poder</b>	0,005

## **4.2. Discusión de los resultados**

### **4.2.1. Resultados del número de fallas ocurridas en el sistema**

En relación a los valores del número de fallas obtenidas de la bitácora de estudio (Ver Anexo C), existe un alto riesgo de ocurrencia de fallas en varios elementos del sistema, esto indica que es necesario un cambio en la seguridad del sistema para prevenir fallas catastróficas en el laboratorio de PLC's de la Universidad.

### **4.3. Comprobación de hipótesis**

Para la comprobación de la hipótesis de la presente investigación se aplicará el método estadístico de una prueba t (test-T), prueba que se realiza para comprobar si la hipótesis es nula o cierta. Los datos que se tomarán en cuenta para este análisis son los valores de la tasa de fallas (tasa de falla Real y tasa de falla Ideal) que ocurrieron en un periodo de tiempo establecido.

#### **Hipótesis Nula**

No existe diferencia significativa entre el índice de tasa de fallas real (tasa de fallas obtenidas) y la tasa de fallas deseada (tasa de fallas ideal).

#### **Hipótesis Alternativa**

Existe una diferencia significativa entre los índices de tasa de falla por lo que es viable la implementación de un sistema de seguridad para reducir el riesgo de ocurrencia de una falla peligrosa en la micro planta de nivel para prácticas online para el laboratorio de PLC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Los valores tomados para la prueba estadística (T-test) se muestra en la Tabla 19.

**Tabla 19.****Tasas de Falla**

Elemento	Tasa de Falla Ideal	Tasa de Falla Real
Sistema de control	0,005	0,055
Relés de control	0,005	0,044
Sensores	0,005	0,022
Bombas	0,005	0,016
Fuente de poder	0,005	0,011

La Tabla 20 muestra los valores calculados para la pruebas del estudio T en muestras emparejadas.

**Tabla 20.****Resultados calculados**

Par 1	Media	Desviación estándar	Media de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia		t	gl	Sig.
				Inferior	Superior			
Tasa de Fallas - Tasa de Fallas	-,0246	,0189816	,0084888	-,048168	-,001031	-2,89	4	,044

El valor t estadístico calculado es de  $p=0,044$  por lo que se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula, por lo tanto es fiable realizar la implementación de un sistema instrumento de seguridad para reducir el riesgo de fallas en las prácticas online realizadas en el laboratorio de PLC's de la Universidad.

## CAPÍTULO V

### 5. PROPUESTA

ESTUDIO DE LA FIABILIDAD DE UN SISTEMA INSTRUMENTADO DE SEGURIDAD EN RELACIÓN A LAS PRÁCTICAS ONLINE EN UN PROTOTIPO DE UNA PLANTA DE NIVEL CON DEPÓSITO DE VOLUMEN VARIABLE EN EL LABORATORIO DE PLC'S DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA.

#### 5.1. Datos informativos

**Nombre de la Institución:** Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga

**Dirección:** Provincia de Cotopaxi, Cantón Latacunga, Calle Quijano y Ordoñez y Hermanas Páez, Laboratorio de PLC

**Tipo de Institución:** Educativa

**Tamaño de Institución:** Grande

#### 5.2. Antecedentes de la propuesta

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga tiene como uno de sus principios fundamentales “**Ser una Universidad que impulsa la gestión del conocimiento, el desarrollo de la tecnología, la innovación y el emprendimiento**” (ESPE, 2016), basados en este principio y con el resultado de la investigación se determinó que se debe implementar en el laboratorio de PLC's un módulo didáctico para el estudio de los sistemas instrumentados de seguridad en beneficio al fortalecimiento de los conocimientos en los estudiantes de las diferentes carreras que oferta la Universidad.

La presente propuesta está orientada a la construcción de una micro planta de nivel para prácticas online con volumen variable que integra un sistema instrumentado de seguridad.

En la actualidad el laboratorio de PLC de la Universidad de las fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga, no cuenta con un prototipo de carácter educativo en la que se enseñe los beneficios de contar con un sistema instrumentado de seguridad para prevenir o mitigar eventos inesperados perjudiciosos para el sistema.

### **5.3. Justificación**

Los antecedentes señalados indican la necesidad de incorporar nuevos métodos de seguridad a los procesos industriales para tener una mayor fiabilidad del sistema.

El objetivo actual de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga es fortalecer los conocimientos teóricos adquiridos en clase para poderlos desarrollar de una manera práctica por parte de sus estudiantes fomentando el desarrollo tecnológico en el centro del país.

Los estudiantes de las carreras de ingeniería en Electrónica, Mecatrónica y Electromecánica de la Universidad podrán adquirir y visualizar mediante el módulo de micro planta de nivel para prácticas online la eficiencia en términos de seguridad que tiene el proceso cuando se utiliza un sistema instrumentado de seguridad, aumentado la confiabilidad del usuario hacia el sistema.

El impacto que va a tener el desarrollo de la presente investigación describirá la importancia de los sistemas instrumentados de seguridad que están encaminados al fortalecimiento de los conocimientos de los estudiantes de la Universidad ESPE extensión Latacunga además en la reducción del mantenimiento de los equipos sin afectar la duración de su vida útil, dentro del marco de la seguridad y la protección del medio ambiente.

#### **5.4. Objetivos**

- Diseñar un prototipo para una planta de nivel para prácticas online.
- Construir un prototipo de una planta de nivel para prácticas online.
- Implementar un módulo didáctico de una planta de nivel.
- Realizar un estudio estadístico sobre la fiabilidad del sistema instrumentado de seguridad en el prototipo para determinar el desempeño del módulo.

#### **5.5. Fundamentación propuesta**

La presente propuesta, se realiza en el marco de la implementación de un módulo didáctico de una micro planta de nivel para prácticas online, como necesidad de los estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE para visualizar mediante un interfaz hombre-máquina (HMI) el estado del proceso en tiempo real, de esta manera se podrá realizar un estudio de fiabilidad de un sistema instrumentado de seguridad relacionando los conceptos teóricos con la práctica en el laboratorio de PLC.

El punto de partida será el dimensionamiento de la micro planta de nivel, su sistema eléctrico y electrónico de control.

#### **5.6. Diseño de la propuesta**

##### **5.6.1. Sistemas del diseño**

- Sistema instrumentado de seguridad
- Sistema mecánico
- Sistema eléctrico

##### **Sistema instrumentado de seguridad**

Para el presente módulo se utilizaron equipos que se detallaron anteriormente como sensores de nivel, placa Raspberry y tarjeta Arduino, en los diagramas eléctricos (ver Anexo F) se puede identificar la forma de conexión de los elementos eléctricos que interviene para poder lograr un sistema instrumentado de seguridad. En el mismo anexo se muestra las diferentes conexiones del sistema en general que se ubica en el laboratorio.

## 5.7. Metodología para ejecutar la propuesta

### 5.7.1. Diseño de un Sistema Instrumentado de Seguridad.

Los pasos que se muestran a continuación son los escogidos para el diseño de un sistema instrumentado de seguridad (SIS).

**Tabla 21.**

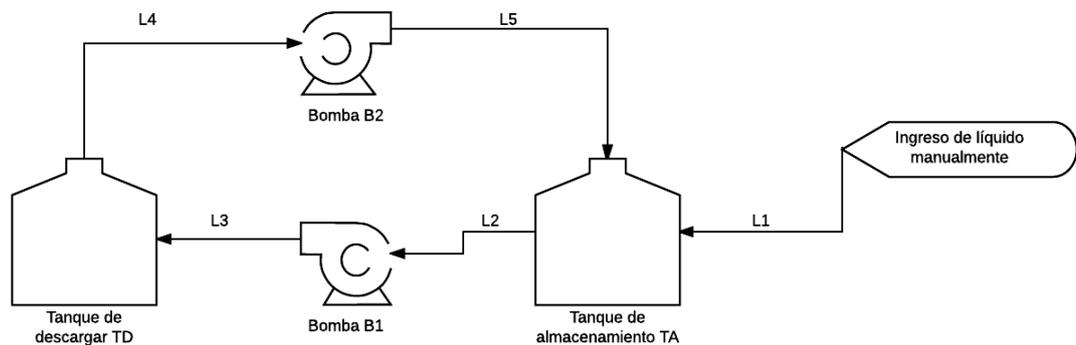
#### Etapas de desarrollo de un SIS (HazOp)

Desarrollo del HazOp
Desarrollo de capas de protección (LOPA)
Desarrollo de especificación de requerimientos de seguridad (SRS)
Requerimientos funcionales
Calculo de SIL y bloques de seguridad
Diseño del ciclo de vida

**Fuente:** (Garcín, 2007)

#### Desarrollo del HazOp

Para el desarrollo del HazOp es necesario disponer de un diagrama PI&D del sistema. Basándose en el diagrama se pueden detectar los peligros que pueden suscitarse y que elementos del sistema están involucrados.



**Figura 16. Diagrama PI&D del sistema**

Para detectar los peligros que pueden provocarse en el proceso y también los elementos del sistema que están involucrados, se hace un cuadro referencial de los posibles fallos que pueden ocurrir, las consecuencias que provoca la falla, los riesgos que tiene para el sistema y también para el personal que está activo y la probabilidad de todos los acontecimientos que ocurran. Se analiza minuciosamente en todos los puntos y se toman los más vulnerables, esto es el inicio de nuestro diseño por lo tanto debe afrontar la seriedad del caso, lo mencionado anteriormente se muestra en la Tabla 22 que a continuación está representada.

**Tabla 22.**  
**Posibles fallos en el proceso**

NODO	DESVIACIÓN	CAUSAS	CONSECUENCIA	RIESGO			RECOMENDACIÓN
				CONSECUENCIA	PROBABILIDAD	RIESGO	
<b>L1</b>	Alto Flujo	Ninguna		S	F		
	Bajo Flujo	Ninguna					
	No Flujo	Ninguna					
	Alta Temperatura	Ninguna					
	Baja Temperatura	Ninguna					
	Alta Presión	Ninguna					
	Baja Presión	Ninguna					
<b>TA</b>	Alto Flujo	Ninguna					
	Bajo Flujo	Ninguna					
	Alta Temperatura	Ninguna					
	Baja Temperatura	Ninguna					
	Alta Presión	Ninguna					
	Baja Presión	Ninguna					
	Alto Nivel	Derrame de líquido	Desborde del tanque	4	4	M	Instalar un lazo de seguridad el cual disponga de un sensor de nivel que active una alarma de alto nivel y apague la bomba B2.

**CONTINUA** →

	Bajo Nivel	Falla Bomba B1	Bomba B1 se va a quemar	5	3	M	Instalar un lazo de seguridad que apague la bomba B1, debe disponer de un sensor de nivel y activar una alarma de bajo nivel
<b>L2</b>	Alto Flujo	Ninguna					
	Bajo Flujo	Falla Bomba B1	Bomba B1 se va a quemar	4	4	B	Instalar un lazo de seguridad que apague la bomba B1 y active una alarma de bajo flujo
	Alta Temperatura	Ninguna					
	Baja Temperatura	Ninguna					
	Alta Presión	Ninguna					
	Baja Presión	Ninguna					
	Alto Nivel	Ninguna					
	Bajo Nivel	Ninguna					
<b>L3</b>	Alto Flujo	Ninguna					
	Bajo Flujo	Falla Bomba B1	Bomba B1 se va a quemar	4	3	B	Instalar un lazo de seguridad que apague la bomba B1 y active una alarma de bajo flujo
	Alta Temperatura	Ninguna					
	Baja Temperatura	Ninguna					
	Alta Presión	Ninguna					
	Baja Presión	Ninguna					
	Alto Nivel	Ninguna					
	Bajo Nivel	Ninguna					
<b>TD</b>	Alto Flujo						
	Bajo Flujo						
	Alta Temperatura						
	Baja Temperatura						
	Alta Presión						
	Baja Presión						
	Alto Nivel	Derrame de líquido	Desborde del tanque	4	5	M	Instalar un lazo de seguridad que disponga de un sensor de nivel que active una alarma de alto nivel y apague la bomba B1

**CONTINUA →**

	Bajo Nivel	Falla Bomba B2	Bomba B2 se va a quemar	5	4	M	Instalar un lazo de seguridad que apague la bomba B2, debe disponer de un sensor de nivel y activar una alarma de bajo nivel
<b>L4</b>	Alto Flujo	Ninguna					
	Bajo Flujo	Falla Bomba B2	Bomba B2 se va a quemar	4	3	B	Instalar un lazo de seguridad que apague la bomba B2 y active una alarma de bajo flujo
	Alta Temperatura	Ninguna					
	Baja Temperatura	Ninguna					
	Alta Presión	Ninguna					
	Baja Presión	Ninguna					
	Alto Nivel	Ninguna					
	Bajo Nivel	Ninguna					
<b>L5</b>	Alto Flujo						
	Bajo Flujo	Falla Bomba B2	Bomba B2 se va a quemar	3	3	B	Instalar un lazo de seguridad que apague la bomba B2 y active una alarma de bajo flujo
		Falla Bomba B1	Bomba B1 se va a quemar	3	3	B	Instalar un lazo de seguridad que apague la bomba B1 y active una alarma de bajo flujo
	Alta Temperatura						
	Baja Temperatura						
	Alta Presión						
	Baja Presión						
	Alto Nivel						
	Bajo Nivel						

**Tabla 23.****Etapas de desarrollo de un SIS (LOPA)**

Desarrollo del HazOp
<b>Desarrollo de capas de protección (LOPA)</b>
Desarrollo de especificación de requerimientos de seguridad (SRS)
Requerimientos funcionales
Calculo de SIL y bloques de seguridad
Diseño del ciclo de vida

**Fuente:** (Garcín, 2007)

**Desarrollo del LOPA**

Una vez realizado el HazOp se desarrolla el análisis de las capas de protección (LOPA), se analiza las situaciones de peligro que pudieran presentarse, sus causas de inicio y la frecuencia con la que pueden ocurrir.

Se analiza el sistema actual (un sistema “desnudo, sin protecciones”) en el momento que pueden ocurrir todas las fallas posibles, luego se realiza un nuevo análisis considerando las capas de protección al implementarse según el nivel de integridad de seguridad (SIL) requerido de acuerdo a cada una de las funciones instrumentadas de seguridad (SIF), para reducir los riesgos a niveles tolerables.

Para determinar la ocurrencia por año de las fallas se analiza la Tabla 24 donde se muestra el grado de ocurrencia de una falla diaria de acuerdo a un rango valorado del 1 al 10 donde el rango más bajo es para fallas muy poco o remotamente probables (con una baja probabilidad de falla) y los rangos más altos son para fallas con un índice de catástrofe moderado (controlable) o muy alto (probabilidad de falla más alta), en nuestro caso tenemos fallas muy poco probables (rango de 3) y fallas de tipo moderado (rango de 6).

**Tabla 24.****Rango de probabilidad de falla**

<b>Efecto</b>	<b>Rango</b>	<b>Criterio</b>	<b>Probabilidad de Falla</b>
<b>Remota</b>	1	Falla improbable	1 en 0.0000001
<b>Muy Poca</b>	2	Sólo fallas aisladas asociadas con el proceso	1 en 0.000001
<b>Poco</b>	3	Fallas aisladas asociadas con procesos similares	1 en 0.00001
	4		1 en 0.0001
<b>Moderado</b>	5	Fallas ocasionales	1 en 0.001
	6		1 en 0.01
<b>Alto</b>	7	Fallas a menudo	1 en 0.1
	8		1
<b>Muy Alta</b>	9	Falla casi inevitable	1 a 10
	10		1 a 100

**Fuente: (Grunh, 2006)**

Hay que tomar en cuenta que la ocurrencia por día se debe multiplicar para los días en el año en que pueda ocurrir la falla (un rango de 1 a 365 días), para luego así obtener el valor requerido. Estimamos un porcentaje de ocurrencia de falla de tres a ocho meses lo que equivale a un valor dentro de un rango de 90 a 240 días (este valor debe ser multiplicado por la probabilidad de falla que se toma en la tabla de grado de ocurrencia de falla).

Para asignar valores a las capas de protección que vamos a usar se toma como referencia el valor que ocupa el diseño de proceso general (en nuestro caso su valor es 1), las alarmas también son designadas como una capa de seguridad (su valor de 0,1 para nuestro diseño), las capas de mitigación adicionales también cuentan como una subcapa de protección a las cuales se les asigna un valor de 0.1, cabe recalcar que se debe identificar el tipo de capa que va a usarse en el sistema.

La probabilidad de un evento intermedio de falla es el resultado del producto entre la probabilidad de inicio, la ocurrencia por año (ya asignada anteriormente), el diseño del proceso general, las alarmas y sus capas de mitigación adicionales.

El nivel de integridad de la función instrumentada de seguridad se la determina con los requerimientos funcionales que tiene el sistema, así mismo el nivel de seguridad requerido (SIL).

Es evidente que con un sistema instrumentado de seguridad (SIS) el sistema obtiene una disminución en la probabilidad de que ocurra un evento peligroso, la Tabla 25 y la Tabla 26 muestran que la probabilidad de falla con un SIS se reduce a comparación con la probabilidad de falla en un inicio (cuando el sistema está sin protección), cabe recalcar que las siglas “M” y “S” significan “Moderado” y “Severo”. En conclusión las capas de protección que se acoplarán al sistema son una herramienta fundamental para reducir la probabilidad de falla que puede ocurrir. De acuerdo a los conceptos tomados de la Tabla 6, se procedió a la realización de la siguiente tabla técnica.

**Tabla 25.**

**Estado del sistema con SIS**

N	Descripción del Evento	Nivel de seguridad	Causa	Probabilidad de inicio	Ocurrencia de falla
1	Derrame de líquido	M	Falla control de nivel	0,005	0,055
2	Bomba B1 falla	M	Falla bomba B1	0,044	0,044
3	Bomba B2 se quema	M	Falla bomba B2	0,022	0,022
		M	Relés de control	0,016	0,016
4	Sistema de control averiado	S	Bloqueo del proceso	0,011	0,011

**Tabla 26.**

**Estado del sistema con SIS (Capas de Protección)**

N	Capas de protección			Prob. intermedia de riesgo	Nivel de integridad de la SIF	Nivel de SIL	Probabilidad de falla	
	Diseño de Proceso General	Alarma	Capas adicionales de fallas					
1	1	0,1	0,1	Sensor ultrasónico	0,00055	0,0317	SIL 1	0,0000174
2	1	0,1	0,1	Relé protector	0,00044	0,0304	SIL 1	0,0000133
3	1	0,1	0,1	Relé protector	0,00022	0,0304	SIL 1	0,0000066
	1	0,1	1	Fuente independiente	0,00016	0,0317	SIL 1	0,0000050
4	1	0,1	0,1	Alarma al usuario	0,00011	0,0317	SIL 1	0,0000034

**Tabla 27.****Etapas de desarrollo de un SIS (SRS)**

Desarrollo del HazOp
Desarrollo de capas de protección (LOPA)
<b>Desarrollo de especificación de requerimientos de seguridad (SRS)</b>
Requerimientos funcionales
Calculo de SIL y bloques de seguridad
Diseño del ciclo de vida

**Fuente:** (Garcín, 2007)

**Desarrollo del SRS**

Después de establecer las capas de seguridad necesarias se procede a realizar la ingeniería para el sistema instrumentado de seguridad (SIS), para esto se desarrollan las especificaciones de los requerimientos de seguridad (SRS). Los cuales se detallan a continuación:

**1. Definición del proceso**

El proceso analizado hace referencia a un sistema de control de nivel en tanques, en dicho proceso se usan bombas eléctricas para el llenado de los tanques las cuales son operadas de forma automática. Por el momento el prototipo se encuentra en una mesa de vigilancia para la supervisión de su proceso pero no cuenta con capas adicionales de protección.

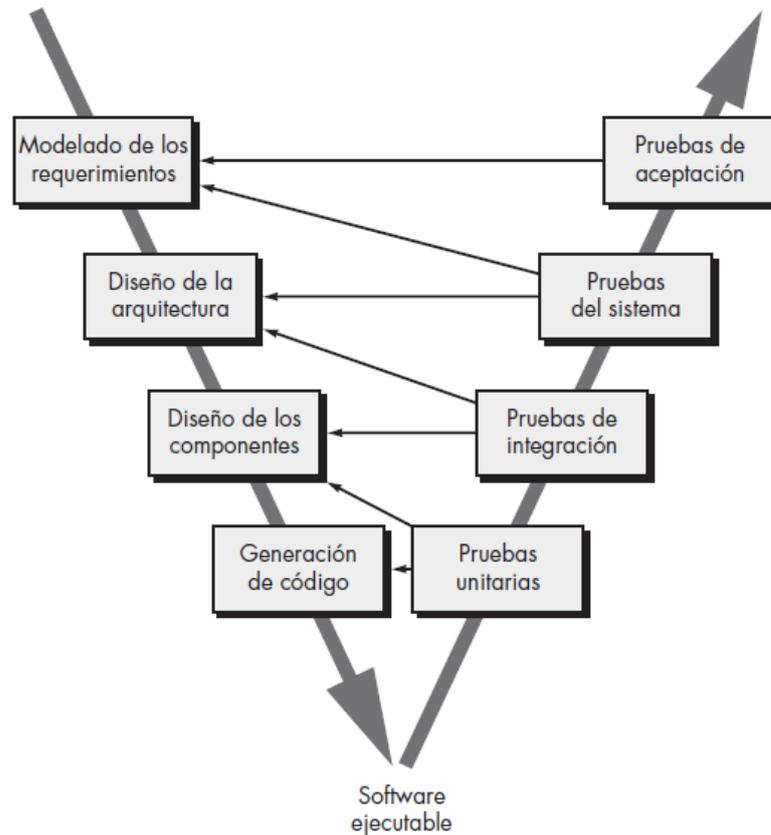
**2. Requerimientos generales**

Ya que el sistema carece de un sistema básico de control de procesos (BPCS), el monitoreo lo realiza la mesa de vigilancia en la que se encuentra instalado el prototipo.

El sistema instrumentado de seguridad debe controlar el flujo y nivel del líquido al momento de su llenado y vaciado en los respectivos tanques y evitar la obstrucción de las tuberías.

### 3. Requerimientos del software

Para que el software que se desarrolla cumpla con los requerimientos de seguridad, se han planteado diferentes modelos que cumplan este propósito. Un ejemplo práctico de estos es el modelo en V (Figura 17), el cual describe una aproximación de diseño y pruebas.



**Figura 17. Modelo en V**

**Fuente: (Macdonald, 2004)**

Los requerimientos del software para el sistema instrumentado de seguridad a diseñar son los siguientes:

1. Requerimientos del software: El software que se utiliza deberá desconectar todos los elementos finales si se llega a producir cualquier evento peligroso en la zona de proceso y a su vez actuar todas las alarmas para diagnosticar que tipo de falla ha ocurrido.

2. Arquitectura del software: El software esta compuesto de un rutina con sus respectivas subrutinas, las cuales se van a encargar de activar el lazo de seguridad.
3. Programación: El lenguaje de programación está basado en C++ ya que este es simple y fácil de comprender en el momento de revisar el programa.
4. Integración: El sistema de seguridad no presentará interferencias debido a que en las instalaciones no hay sistemas de control de procesos adicionales.
5. Pruebas: Para comprobar el desempeño del programa de seguridad se debe realizar pruebas, esto quiere decir, evaluar todas las SIF y comprobar si desempeña la acción correcta.

**Tabla 28.****Etapas de desarrollo de un SIS (Requerimientos Funcionales)**

Desarrollo del HazOp
Desarrollo de capas de protección (LOPA)
Desarrollo de especificación de requerimientos de seguridad (SRS)
<b>Requerimientos funcionales</b>
Calculo de SIL y bloques de seguridad
Diseño del ciclo de vida

**Fuente:** (Garcín, 2007)

**Requerimientos Funcionales**

Anotamos o agregamos a una base de datos las características funcionales de los equipos del sistema que tengan mayor probabilidad de presentar fallas (En las Tablas 29, 30 y 31 se muestran los equipos más expuestos a fallas).

Cabe mencionar que la tasa de demanda de la función instrumentada de seguridad (SIF) la obtuvimos del valor de la tasa de fallas que ocurren en el equipo que se está seleccionando ya que la acción con la que es utilizada la función instrumentada de seguridad viene de la mano con la tasa de falla que ocurre en el equipo o sistema que se está analizando.

El nivel de integridad de seguridad (SIL) es establecido a criterio del diseñador, teniendo en cuenta que el nivel de integridad de seguridad está representado como 1 al nivel más bajo (es decir tienden a ser más expuestos a fallas) y 4 como el nivel más alto de protección que cuenta el equipo.

**Tabla 29.****Requerimientos funcionales**

<b>Fuente de Demanda:</b>	Falla bomba B1
<b>Descripción Funcional:</b>	Se debe respaldar al sistema en el momento que el flujo que pasa por la tubería L2 sea reducido.
<b>Estado seguro del proceso:</b>	Se debe apagar la bomba B1, en el momento que el flujo se empieza a reducir.
<b>Tasa de demanda de la SIF:</b>	0.014
<b>SIL determinado para la SIF:</b>	SIL1

**Nota:** La función protectora del SIF no interfiere en la continuidad del proceso, ni la de sus posibles riesgos, la SIF solo se enfoca en detectar los posibles riesgos que podrían provocar una catástrofe y ejecutar una acción de protección. Pero el lazo SIF no es un ente totalmente perfecto, puede fallar en su acción de proteger, permitiendo que el accidente se ejecute provocando destructivas consecuencias.

**Tabla 30.****Requerimientos Funcionales**

<b>Fuente de Demanda:</b>	<b>Falla bomba 2</b>
<b>Descripción Funcional:</b>	Se debe respaldar al sistema en el momento que el fluido circule por la tubería T3, sin ningún obstáculo en el camino.
<b>Estado seguro del proceso:</b>	Se debe apagar la bomba B2, en el momento que el flujo se empieza a reducir.
<b>Tasa de demanda de la SIF:</b>	0.014
<b>SIL determinado para la SIF:</b>	SIL1

**Tabla 31.****Requerimientos funcionales**

Fuente de Demanda:	<b>Controlador Lógico</b>
Descripción Funcional:	Se debe proteger al sistema cuando el tanque 2 alcance el nivel máximo de llenado. De esa forma se desconectará la bomba para que el fluido ya no ingrese al tanque
Estado seguro del proceso:	Al desconectar la bomba se evitará que el fluido ingrese al tanque y provoque un derrame.
Tasa de demanda de la SIF:	0.15
SIL determinado para la SIF:	SIL2

**Tabla 32.****Etapas de desarrollo de un SIS (SIL y bloques de seguridad)**

Desarrollo del HazOp
Desarrollo de capas de protección (LOPA)
Desarrollo de especificación de requerimientos de seguridad (SRS)
Requerimientos funcionales
<b>Calculo de SIL y bloques de seguridad</b>
Diseño del ciclo de vida

**Fuente:** (Garcín, 2007)

**Cálculo de los elementos de seguridad**

El paso principal es obtener el valor de la tasa de fallas para cada equipo que se está analizando, como anteriormente se explicó no existe un registro histórico de la tasa de fallas ya que el proyecto está en construcción (esto quiere decir que estamos en la etapa de mortalidad infantil de la curva de la bañera). Por lo tanto nos basamos en el uso de base de datos genéricos, los datos de nuestro proyecto lo tomamos del libro “Offshore Reliability Data” (OREDA, 2002). Para este caso usamos la tabla del Manual de Equipos de OREDA donde se organiza a los equipos en cuatro sistemas principales y cada sistema se divide en clases como se muestra en la Tabla 33.

Los equipos están divididos de acuerdo a sus características técnicas y tipo de servicio que briden, por ejemplo los motores eléctricos se dividen en motor de corriente alterna y de corriente continua, después cada subsistema se divide en las partes que componen cada tipo de motor como sistema estator, sistema de rotor, etc. Hasta llegar al nivel de jerarquía más baja y además se señalan las partes donde requieren mantenimiento, como sellos, pernos, etc.

**Tabla 33.****Manual de equipos OREDA**

<b>Sistema</b>	<b>Clase</b>	<b>Unidades</b>
<b>1. Maquinaria</b>	1.1 Compresores	131
	1.2 Turbinas de gas	88
	1.3 Bombas	212
	1.4 Motor de combustión	98
	1.5 Turboexpansores	10
<b>2. Equipos Eléctricos</b>	2.1 Generadores eléctricos	32
	2.2 Motores eléctricos	143
<b>3. Equipos Mecánicos</b>	3.1 intercambiadores	21
	3.2 Vessels	198
	3.3 Calentadores y calderas	12
<b>4. Otros</b>	4.1 Detectores de fuego y gas	918
	4.2 Sensores de procesos	69
	4.3 Unidades de control lógico	10
	4.4 Válvulas	907

**Fuente:** (OREDA, 2002)

La Tabla 34 muestra los resultados obtenidos al determinar la probabilidad de falla a la demanda del equipo seleccionado. Para este caso el porcentaje de cobertura de diagnósticos (DC) se establece en 70%, porque se considera que la frecuencia de prueba de diagnóstico es baja, además se utilizan las ecuaciones [8], [9], [10], [11] y [12] respectivamente. Y las ecuaciones [13] y [14] en los casos especiales donde existen dos o mas elementos que puedan fallar.

### Sensor de nivel 1001 (Probabilidad que falle uno de uno)

En este caso va a fallar uno de un sensor (por su nomenclatura 1001)

**Tabla 34.**

**Tabla de resultados. Sensor de nivel 1001**

<b>Cálculo de elementos de seguridad</b>	<b>Valor</b>
<b>MTTR (Tiempo medido para reparación)</b>	8 horas
<b>CD (Cobertura de diagnóstico)</b>	70%
<b>T1</b>	6 meses (3420 horas)
<b><math>\lambda_T</math> (Tasa de fallas)</b>	$1.59 \times 10^{-6} / \text{hora}$
<b><math>\lambda_S</math> (Tasa de falla segura)</b>	$0.79 \times 10^{-6} / \text{hora}$
<b><math>\lambda_D</math> (Tasa de falla peligrosa)</b>	$0.79 \times 10^{-6} / \text{hora}$
<b><math>\lambda_{dd}</math> (Tasa de falla peligrosa detectada)</b>	$1.114 \times 10^{-7}$
<b><math>\lambda_{du}</math> (Tasa de falla peligrosa no detectada)</b>	$2.65 \times 10^{-7}$
<b>SFF (Fracción de falla segura)</b>	56%
<b>Tiempo medio de detención en el subsistema</b>	1473 seg
<b><math>PFD_{AV}</math> (Probabilidad de falla a la demanda)</b>	0.0011

Los cálculos que se realizan para determinar el número de elementos de seguridad se muestran a continuación de acuerdo a sus fórmulas propuestas, el objetivo final de este análisis numérico es determinar la probabilidad de falla hacia la demanda, para este caso la demanda es la probabilidad de que falle uno de los dos sensores de nivel.

**Datos**

MTTR = 8 hrs.

$CD = 70\%$

$T1 = 1 \text{ año (8760 hrs.)}$

$\lambda_T = 1.59 \times 10^{-6} / \text{hora}$

$\lambda_S = \lambda_T \times 0.5 = 0.79 \times 10^{-6} / \text{hora}$

$\lambda_D = \lambda_T \times 0.5 = 0.79 \times 10^{-6} / \text{hora}$

$\lambda_{dd} = \frac{\lambda_T}{2 \times DC} = 1.114 \times 10^{-7}$

$\lambda_{du} = \frac{\lambda_T}{2 \times (1-DC)} = 2.65 \times 10^{-7}$

**Tasa de fallas peligrosas:**

$$\lambda_D = \lambda_{dd} + \lambda_{du} = 1.114 \times 10^{-7} + 2.65 \times 10^{-7} = 0.79 \times 10^{-6}$$

**Fracción de falla Segura:**

$$SFF = \frac{\lambda_S + \lambda_{dd}}{\lambda_T}$$

$$SFF = \frac{0.79 \times 10^{-6} + 1.114 \times 10^{-7}}{1.59 \times 10^{-6}} = 0.56$$

$$SFF = 56\%$$

**Tiempo medio de para en el subsistema:**

$$t_{CE} = \frac{\lambda_{du}}{\lambda_D} \left( \frac{T1}{\lambda_D} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{dd}}{\lambda_D} MTTR$$

$$t_{CE} = \frac{2.65 \times 10^{-7}}{0.79 \times 10^{-6}} \left( \frac{8760}{2} + 8 \right) + \frac{1.114 \times 10^{-7}}{0.79 \times 10^{-6}} \times 8 = 1473.05$$

$$t_{CE} = 1473$$

**Probabilidad de falla a la demanda:**

$$PFD_{AV} = (\lambda_{dd} + \lambda_{du}) t_{CE}$$

$$PFD_{AV} = (1.114 \times 10^{-7} + 2.65 \times 10^{-7}) 1473$$

$$PFD_{AV} = 0.0011$$

**Sensor de nivel 2oo2 (Probabilidad de que falle dos de dos)**

Por su nomenclatura se supone que va a fallar uno de dos sensores.

**Tabla 35.**

**Tabla de resultados. Sensor de nivel 2oo2**

<b>Cálculo de elementos de seguridad</b>	<b>Valor</b>
<b>MTTR (Tiempo medido para reparación)</b>	8 horas
<b>CD (Cobertura de diagnóstico)</b>	70%
<b>T1</b>	6 meses (3420 horas)
<b><math>\beta</math> (Factor de causa común para fallas no detectadas)</b>	20%
<b><math>\beta_D</math> (Factor de causa para fallas detectadas)</b>	20%
<b><math>\lambda_T</math> (Tasa de fallas)</b>	$1.59 \times 10^{-6} / \text{hora}$
<b><math>\lambda_S</math> (Tasa de falla segura)</b>	$0.79 \times 10^{-6} / \text{hora}$
<b><math>\lambda_D</math> (Tasa de falla peligrosa)</b>	$0.79 \times 10^{-6} / \text{hora}$
<b><math>\lambda_{dd}</math> (Tasa de falla peligrosa detectada)</b>	$1.114 \times 10^{-7}$
<b><math>\lambda_{du}</math> (Tasa de falla peligrosa no detectada)</b>	$2.65 \times 10^{-7}$
<b>SFF (Fracción de falla segura)</b>	56%
<b>Tiempo medio de detención en el subsistema</b>	1473 seg
<b><math>PFD_{AV}</math> (Probabilidad de falla a la demanda)</b>	0.0021

Para este caso los cálculos de probabilidad de falla a la demanda prevé que ocurra un desastre doble, es decir, que los dos sensores de nivel fallen provocando el colapso del sistema, el tiempo de espera de la falla y la probabilidad de falla a la demanda se las obtiene con dos nuevas ecuaciones por la singularidad del caso.

**Datos**

MTTR = 8 hrs.

$CD = 70\%$

$T1 = 1 \text{ año (8760 hrs.)}$

$\beta = 20\%$

$\beta_D = 20\%$

$\lambda_T = 1.59 \times 10^{-6} / \text{hora}$

$\lambda_S = \lambda_T \times 0.5 = 0.79 \times 10^{-6} / \text{hora}$

$\lambda_D = \lambda_T \times 0.5 = 0.79 \times 10^{-6} / \text{hora}$

$\lambda_{dd} = \frac{\lambda_T}{2 \times DC} = 1.114 \times 10^{-7}$

$\lambda_{du} = \frac{\lambda_T}{2 \times (1-DC)} = 2.65 \times 10^{-7}$

**Tasa de fallas peligrosas:**

$$\lambda_D = \lambda_{dd} + \lambda_{du} = 1.114 \times 10^{-7} + 2.65 \times 10^{-7} = 0.79 \times 10^{-6}$$

**Fracción de falla Segura:**

$$SFF = \frac{\lambda_S + \lambda_{dd}}{\lambda_T}$$

$$SFF = \frac{0.79 \times 10^{-6} + 1.114 \times 10^{-7}}{1.59 \times 10^{-6}} = 0.56$$

$$SFF = 56\%$$

**Tiempo medio de para en el subsistema:**

$$t_{CE} = \frac{\lambda_{du}}{\lambda_D} \left( \frac{T1}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{dd}}{\lambda_D} MTTR$$

$$t_{CE} = \frac{2.65 \times 10^{-7}}{0.79 \times 10^{-6}} \left( \frac{8760}{2} + 8 \right) + \frac{1.114 \times 10^{-7}}{0.79 \times 10^{-6}} \times 8 = 1473.05$$

$$t_{CE} = 1473$$

$$t_{GE} = \frac{\lambda_{du}}{\lambda_D} \left( \frac{T1}{3} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{dd}}{\lambda_D} MTTR$$

$$t_{GE} = \frac{2.65 \times 10^{-7}}{0.79 \times 10^{-6}} \left( \frac{8760}{3} + 8 \right) + \frac{1.114 \times 10^{-7}}{0.79 \times 10^{-6}} \times 8 = 983.30$$

$$t_{GE} = 983$$

**Probabilidad de falla a la demanda:**

$$PFD_{AV} = 2 * [(1 - \beta_D) * \lambda_{DD} + (1 - \beta) * \lambda_{DU}]^2 * t_{CE} * t_{GE} + (\beta_D * \lambda_{DD} * MTTR) + \beta * \lambda_{DU} * \left(\frac{T1}{2} + MTTR\right)$$

$$PFD_{AV} = 2 * [(1 - 0.2) * 1.114x10^{-7} + (1 - 0.2) * 2.65x10^{-7}]^2 * 1473 * 983 + (0.2 * 1.114x10^{-7} * 8) + 0.2 * 2.65x10^{-7} * \left(\frac{8760}{2} + 8\right)$$

$$PFD_{AV} = 0.0021$$

**Controlador de seguridad 1oo1 (Probabilidad que falle uno de uno)**

El escogido es la tarjeta Raspberry como interfaz HMI y la tarjeta Arduino como controlador, con los cuales se obtuvieron los siguientes resultados.

**Tabla 36.**

**Tabla de resultados. Controlador de seguridad 1oo1**

<b>Cálculo de elementos de seguridad</b>	<b>Valor</b>
<b>MTTR (Tiempo medido para reparación)</b>	8 horas
<b>CD (Cobertura de diagnóstico)</b>	70%
<b>T1</b>	6 meses (3420 horas)
<b><math>\lambda_T</math> (Tasa de fallas)</b>	$0.011x10^{-3}$ /hora
<b><math>\lambda_S</math> (Tasa de falla segura)</b>	$5.70x10^{-6}$ /hora
<b><math>\lambda_D</math> (Tasa de falla peligrosa)</b>	$5.70x10^{-6}$ /hora
<b><math>\lambda_{dd}</math> (Tasa de falla peligrosa detectada)</b>	$7.85x10^{-6}$
<b><math>\lambda_{du}</math> (Tasa de falla peligrosa no detetada)</b>	$18.33x10^{-6}$
<b>SFF (Fracción de falla segura)</b>	68%
<b>Tiempo medio de detención en el subsistema</b>	14121.90 seg
<b><math>PFD_{AV}</math> (Probabilidad de falla a la demanda)</b>	0.037

**Datos**

MTTR = 8 hrs.

$T1 = 1 \text{ año (8760 hrs.)}$

$\lambda_T = 0.011 \times 10^{-3} / \text{hora}$

$\lambda_S = 5.70 \times 10^{-6} / \text{hora}$

$\lambda_D = 5.70 \times 10^{-6} / \text{hora}$

$\lambda_{dd} = 7.85 \times 10^{-6}$

$\lambda_{du} = 18.33 \times 10^{-6}$

**Fracción de falla Segura:**

$$SFF = \frac{\lambda_S + \lambda_{dd}}{\lambda_T}$$

$$SFF = \frac{5.70 \times 10^{-6} + 7.85 \times 10^{-6}}{0.011 \times 10^{-3}}$$

$$SFF = 68\%$$

**Tiempo medio de para en el subsistema:**

$$t_{CE} = \frac{\lambda_{du}}{\lambda_D} \left( \frac{T1}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{dd}}{\lambda_D} MTTR$$

$$t_{CE} = \frac{18.33 \times 10^{-6}}{5.70 \times 10^{-6}} \left( \frac{8760}{2} + 8 \right) + \frac{7.85 \times 10^{-6}}{5.70 \times 10^{-6}} * 8$$

$$t_{CE} = 14121.90$$

**Probabilidad de falla a la demanda:**

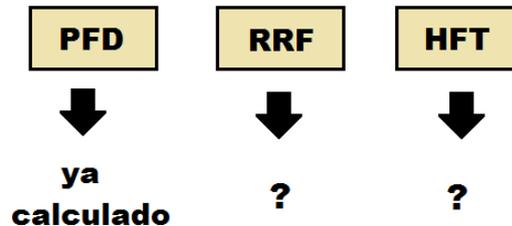
$$PFD_{AV} = (\lambda_{dd} + \lambda_{du}) t_{CE}$$

$$PFD_{AV} = (7.85 \times 10^{-6} + 18.33 \times 10^{-6}) * 14121.90$$

$$PFD_{AV} = 0.37$$

## Determinación del factor de reducción de riesgo (RRF) y la tolerancia de falla del software (HFT)

Para obtener los resultados es necesario conocer las incógnitas a resolver, la cuales se muestran a continuación.



**Figura 18. Incógnitas a resolver en el análisis**

Para asignar el valor al nivel de integridad de seguridad (SIL), se estima el criterio del personal de diseño (explicado anteriormente), con el cual se asigna un valor de SIL 1 para los elementos de control y un nivel SIL 2 para el controlador lógico.

El valor del factor de reducción de riesgo (RRF) se lo obtiene mediante la fórmula:

$$RRF = \frac{1}{PFD} \quad [16]$$

Donde el valor de la probabilidad de falla en la demanda (PFD) se lo obtuvo anteriormente.

Para el valor de la tolerancia de falla del hardware (HFT) es necesario basarse en la norma IEC 61511 la cual establece que tanto para el solucionador lógico como para los sensores y elementos finales la tolerancia de falla del hardware (HFT) es obtenida según la Tabla 37 y la Tabla 38 respectivamente.

**Tabla 37.****Tolerancia a fallas para solucionador lógico**

<b>Solucionador Lógico</b>			
<b>SIL</b>	<b>HFT</b>		
	<b>SFF &lt; 60%</b>	<b>SFF 60% a 90%</b>	<b>SFF &gt; 90%</b>
<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
<b>3</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>

**Fuente: (Grunh, 2006)**

La asignación de la tolerancia de falla del hardware (HFT) para el solucionador lógico se la toma analizando el valor de fracción de falla segura (SFF), pudiendo ser menor al 60%, entre 60-90% o mayor a un 90%, de acuerdo al valor del nivel de integridad de seguridad (SIL) que se estableció anteriormente, en nuestro caso el solucionador lógico tiene una tolerancia de falla del hardware (HFT) de 1, lo cual cumple con los parámetros de seguridad estable, esto quiere decir que el porcentaje de fallas que pueden ocurrir en este elemento es medio.

**Tabla 38.****Tolerancia a fallas para sensores y elementos finales**

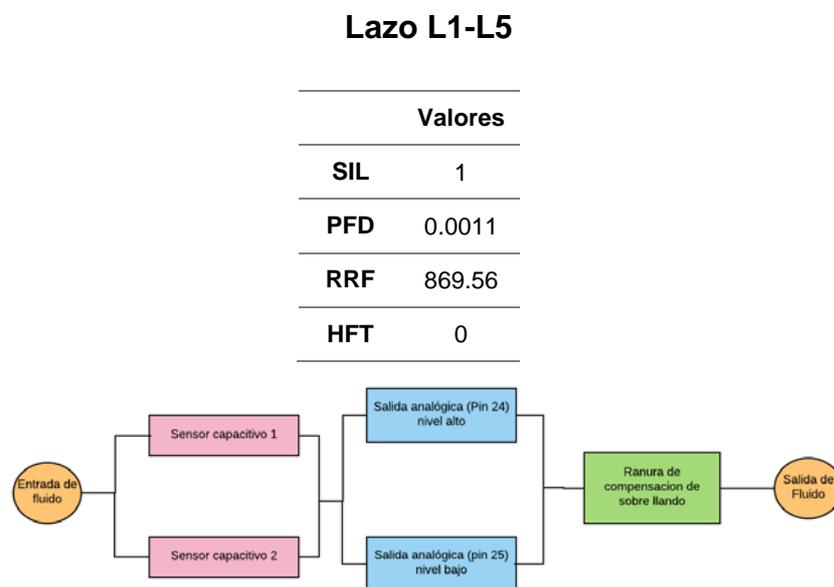
<b>Sensores y Elementos finales</b>	
<b>SIL</b>	<b>HFT</b>
<b>1</b>	<b>0</b>
<b>2</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>2</b>

Del mismo modo se asigna un valor para la tolerancia de falla en el hardware (HFT) en función al nivel de integridad de seguridad (SIL). Para nuestro caso el valor de HFT es de cero, esto quiere decir, los elementos finales del sistema son robustos, lo cual explica un incremento en su seguridad funcional.

### Diagrama para los lazos de seguridad del sistema.

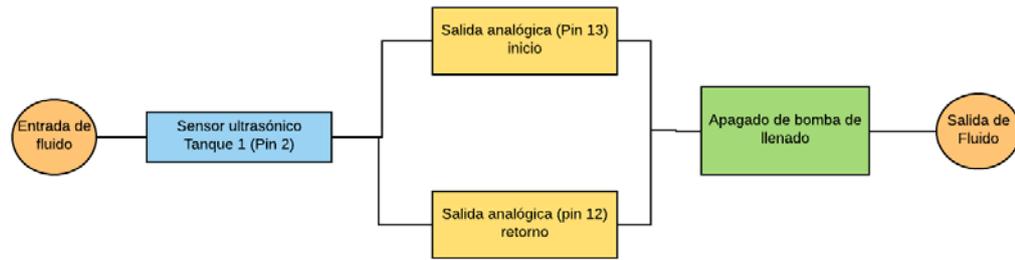
Con los datos obtenidos, el siguiente paso es realizar los diagramas de los lazos de seguridad en cada subsistema para brindar una reducción del riesgo total de fallas, existe el caso de que un mejor servicio de seguridad lo pueda dar un instrumento análogo, como una válvula de escape o switches de paro de emergencia.

**Nota:** Los lazos del sistema (L1, L2, L3, L4 y L5) esta representados en la Figura 16, al inicio del diseño en la etapa de HazOp.



**Figura 19. Diagrama de bloques lazo 1-1**

El diagrama representa el lazo de seguridad que se aporta al tanque de almacenamiento primario utilizando sensores capacitivos para el control de nivel, la salidas analógicas mandan una señal a la unidad lógica pero en este caso su respuesta de seguridad no es representada por la acción lógica, en cambio el sistema se mantiene seguro por la ranura de compensación de sobre llenado, la cual tiene como función mantener el tanque a un nivel estable, en caso que fallen los sensores, la ranura actúa desplazando al fluido hacia el otro tanque así evitando fallas más severas (el diseño de la ranura de compensación de sobrelenado está en la sección del diseño mecánico).

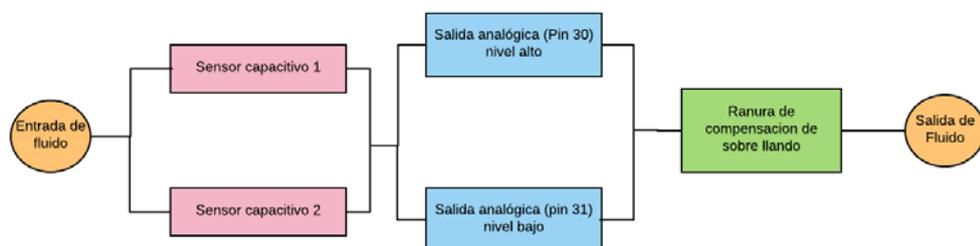


**Figura 20. Diagrama de bloques lazo 1-2**

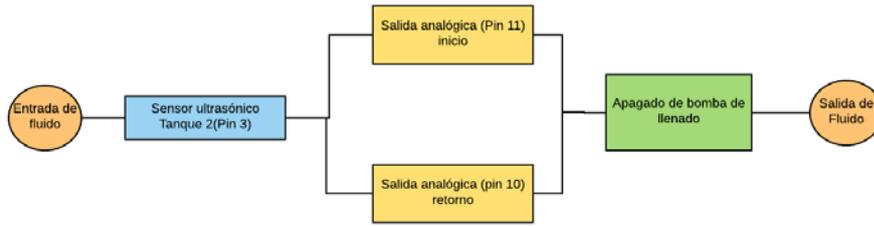
El sistema cuenta con varios dispositivos de medición del nivel, en el caso anterior se utilizaba sensores capacitivos para brindar seguridad, además se adjunta un sensor ultrasónico el cual tiene dos salidas analógicas que indican el estado del nivel del fluido, en caso de alguna falla en el instrumento se envía una señal a la unidad de seguridad lógica el cual desactiva la bomba de llenado, para evitar consecuencias mas graves en el proceso, cabe recalcar que en este subsistema también actúa la ranura de sobrellenado, pero no forma parte de nuestro lazo de seguridad del subsistema.

### Lazo L3

Valores	
<b>SIL</b>	1
<b>PFD</b>	0.0021
<b>RRF</b>	476.19
<b>HFT</b>	0



**Figura 21. Diagrama de bloques lazo 3-1**

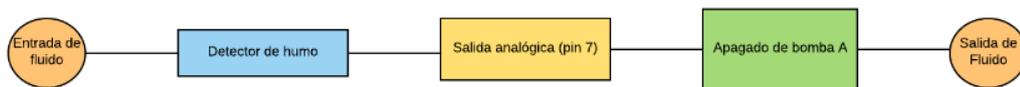


**Figura 22. Diagrama de bloques lazo 3-2**

Los diagramas son similares a los mostrados anteriormente pertenecientes al tanque de llenado principal, para el caso del tanque de llenado secundario también se considera como instrumento de seguridad la ranura para compensación de sobre llenado por lo tanto el diseño mecánico del sistema en general debe cumplir este requerimiento (ver diseño mecánico del sistema) .

**Lazo L2**

Valores	
<b>SIL</b>	2
<b>PFD</b>	0.37
<b>RRF</b>	2.70
<b>HFT</b>	1

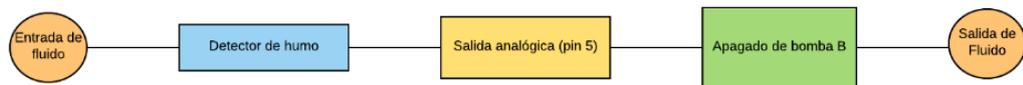


**Figura 23. Diagrama de bloques lazo 2**

El diagrama representa la seguridad funcional que se instala en la zona de bombas, un detector de humo censa que la zona de bombas este libre peligro de incendio, en el caso de una evento peligroso manda señales eléctricas a un indicador programable de programación externa, analizando el correcto funcionamiento del sistema para dar pasó al funcionamiento o desconexión de la bomba B1.

### Lazo L4 - L5

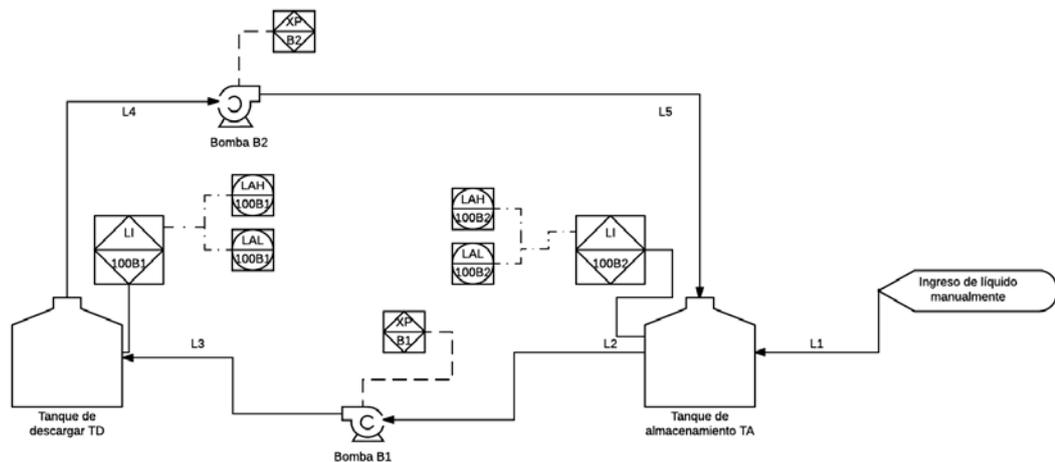
Valores	
<b>SIL</b>	2
<b>PFD</b>	0.37
<b>RRF</b>	2.70
<b>HFT</b>	1



**Figura 24. Diagrama de bloques lazo 4-5**

Es muy similar al diagrama anterior en su secuencia de seguridad pero con la diferencia que su salida controla el funcionamiento de la bomba B2.

Con los cálculos de los lazos de seguridad previamente realizados y con la HFT determinada, se realizó el diagrama del sistema con toda la instrumentación necesaria para que el sistema instrumentado de seguridad (SIS) desempeñe la función deseada.



**Figura 25. Esquema final del sistema con SIS**

Tabla 39.

**Etapas de desarrollo de un SIS (Ciclo de Vida)**

<b>Desarrollo del HazOp</b>
<b>Desarrollo de capas de protección (LOPA)</b>
<b>Desarrollo de especificación de requerimientos de seguridad (SRS)</b>
<b>Requerimientos funcionales</b>
<b>Calculo de SIL y bloques de seguridad</b>
<b>Diseño del ciclo de vida</b>

Fuente: (Garcín, 2007)

**Ciclo de vida del SIS**

El ciclo de vida de un sistema se divide en doce etapas con el objetivo de lograr una seguridad integral en el funcionamiento de todo el proceso, en la Tabla 40 se muestran las etapas completadas de acuerdo al diseño del sistema instrumentado de seguridad.

Tabla 40.

**Etapas cumplidas en el SIS**

<b>Etapas del ciclo de vida</b>	
<b>Diseño conceptual de proceso</b>	El proceso se basa en el control de nivel de un micro planta de nivel implementada en el laboratorio de PLC, el sistema se encuentra desnudo, esto quiere decir que no existe seguridad que lo proteja de fallas.
<b>Posible riesgos y peligros</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desbordamiento del fluido en los tanques de almacenamiento</li> <li>- Fallas en las bombas para la circulación del fluido</li> </ul>
<b>Capas de protección no SIS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proceso</li> <li>- Sistemas de control básico de procesos (BPCS)</li> <li>- Alarma e interpretación del operador</li> </ul>

**CONTINUA →**

<b>Determinación del SIL objetivo</b>	<b>Falla bomba 1</b>	<b>Falla Bomba 2</b>	<b>Controlador</b>		
	<b>SIF = 0.014</b>	SIF= 0.014	SIF=0.015		
	<b>Nivel SIL= 1</b>	Nivel SIL= 1	Nivel SIL = 2		
<b>Requerimientos de seguridad</b>	Se usa un lenguaje de programación basado en C++. Utilización de la tarjeta Arduino para el control del proceso y la tarjeta Raspberry para el interfaz HMI				
<b>Diseño conceptual del SIS</b>		<b>SIL</b>	<b>PDF</b>	<b>RRF</b>	<b>HFT</b>
	<b>Lazo 1</b>	1	0.00011	869.56	0
	<b>Lazo 2</b>	1	0.0021	476.19	0
	<b>Lazo 3</b>	2	0.37	2.70	1
	<b>Lazo 4</b>	2	0.37	2.70	1
<b>Diseño detallado del SIS</b>	<p>Métodos de instalación según las exigencias del cliente.</p> <p>Materiales: Acrílico</p> <p>Facilidad de operación: Programación sencilla</p> <p>Seguridad: Robustez en el diseño</p> <p>Peso: Liviano</p>				

Las etapas restantes (instalación, pruebas, modificaciones y desmantelamiento) se analizarán posteriormente.

## Instalación

**Tabla 41.**

### **Etapa de instalación del sistema**

<b>Requerimientos</b>	
<p><b>El SIS será puesto en funcionamiento de acuerdo a la conformidad de la planificación para su validación final. Las actividades de funcionamiento no deberán limitarse a los siguientes ítems.</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puesta a tierra conectada correctamente.</li> <li>• Fuentes de energía conectadas correctamente y en funcionamiento</li> <li>• Paradas de transporte y materiales de embalaje hayan sido retirados.</li> <li>• Ningún daño físico presente.</li> <li>• Todos los instrumentos han sido debidamente calibrados.</li> <li>• Todos los dispositivos de campo están en funcionamiento.</li> <li>• Solucionador lógico, entrada y salida operativo.</li> </ul>

La Tabla 41 muestra los requerimientos que debe tener el sistema para su instalación, y así poner al sistema instrumentado de seguridad (SIS) en servicio activo de manera que este listo para su validación final.

Un correcto registro del funcionamiento del SIS debería realizarse, de acuerdo a los resultados tomados en las pruebas, si los objetivos y el criterio en la fase de diseño son alcanzados. Si existe una falla, deberán ser registrada las razones que la originaron.

## Operación y Mantenimiento del SIS

**Tabla 42.**

### Etapa de mantenimiento del sistema

Requerimientos	
<p><b>La planificación de la operación y el mantenimiento del sistema instrumentado de seguridad proveerá lo siguiente:</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Actividades de rutina y operación anormal.</li> <li>• Actividades de pruebas, mantenimiento preventivo y correctivo</li> <li>• Verificación del cumplimiento de los procedimientos de operación y mantenimiento.</li> </ul>

De acuerdo a la Tabla 42 los requerimientos de la etapa de mantenimiento y operación del sistema deben cumplir como primer objetivo, el mantener al sistema instrumentado de seguridad (SIS) estable manteniendo su seguridad funcional, también se debe asegurar que los niveles de integridad de seguridad (SIL) de cada función instrumentada de seguridad (SIF) se mantengan durante la operación y mantenimiento.

Cabe mencionar que los procedimientos de operación y mantenimiento serán desarrollados de acuerdo con la planificación de seguridad relevante y proveerán las acciones y restricciones que son necesarias para prevenir un estado inseguro y/o reducir las consecuencias de un evento peligroso durante la operación o mantenimiento (por ejemplo, cuando un sistema necesita ser anulado para pruebas o mantenimiento, que pasos adicionales de mitigación serán implementados).

## Desinstalación

**Tabla 43.**

### Etapa de desinstalación

Requerimientos	
<p><b>Se llevará a cabo un análisis del impacto en la seguridad funcional como resultado de la actividad de desmantelamiento:</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La seguridad funcional durante la ejecución de las actividades de desinstalación.</li> <li>• El impacto de la puesta fuera de servicio de un SIS vinculado a la seguridad en las unidades operativas adyacentes y servicios de la infraestructura.</li> </ul>

De acuerdo a la Tabla 43 la etapa de desinstalación del sistema tiene como objetivo principal llevar a cabo una revisión adecuada del proceso para obtener luego la autorización requerida en el desmantelamiento, tomando las medidas de seguridad adecuadas antes de actuar sobre un proceso del sistema, evitando fallas involuntarias o fallas sin forzamiento.

Los diferentes checklist desarrollados para las etapas antes mencionadas se muestran en el Anexo I.

## Diseño mecánico del proyecto

**Tabla 44.**

### Requerimientos de diseño

<b>Situación Inicial</b>	<b>Diseñar un prototipo de planta de nivel</b>
<b>Situación Final</b>	Existe la necesidad de diseñar un prototipo de planta de nivel para ser aplicado a un Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS)
<b>Estado de la Ciencia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño de elementos de máquinas</li> <li>• Resistencia de materiales</li> <li>• Software ANSYS</li> </ul>

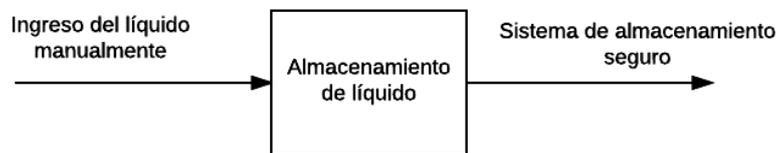
La Tabla 44 muestra el objetivo principal del diseño (también se puede llamar “situación inicial”), el siguiente punto es la justificando de la propuesta con una necesidad social (la sociedad la integran los diseñadores y la institución en la que se aloja el prototipo). Los conocimientos previos para el diseño deben marcarse en el último cuadro (se muestra como “Estado de la Ciencia”), el cual analiza aspectos del área de Mecánica ya que el diseño del tanque es totalmente ligado a esa área de estudio.

### Casa de calidad

Definido las exigencias del cliente (los autores del diseño) junto con las capacidades que muestra el mercado industrial a disposición de los investigadores. Se determina que el grado de dificultad del diseño es bajo, ya que sencillamente se necesita que el equipo soporte una caída de 2 metros de altura, que su diseño sea compacto y agradable con el usuario, que sea de uso didáctico, además el prototipo debe cumplir con un entorno compatible para proyectos de investigación, el esquema desarrollado en función a estos objetivos se muestra en el Anexo D.

### Diagrama Funcional.

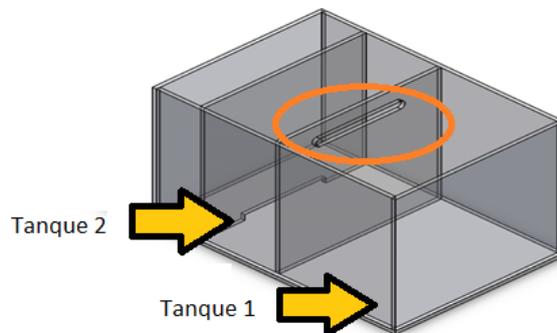
El esquema que se muestra en la Figura 26, representa las características funcionales que va a tener nuestro diseño; en primer lugar se describe el ingreso del líquido el cual será de manera manual hacia el tanque, para luego empezar con la descarga hacia el otro tanque, para nuevamente retornar al tanque inicial por acción de las bombas y así repetidamente, el objetivo principal del diseño del tanque es que mantenga el líquido encerrado sin que exista derrames o fugas. De esa manera cumple los requisitos de seguridad que se manejan como tema principal en el diseño de este prototipo.



**Figura 26. Diagrama funcional del prototipo**

### Estudio de Entorno (DFE)

Su entorno será seguro para el prototipo y los operadores, se ha pensado en la posibilidad de que ocurra un derrame del líquido en cualquiera de los dos tanques de almacenamiento por lo cual se implementó una salida rápida y eficiente con el diseño estructural como se representa en la Figura 27.



**Figura 27. Estudio del entorno**

En la figura anterior, con un círculo naranja se indica el accesorio de seguridad que tiene el prototipo para evitar que derrame el líquido al momento del llenado en cualquier de los tanques de almacenamiento, lo que hace simplemente esa ranura es dejar pasar el fluido de un tanque a otro, teniendo en cuenta la posibilidad de que el sistema de seguridad falle. A criterio se define como una seguridad “analógica” ya que no cuenta con ningún dispositivos digital que cumpla el rol de seguridad. Además el sistema está diseñado para que cumpla requerimientos de ergonomía y sea amigable con el usuario.

### **Diseño para la fabricación (DFM)**

En la fabricación tomamos en cuenta las características exigidas por el cliente como muestra la Tabla 45.

**Tabla 45.**

#### **Exigencias del cliente**

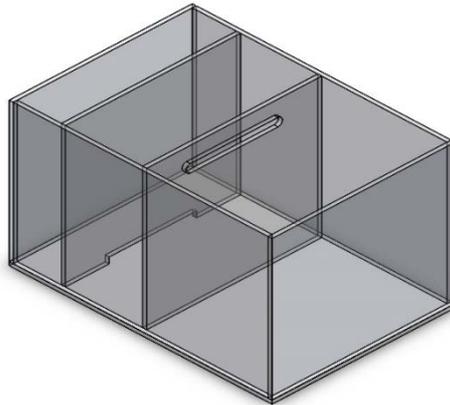
<b>Condiciones de exigencias del cliente</b>	
<b>Materiales</b>	El acrílico permite observar en tiempo real el funcionamiento del prototipo además es resistente y liviano
<b>Facilidad de operación</b>	La programación del controlador es sencilla y cumple las necesidades de seguridad. El prototipo puede ser operado por una persona
<b>Seguridad</b>	Su “robustez” es vinculada con el impacto que puede tener en cualquier situación peligrosa
<b>Peso</b>	Ligero, ideal para transportar manualmente de un lugar a otro

### **Diseño de ensamblaje (DFA)**

El ensamblaje fue manual, porque su estructura es poco compleja, recalcando que su costo es bajo pero eficiente.

### **Aplicación del método de elementos finitos en el diseño.**

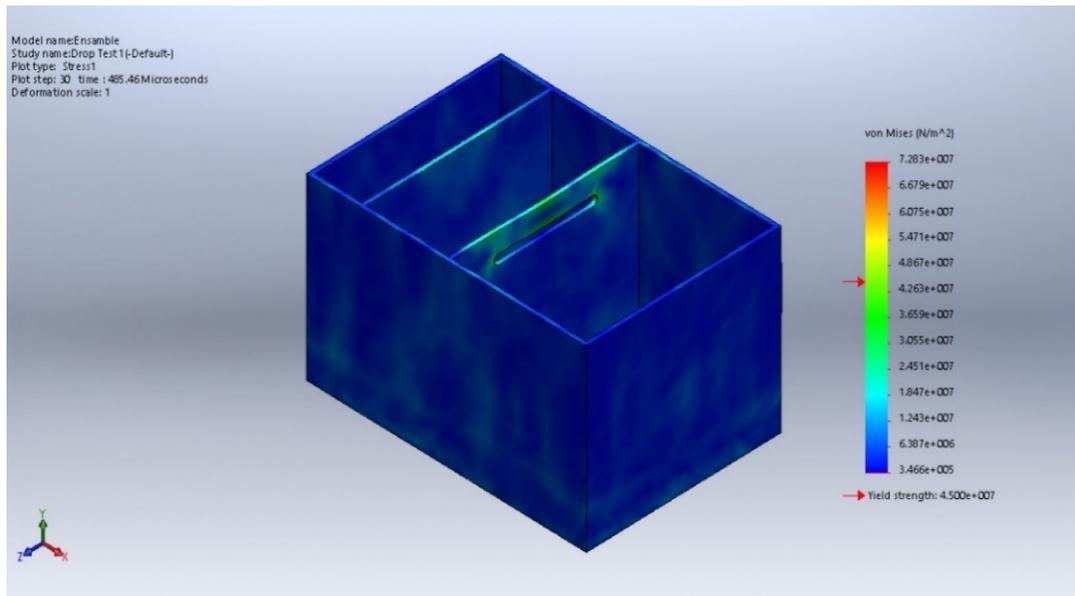
Con ayuda de herramientas informáticas (Software) se simula el impacto de una caída que podría sufrir nuestro prototipo, como prueba final para aprobar el diseño del mismo. Para obtener información del modelo desarrollamos el dibujo en el software con las medidas exactas como se muestra en la Figura 28.



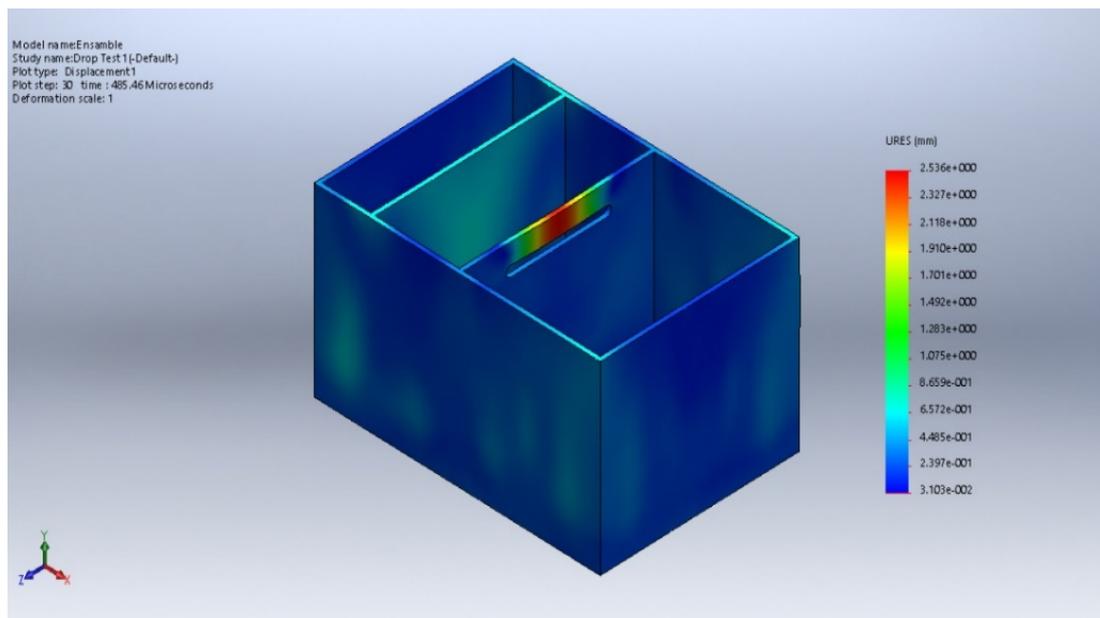
**Figura 28. Dibujo del prototipo**

De acuerdo al estudio de las propiedades mecánicas y asegurando el correcto diseño, se simula la caída del prototipo a una distancia de dos metros de altura, el software calcula el tiempo de caída (485.7 micro segundos) y empieza a realizar la malla correspondiente para la simulación de impacto

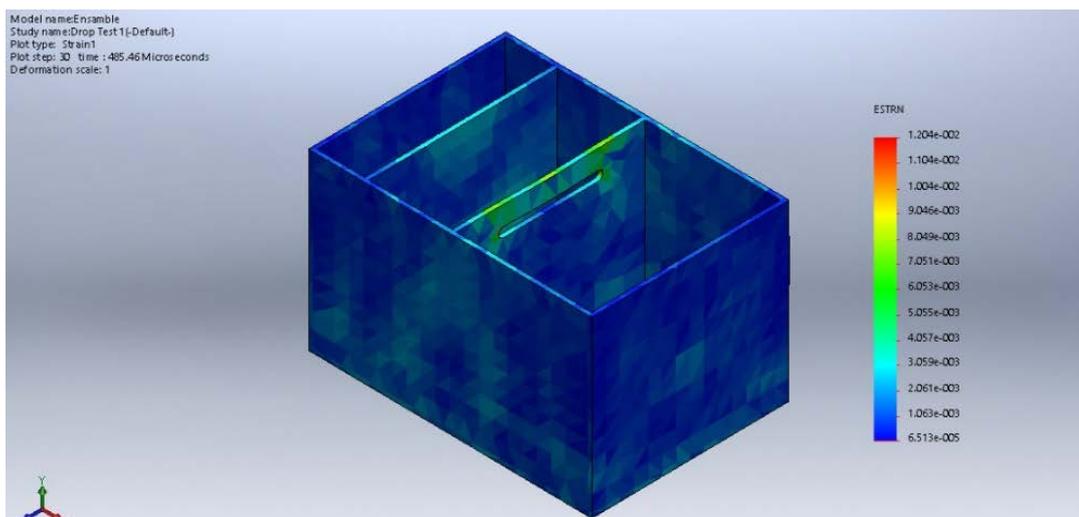
Los resultados de estudios indican el estrés que ocasiona la caída, el desplazamiento, la deformación que sufre el material al caer, y además la tensión provocada debido al impacto, todas las condiciones de estudio mencionadas se muestran en las figuras 29, 30 y 31 respectivamente.



**Figura 29. Estrés de Von Mises**



**Figura 30. Esfuerzo de desplazamiento**



**Figura 31. Esfuerzo de tensión**

La Figura 29, Figura 30 y la Figura 31 muestran los esfuerzos cortantes que sufre el prototipo a causa de una caída libre de 2 metros de altura (dato exigido por el cliente), su representación analiza las zonas más débiles de acuerdo a la caída con color rojo y las más fuertes con un color azul, en conclusión nuestro diseño es aprobado ya que no da ningún índice de daño al momento de la caída, cabe recalcar que se analizó al diseño sin ningún líquido o fluido dentro de el.

**Tabla 46.**

**Resultados de esfuerzos**

Name	Type	Min	Max
<b>Estrés 1</b>	VON: von Mises Stress	346606	7.283e+007
		Nodo: 15474	Nodo: 5551
<b>Tensión1</b>	ESTRN: Equivalent Strain	6.51294e-005	0.0120403
		Element: 7788	Element: 3520
<b>Desplazamiento1</b>	URES: Resultant Displacement	0310258 mm Node: 85	2.53569 mm Node: 6121

De acuerdo a la escala de colores (límites de color rojo puntos de quiebre y de color azul puntos seguros) y la tabla de esfuerzos máximos obtenida se llega a la conclusión que el prototipo ha superado satisfactoriamente las pruebas de esfuerzos a las que ha sido sometido, cumpliendo con las expectativas de diseño y permitiendo seguir con los procedimientos de diseño siguientes.

### **Factor de seguridad**

Usando la ecuación [15] para obtener el factor de seguridad, necesitamos la resistencia del material (acrílico), para esto tomamos los datos del fabricante, el cual nos proporciona las propiedades mecánicas del material y entre ellas la resistencia a la rotura para una extrusión de alto impacto; la resistencia de diseño se la determinó gracias al uso del método de elementos finitos (el valor usado es la tensión de Von Mises mostrado en la Tabla 46).

$$N = \frac{37854270 \text{ N/m}^2}{7.28 \times 10^7 \text{ N/m}^2}$$

$$N = 0.51 \approx 1$$

$$N = 1$$

El resultado se justifica porque el componente a diseñar no es grande en su dimensión, además su costo de instalación es bajo; todo esto tiene relevancia porque el objetivo principal del componente es almacenar líquido y evitar que se derrame, las desventajas de tener un factor de diseño bajo es su vulnerabilidad a factores externos (temblores, corrosión, entre otros), pero al saber que el espacio físico donde va a ser instalado es el laboratorio de PLC's de la Universidad se descartan los efectos externos que pueden provocarse.

### 5.7.2. Diseño Eléctrico

Las características específicas usadas en el diseño eléctrico se muestran en la Tabla 47, cabe recalcar que el criterio del diseñador predomina a comparación de estipulaciones establecidas por normas locales o internacionales.

**Tabla 47.**

#### Resumen diseño eléctrico

	<b>Frecuencia</b>	<b>60Hz</b>
<b>Diseño General</b>	<b>Normativa</b>	INEN 021:2008
	<b>Potencia</b>	
<b>Elección de arquitectura</b>	<b>Equipos a utilizarse</b>	-Tarjeta Raspberry
		-Tarjeta Arduino
		-Pantalla HMI
		-Sensores capacitivos (4)
		-Sensores ultrasónicos (2)
		-Actuadores (2 Bombas 5v )
<b>Protección de circuitos</b>	<b>Según norma</b>	<b>Criterio del diseñador</b>
	-cable #16	-cable #18

El diagrama eléctrico va guiado con las características técnicas que se toman de la tabla anterior, cabe recordar que el sistema implementado tiene un fin educativo, por lo tanto, se manejan bajos niveles de voltaje por lo que no existe mayor riesgo para el operador.

### 5.7.3. Resultado de diseño de un sistema instrumentado de seguridad.

El diseño para un sistema instrumentado de seguridad indica que el sistema expuesto a fallas es más común cuando no consta con un SIS, queda demostrado que la probabilidad de falla antes de un sistema instrumentado de seguridad es de 0,0001. Mientras que en el momento de implementar capas de protección al sistema su probabilidad de falla disminuye a un 0,000001.

## Comprobación de Hipótesis

Para la comprobación de la hipótesis de la presente investigación se aplicará el método de análisis predictivo, ya que se toman datos causa-efecto, en el ámbito de seguridad las variables causa-efecto son fundamentales para establecer la fiabilidad de un sistema. Los datos que se tomarán en cuenta para este análisis son la probabilidad de que falle el sistema a su inicio; esto quiere decir sin un SIS, y por otro lado cuando el equipo cuente con un sistema instrumentado de seguridad.

### Hipótesis Nula

No es fiable el uso de un sistema instrumentado de seguridad para prácticas online para el laboratorio de PLC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

### Hipótesis Alternativa

Podría ser fiable instalar un sistema instrumentado de seguridad para reducir el riesgo de ocurrencia de una falla peligrosa en las prácticas online desarrolladas en el laboratorio de PLC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Los datos que se tomarán en cuenta son, la probabilidad de ocurrir una falla cuando el sistema esté con y sin el sistema instrumentado de seguridad. En la Tabla 48 se presenta el resumen de los valores obtenidos.

**Tabla 48.**

### Valores obtenidos

Descripción del evento	Probabilidad de falla inicial	Probabilidad de falla con un SIS
Derrame de fluido	0,055	0,0000174
Bomba B1 Falla	0,044	0,0000133
Bomba B2 falla	0,022	0,0000066
Falla sistema de control	0,011	0,0000034

El análisis estadístico se basará en una Prueba-T (test-t) para muestras relacionadas, las cuales proporcionan los valores que tienen tanto la probabilidad de falla inicial y la probabilidad de falla al instalar un SIS, estos datos son obtenidos del mismo proceso (control de nivel).

**Tabla 49.**

**Resultado de la prueba-T**

Prueba de muestras emparejadas								
Par 1	Diferencias emparejadas					t	g	Sig. (bilateral)
	Media	Desviación estándar	Media de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
				Inferior	Superior			
Fallas sin instalación de SIS - Fallas con instalación de SIS	,03298	,02007	,01003	,0010	,06493	3,286	3	,046

Como se menciona en la (Tabla 14) de métodos de análisis estadístico, un valor  $p$  menor a .05 se considera significativo desde un punto de vista estadístico. En este caso, el valor  $p$  de esta prueba es .046 por lo cual se puede concluir que se desapueba la hipótesis nula, por lo tanto existe una diferencia significativa entre el sistema antes y después de la implementación del Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS). Esto indica aumento en la fiabilidad del proceso al reducir la probabilidad de ocurrencia de fallas instalando un SIS.

## CAPÍTULO VI

### 6. Conclusiones y Recomendaciones

#### 6.1. Conclusiones

- Se demostró la eficacia que tiene un sistema instrumentado de seguridad para reducir la probabilidad de fallas en un proceso de una planta de nivel con depósito de volumen variable para prácticas online en el laboratorio de PLC`s de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga.
- Se profundizó el estudio de los sistemas instrumentados de seguridad y sus beneficio en los procesos industriales para evitar acontecimientos peligrosos mediante el diseño y construcción de un un prototipo para una planta de nivel para prácticas online.
- Para cumplir los requisitos exigidos en el prototipo y satisfacer las necesidades del cliente se implementó un módulo didáctico de una planta de nivel usando el diseño concurrente de elementos de máquinas.
- De acuerdo al concepto de “mantenimiento centrando en la confiabilidad”, la curva de la bañera muestra una mortalidad infantil en los instrumentos que se usan en procesos industriales por lo que es fundamental evitar este efecto en los equipos que se utilizan, en este caso mediante el empleo de nuevas técnicas en seguridad y mantenimiento.
- En base a datos tomados por la bitácora de fallas se observó los elementos que fallaron con mayor frecuencia para luego ser tomados en cuenta para el diseño del sistema instrumentado de seguridad.

- El sistema de control fue el elemento con más número de fallas de acuerdo a los datos tomados en el periodo de prueba, siendo el exceso de temperatura en la tarjeta de control su falla más relevante.
- La probabilidad de que ocurra una falla en un equipo o sistema siempre está presente debido a varios aspectos que transcurren en los instrumentos, por lo tanto es necesario plantear nuevos sistemas de seguridad que reduzcan la probabilidad de falla, sin olvidar que este valor nunca puede llegar a ser nulo.
- Se realizó un estudio estadístico sobre la fiabilidad del sistema instrumentado de seguridad en el prototipo determinando un buen desempeño en el módulo, esto quiere decir que la probabilidad de falla final es mucho menor a la probabilidad de fallar al momento de inicio del proyecto.
- El estudio estadístico en relación al valor de probabilidad de fallas de un sistema instrumentado de seguridad, afirma la eficacia que tiene el SIS al momento de evitar futuras fallas en el proceso, aunque el costo económico representa un punto importante, se contrasta con planes de mantenimiento menos exhaustivos pero de igual importancia.

## 6.2. Recomendaciones

- La revisión periódica de los elementos de control contribuye a la prevención de eventos peligrosos, por ello, es necesario que se establezcan métodos documentados que indiquen los procedimientos así como los periodos en los cuales deben realizarse pruebas en el sistema de control
- La seguridad funcional debe tener su espacio dentro del marco de seguridad industrial en lo que se refiere a la industria de proceso. De la misma manera que se regula el cumplimiento de normas y lineamientos para la seguridad ocupacional, se debería establecer reglamentos que contemplen la implementación de sistemas de seguridad que cumplan normas internacionales como la IEC 61508 e IEC 61511.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABB. (2010). Seguridad y seguridad funcional. 20-21.
- Academia. (4 de Marzo de 2009). *www.academia.edu*. Recuperado el 27 de Junio del 2017. Obtenido de: [http://www.academia.edu/6546431/capítulo\\_5.\\_elementos\\_finales\\_de\\_control](http://www.academia.edu/6546431/capítulo_5._elementos_finales_de_control)
- Aficionados a la mecánica*. (2014). Recuperado el 21 de Abril de 2016, Obtenido de: Aficionados a la mecánica: <http://www.aficionadosalamecanica.net/sensores1.htm>
- Alcalde San Miguel, P. (2011). *Electrotécnia*. Madrid: Paraninfo S.A.
- Antón, J. (2014). *Comunicaciones industriales*. Asturias: Departamento de electricidad-electronica.
- Barrientos, A., & Gambao, E. (2014). *Sistemas de producción automatizados*. Madrid: Dextra.
- Bergstrom, J. L. (2009). Sistemas instrumentados de seguridad y nivel de integridad de seguridad. *Process Engineering*, 9-21.
- CEAACES. (2015). *Modelo genérico de evaluación del entorno de aprendizaje de carreras presenciales y semipresenciales de las universidades y escuelas politécnicas del Ecuador*. Quito.
- Cortes Cherta, M. (1994). *Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas tomo ii*. Barcelona: Reverté S.A.
- Crefeld., S. A. (1994). Getting started: Concurrent engineering for a medium-sized manufacturer. *Journal of manufacturing systems*, 48-58.
- Cubillo Hernández, E. (2013). *Implementación de un banco de pruebas para caracterización de máquinas eléctricas mediante un freno electrodinámico*. Cartago.

- Daneri, P. (2008). *Automatización y control industrial*. Buenos Aires: Hispano Americana.
- Deltaww. (2016). Recuperado el 02 de Abril del 2016, Obtenido de: Deltaww: <http://www.deltaww.com/Products/CategoryListT1.aspx?CID=060302&PID=ALL&hl=en-US>
- E., N. (Noviembre de 2012). Incendio en La Fabril. *Diario La Hora* .
- Electricmotorwholesale. (2016). Recuperado el 10 de Abril de 2016, Obtenido de: <http://www.electricmotorwholesale.com/BALDOR-CD5350/>
- Emerson. (2010). Sistema integrado de seguridad inteligente.
- ESPE. (2016). *Misión y Visión*. Latacunga.
- EXIDA. (s.f.). Ingeniería de seguridad funcional curso i y ii.
- Garcín, J. J. (2007). Sistemas instrumentados de seguridad. *BASF Española*, 20-38.
- Grunh, P. &. (2006). Safety instrumental systems: Desing, analisys and justification. *The instrumentation, systems, and automation society*.
- Grupo Tecnológico Industrial. (2015). [www.gtisistemas.com](http://www.gtisistemas.com). Recuperado el 3 de Octubre de 2017, Obtenido de: Gti grupo tecnológico industrial: <http://www.gtisistemas.com/bp-motores-electricos.html>
- Guerrero, V., Yuste, R., & Martínez, L. (2009). *Comunicaciones industriales*. Marcombo.
- HSE. (1987).
- IEC-61508. (1997). *Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems*. USA: International Electrotechnical Commission.
- IEC-61511. (2003). *Functional safety-safety instrumented systems for the process industry*. International Electrotechnical Commission.

- International Electrotechnical Commission, I. 6. (1997). *Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems*.
- IR-S-02, P. (1995). *Criterios para el análisis cuantitativo de riesgos*. Venezuela.
- Jaén, G. R. (2005). Seguridad funcional en plantas de proceso. *OILGAS*.
- KOQ. (Mayo de 2013). Incendio causó alerta en bodegas del parque Industrial. *Diario El Tiempo*.
- Kosow, I. (1993). *Máquinas eléctricas y transformadores*. México: PRENTICE-HALL .
- L. I. Ruiz, A. G. (2008). *Criterios para la optimización de sistemas eléctricos en refinerías de la industria petrolera: Influencia y análisis en el equipo eléctrico*. Guatemala: IEEE CONCAPAN XXVIII.
- Lundteigen, M. y. (2007). Implementing defense measures through function testing. En *Common cause failures in safety instrumented systems on oil and gas* (págs. 218-229).
- M. A. Lundteigen, M. R. (2007). Common cause failures in safety instrumented systems on oil and gas installations. *Journal of loss prevention in the process industries*, 218 - 229.
- M. A. Lundteigen, M. R. (2007). The effect of partial stroke testing on the reliability of safety valves. *Risk, reliability and safety*.
- Macdonald, D. (2004). *Practical Hazops, trips and alarms*. Newnes.
- Maria Belén Castañeda, A. C. (2010). *Procesamiento de datos y análisis estadístico utilizando SPSS*. Porto Alegre: ediPUCRS.
- Marzal, E. y. (2002). Safety integrity level selection. *The Instrumented Systems*.
- Merizalde, Y. (2013). *Diseño e implementación de un banco de pruebas para máquinas de corriente continua*. Guayaquil.

- Minotta Peñaloza, C. I., & Rodriguez Quimbayo, O. (2007). *Diseño y construcción de un banco de prueba para motores dc de baja potencia*. Bogotá.
- Mohan, N., Undeland, T., & Robbins, W. (2009). *Electrónica de potencia*. México: McGRAW-HILL.
- Mora, J. F. (2003). *Máquinas eléctricas*. Madrid: Edigrafos S.A.
- Morán, S. A. (2010). *Medición batimétrica para determinar el volumen de material sedimentado acumulado durante el tiempo de servicio del embalse pueblo viejo, de la central hidroeléctrica chixoy*. Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala.
- Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. México: Pearson Education.
- Mott, R. (2006). Diseño de elementos de máquinas. En R. Mott, *Diseño de elementos de máquinas* (pág. 187). Ecuador: Pearson Educación.
- Mourbay, J. (1991). *Matenimiento centrado en confiabilidad (RCM)*. Asheville, North Carolina, USA: Aladon LLC.
- Müller, W. (1980). *Electrotécnia de potencia curso superior*. Barcelona: Reverte.
- Normalización, I. E. (2012). *INEN-ISO 27013:2012*. Quito: Norma.
- Olivares, J. S. (15 de Enero de 2013). *epanet.info*. Recuperado el 09 de Noviembre del 2017, Obtenido de: <http://epanet.info/depositos-modelos-redes-abastecimiento/>
- OREDA. (2002). *Offshore reliability data*.
- Pallás, R. (2003). *Sensores y acondicionadores de señal*. Barcelona: MARCOMBO.
- Parry, G. (1991). Common cause failure analysis. En *Reliability engineering & system safety* (págs. 309-326).

- Pecsén, L. G. (2010). Sistemas instrumentados de seguridad. *La revista del gas natural*, 5-6.
- Pecsén, L. G. (2010). Sistemas instrumentados de seguridad (SIS). *La revista de gas natural*, 2-7.
- Penin, A. R. (2008). *Comunicaciones industriales*. Barcelona: Marcombo.
- Pere Ponsa, A. G. (2010). *Diseño y automatización industrial*. Cataluña: Universidad Politecnica de Cataluña.
- Romeva, C. R. (2002). *Diseño concurrente*. Catalunya: Politext.
- Salesiano, C. E. (2009). *Diseño, operación y mantenimiento de sistemas de control eléctrico*. Talca: Centro Educativo Talca.
- Salinas, V. M. (2010). Los sistemas instrumentados de seguridad (sis) y sus funciones instrumentadas de seguridad (fis). Risk Software S.A.
- Sánchez, D. (2013). *Introducción a la síntesis y programación de automatismos secuenciales*. Cádiz: Servido de Publicaciones de la Universidad de Cádiz.
- Schneider Electric España, S. (2010). *Guía de diseño de instalaciones eléctricas*. España: Colección Técnica.
- Siemens. (2008). Funciones de seguridad flexibles. *Safety integrated for process automation*.
- Siemens, P. A.-2. (2008). Seguridad funcional en la Instrumentación de procesos con clasificación SIL.
- Smar S.A. (2014). *www.smar.com*. Recuperado el 18 de Julio del 2017, Obtenido de: <http://www.smar.com/espanol/articulo-tecnico/sis-sistemas-instrumentados-de-seguridad>
- Smith, D. &. (2010). Safety critical systems handbook. *A straightfoward guide to functional safety, IEC 6158 and standars*. Elsevier.

- Smith, D. J. (2011). Reliability, maintainability and risk: Practical safety-related systems engineering methods. *Elsevier*.
- Suarez, C. (2007). El accidente de Chernobil. *Revista Vivat Academia*, 20-55.
- Summers, B. A. (2002). Viewpoint on ISA TR84. 0.02 simplified methods and fault tree analysis. *ISA Transactions*, 125-132.
- TechTarget. (Marzo de 2010). *TechTarget*. Obtenido de <http://searchdatacenter.techtarget.com/es/definicion/analisis-estadistico>
- Tecnología, A. (2010). <http://www.areatecnologia.com>. Recuperado el 17 de Agosto del 2017, Obtenido de <http://www.areatecnologia.com/ergonomia.html>
- TI8A02D00-E00-N, Y. (September de 2003). Practical implementation of iec 61508.
- UNAM. (2010). [www.ptolomeo.unam.mx](http://www.ptolomeo.unam.mx). Recuperado el 02 de Abril del 2017 Obtenido de: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2548/011-mpm-cap8-Final.pdf?sequence=11>
- UNET. (Febrero de 2008). [UNET.edu.ve](http://www.unet.edu.ve). Obtenido de <http://www.unet.edu.ve/~ielectro/sensores.pdf>
- Vanegas, F. (2014). Maestría en control y automatización industriales. *La seguridad funcional en la industria de procesos: Conceptos y metodologías*. Cuenca.
- Varela, R. E. (2014). Introducción a la seguridad funcional. Argentina: AADECA.
- Watson, I. A. (2001). Common-mode failures in redundancy systems. *Nucl. Technol.* , 2- 46.
- Wildi, T. (2007). *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia*. Monterrey: Pearson Education.

# ANEXOS



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**  
**CERTIFICACIÓN**

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los Señores Luis Enrique Looor Ceballos, Edwin Ismael Ramírez Velástegui en la ciudad de Latacunga a los quince días del mes de febrero del 2018.

Ing. Freddy Salazar Paredes  
DIRECTOR DEL PROYECTO

Aprobado por:

Ing. Katya Torres Vasquez  
DIRECTORA DE LA CARRERA DE  
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

Dr. Rodrigo Vaca  
SECRETARIO ACADÉMICO