

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



Diseño de un sistema automatizado para emergencias contra fuego y gas para el tanque esférico YT-7711

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura

Raúl Ariel Calvo Torres

Cartago, febrero de 2013

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Ing. Juan Carlos Jiménez Robles

Profesor lector



Ing. Jorge Castro Godínez

Profesor lector



Ing. Leonardo Rivas Arce

Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica.

Cartago, febrero de 2013

Declaración de autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, febrero 2013

Raúl Calvo T.

Firma del autor

Raúl Ariel Calvo Torres

Céd: 701780752

Resumen

En los últimos 24 años, la demanda nacional de gas licuado de petróleo (GLP), muestra una tendencia de crecimiento constante. Con el fin de subsanar esta demanda, RECOPE requiere varios tanques esféricos para almacenar, importar y trasegar gas licuado de petróleo en la Refinería en Moín, de entre los cuales el denominado YT-7711 va a ser el primer tanque en construirse.

El tanque esférico YT-7711 debe contar con un sistema automatizado para emergencia contra fuego y gas. Este sistema debe ser desarrollado con los últimos avances tecnológicos y conceptos de control seguro. Todos los procesos involucrados deben ser desarrollados de acuerdo a las mejores prácticas de ingeniería para este tipo de industria, siempre que sea el caso basándose en normas internacionales.

Los equipos e instrumentos utilizados tales como controladores lógicos programables, detectores de llama y gas, válvulas de solenoide operadas eléctricamente y otros, han surgido en este proyecto como herramientas ideales para el control, vigilancia y acción del sistema para emergencias contra fuego y gas, creando un ambiente de mayor seguridad para la esfera YT-7711.

La activación del sistema debe ser automática y de ser necesaria la activación manual, esta puede ser de manera remota por medio del sistema de control de supervisión y adquisición de datos (SCADA, por sus siglas en inglés) o con dispositivos en campo que activen el sistema. La desactivación del sistema, por norma de seguridad debe ser manual, efectuada por operadores de campo entrenados para ejercer tal función. Se debe contar con dispositivos de alarma sonora y visual que notifiquen a los funcionarios en caso de situación de emergencia.

Palabras claves: Controladores, detectores de llama, detectores de gas, válvulas solenoide, válvula de control actuada por diafragma, sistema SCADA, dispositivos de alarma sonora y visual, gas licuado de petróleo.

Abstract

In the last 24 years, the national domestic demand for liquefied petroleum gas (LPG) shows a steady growth trend. To address this demand, RECOPE requires several spherical tanks to store, import, and draw off LPG in the refinery in Moín, from which the designated tank YT-7711 will be the first to be built.

The YT-7711 tank must have an automated system for fire and gas emergency. This system has to be developed with the latest technology and safe control concepts. All processes involved must be developed in accordance with best engineering practices for this type of industry, whenever the case, based on international standards.

The equipment and instruments used in this project such as programmable logic controllers, flame and gas detectors, electrically operated solenoid valves and other, have emerged as ideal tools for control, surveillance and system action against fire and gas emergency, creating a safer environment for the sphere YT-7711.

The activation of the system should be automatic and if necessary manual activation, this can be remotely done via the supervisory control and data acquisition (SCADA) system or field devices that activate the system. The deactivation of the system, because of safety standard must be done manually, conducted by field operators trained to perform this function. There must be some means of audible and visual alarm that notify officials of an emergency situation.

Keywords: controllers, flame detectors, gas detectors, solenoid valves, actuated control valve diaphragm, SCADA system, audible and visual alarm devices, liquefied petroleum gas.

A mi madre, padre, hermanos
y especialmente Dios...

Agradecimiento

Agradezco a Dios por la salud que me ha dado y permitirme cumplir con esta meta profesional.

A mis padres y familia en general quienes siempre me apoyaron a lo largo de mi carrera universitaria.

A todas las personas de RECOPE que me ayudaron a llevar a cabo este proyecto con éxito y que en todo momento me brindaron su experiencia y conocimiento.

A todos, muchas gracias,

Raúl Ariel Calvo Torres

INDICE GENERAL

Capítulo 1:	Introducción	15
1.1	Problema existente e importancia de su solución	15
1.2	Solución seleccionada	17
Capítulo 2:	Meta y objetivos	20
2.1	Meta	20
2.2	Objetivo General	20
2.3	Objetivos específicos.....	20
Capítulo 3:	Marco teórico	21
3.1	Descripción del sistema.....	21
3.1.1	Proceso múltiple de entrada:	22
3.1.2	Proceso de transferencia.....	22
3.1.3	Proceso de Ventas.....	24
3.1.4	Arquitectura general de red.....	25
3.1.5	Propiedades del gas licuado de petróleo	26
3.2	Antecedentes bibliográficos.....	29
3.3	Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema.....	30
3.3.1	Sensores	30
3.3.2	Panel de visualización y sistema SCADA.....	32
3.3.3	Válvulas de control.....	33
3.3.4	Dimensionamiento de la válvula de control	33
3.3.5	Características de flujo de la válvula de control.....	35
3.3.6	Respuesta al impulso y funciones de transferencia de sistemas lineales	38
3.3.7	Diagramas de bloques	39
3.3.8	Función de transferencia de la válvula de control.....	40
3.3.9	Control automático de procesos.....	41
3.3.10	Control a lazo cerrado (realimentado)	42
3.3.11	Sistemas de control lineales y no lineales	44
3.3.12	Sistemas invariantes con el tiempo y variantes con el tiempo	45

3.3.13	Diseños de sistemas de control.....	46
3.3.14	Diferentes tipos de controladores.....	52
3.3.15	Software Utilizado.....	55
3.3.16	Principios de seguridad industrial.....	57
3.3.17	Teoría del fuego:.....	58
3.3.18	Métodos de propagación del fuego:	60
3.3.19	Clasificación de fuegos:	61
3.3.20	Señalización:.....	65
3.3.21	Qué es un sistema de red contra incendio.....	67
3.3.22	Definición N.F.P.A.....	67
Capítulo 4:	Procedimiento metodológico.....	68
4.1	Reconocimiento y definición del problema.....	68
4.2	Obtención y análisis de información	70
4.3	Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución	72
4.4	Implementación de la solución	73
4.5	Reevaluación y rediseño.....	74
Capítulo 5:	Descripción detallada de la solución	76
5.1	Análisis de soluciones y selección final	76
5.1.1	Subsistema de detección de fuego.....	79
5.1.2	Subsistema de detección de gas	82
5.1.3	Subsistema de control y operación de válvulas.....	85
5.1.4	Subsistema de interfaz hombre máquina.....	90
5.1.5	Subsistema de activación y desactivación de alarmas.....	97
5.2	Descripción del hardware	99
5.2.1	Detectores de llama.....	99
5.2.2	Detectores de Gas	102
5.2.3	Estación manual de emergencia para el sistema contra incendio	106
5.2.5	Válvulas de diluvio	107
5.2.4	Controlador ControlLogix.....	112
5.2.6	Indicadores visuales y sonoros	123
5.2.7	Lanzas de agua.....	127

5.3	Descripción del software	137
Capítulo 6:	Análisis de resultados	148
6.1	Resultados	148
6.2	Análisis.....	158
Capítulo 7:	Conclusiones y recomendaciones	163
7.1	Conclusiones	163
7.2	Recomendaciones.....	164
Bibliografía.....		166
Apéndices		169
A.1	Glosario, abreviaturas y simbología	169
A.2	Información sobre la empresa	172
Anexos		173
A.1	Uso de recursos.....	173
A.2	Presupuesto	174

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Recipiente esférico YT-7710, actualmente operando en el plantel de RECOPE.....	16
Figura 1.2	Diagrama general del sistema fuego & gas y de sus subsistemas.....	18
Figura 3.1	Diagrama general del proceso de entrada, transferencia y venta de GLP	21
Figura 3.2	Diagrama básico del proceso de entrada.....	22
Figura 3.3	Diagrama básico de proceso de transferencia	23
Figura 3.4	Tubería de entrada, salida e intercambio de GLP para la esfera YT-7711	24
Figura 3.5	Diagrama Básico del proceso de ventas	24
Figura 3.6	Arquitectura general de red.....	25
Figura 3.7	Curvas de las características de flujo inherente ^[37]	36
Figura 3.8	Operaciones de un diagrama de bloques de dispositivos típicos de detención de sistemas de control. (a) Resta. (b) Suma. (c) Suma y resta. (d) Multiplicación. ^[23]	40
Figura 3.9	Diagrama de bloques del control a lazo cerrado	42
Figura 3.10	Relación entre las raíces de la ecuación característica del sistema prototipo de segundo orden y α , ζ , ω_n y ω . ^[23]	48
Figura 3.11	Lugar geométrico de la frecuencia natural no amortiguada constante. ^[23]	48
Figura 3.12	Lugar geométrico del factor de amortiguamiento relativo constante. ^[23]	49
Figura 3.13	Lugar geométrico del factor de amortiguamiento constante. ^[23]	49
Figura 3.14	Lugar geométrico de la frecuencia de oscilación constante. ^[23]	49
Figura 3.15	Lugar geométrico de las raíces con $\omega =$ constante y ζ variando desde $-\infty$ hasta ∞ . ^[23]	51
Figura 3.16	Respuesta al escalón para varios sitios del lugar geométrico de las raíces en el plano s. ^[23]	52
Figura 3.17	Sistema de control con el control PD	53
Figura 3.18	Sistema de control con el control PI	54
Figura 3.19	Triángulo del fuego.....	59
Figura 3.20	Símbolos para fuego clase A	62
Figura 3.21	Símbolos para fuego clase B	62
Figura 3.22	Símbolos para fuego clase C	63
Figura 3.23	Símbolos para fuego clase D	63
Figura 3.24	Símbolos para fuego clase D	64
Figura 3.25	Incendio de un tanque de gas licuado de petróleo	64
Figura 3.26	Ejemplo de señalización en el área de construcción de la esfera YT-7711	66
Figura 4.1	Diagrama de Gantt.....	69

Figura 5.1	Diagrama de la ubicación de altura de los sensores de llama y gas	82
Figura 5.2	Niveles a considerar para la existencia de una atmósfera explosiva dependiendo del porcentaje de gas.	84
Figura 5.3	Diagrama de posible fallo de comunicación entre el controlador y el sistema SCADA	86
Figura 5.4	Diagrama de posible fallo de comunicación entre el controlador y el panel de visualización	87
Figura 5.5	Válvulas de diluvio con sus respectivas tuberías de enfriamiento.....	88
Figura 5.6	Pantalla principal del sistema HMI	91
Figura 5.7	Válvula XSV-7711A abierta en pantalla principal del HMI.....	92
Figura 5.8	Pantalla válvula de diluvio para el sistema HMI	93
Figura 5.9	Diferentes estados para las válvulas de diluvio en el sistema HMI	93
Figura 5.10	Pantalla Detector de llama para el sistema HMI.....	95
Figura 5.11	Diferentes estado para los detectores de llama en el sistema HMI.....	95
Figura 5.12	Pantalla para los detectores de gas para el sistema HMI	96
Figura 5.13	Diferentes estados para los detectores de llama en el sistema HMI ...	96
Figura 5.14	Sumario de alarmas y eventos	97
Figura 5.15	Detectores de llama recomendados para el sistema contra incendio	101
Figura 5.16	Relación porcentaje concentración de gas-mA	104
Figura 5.17	Detectores de gas recomendados para el sistema contra incendio ..	105
Figura 5.18	Estación manual del sistema contra incendio	106
Figura 5.19	Válvula de diluvio Bermad modelo FP 400E-2M	107
Figura 5.20	Estado abierto y cerrado de Válvula de diluvio Bermad modelo FP-400E-2M	108
Figura 5.21	Válvula Inbal serie 700D	110
Figura 5.22	Válvula Inbal en posición – sellado hermético.....	110
Figura 5.23	Válvula Inbal en posición apertura completa.....	111
Figura 5.24	Datos del valor del coeficiente de flujo Cv de la válvula de diluvio....	111
Figura 5.25	Diagrama de bloque de la detección y control de llama	114
Figura 5.26	Diagrama de bloque de la detección y control de gas.....	115
Figura 5.27	Controlador ControlLogix utilizado para el sistema contra incendio ..	116
Figura 5.28	Módulo de entradas digitales 1756-IA16	117
Figura 5.29	Pines utilizado del módulo de entrada E1	118
Figura 5.30	Pines utilizado del módulo de entrada E2	119
Figura 5.31	Pines utilizado del módulo de entrada E3	120
Figura 5.32	Pines utilizados del módulo de salida S1	121
Figura 5.33	Pines utilizados del módulo de salida S3	122
Figura 5.34	Módulos de comunicación ControlLogix.....	123
Figura 5.35	Semáforo de estado marca Cooper Medc, modelo SL15.....	124
Figura 5.36	Sirena modelo DB3, Cooper MEDC, situada en campo	125
Figura 5.37	Indicador visual y sonoro dentro del cuarto de control de GLP	127
Figura 5.38	Lanza de agua utilizada en las instalaciones de RECOPE	128
Figura 5.39	Monitor marca Chemguard.....	128
Figura 5.40	Tubo canalización eléctrica TC-DI-001 para cables	134
Figura 5.41	Tubo canalización eléctrica TC-DI-001 para cables	136

Figura 5.42	Programa RSLinx Classic	138
Figura 5.43	Programa RSLogix 5000	138
Figura 5.44	Esquema de estructura de programación del controlador para el sistema contra incendio	139
Figura 5.45	Programa RSView32 Works.....	141
Figura 5.46	Diagrama de flujo de para detección de llama	142
Figura 5.47	Diagrama de flujo de proceso para altas concentraciones de gas	143
Figura 5.48	Cableado de los módulos de entrada controllogix para aplicaciones con alto grado de seguridad.....	144
Figura 5.49	Lógica de programación segura para determinar concurrencia en los datos de entrada	144
Figura 5.50	Lógica de programación para notificar un fallo en caso de mantener desigualdad entre dos puntos.	145
Figura 6.1	Histórico de alarmas y eventos	151
Figura 6.2	Resultado de la simulación con los sensores de llama	152
Figura 6.3	Resultado simulación para combinación de distintos sensores de llama	153
Figura 6.4	Resultado de la simulación para los sensores de gas.....	154
Figura 6.5	Resultado de la simulación con los sensores de gas con distintas combinación de ellos.....	155
Figura 6.6	Resultado de la simulación de cerrado y error para las válvulas de diluvio.....	156
Figura 6.7	Resultado de la simulación para las válvulas de diluvio en estado abiertas y cerradas.....	157
Figura 6.8	Resultado de la simulación indicadores de la activación y no activación de alarmas	157
Figura 7.1	Gráficas históricas.....	165

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Comparación de propiedades de GLP con otros combustibles ^[20]	27
Tabla 5.1	Descripción general de los requisitos para los sensores de llama.....	100
Tabla 5.2	Tiempo de respuesta para el sensor de llama ^[19]	102
Tabla 5.3	Descripción general de los requisitos para los detectores de gas	103
Tabla 5.4	Lista de señales de hardware de abierto y cerrado de válvula de diluvio que recibe el controlador para el sistema contra incendio	129
Tabla 5.5	Lista de señales de hardware que recibe el controlador de los sensores de llama	130
Tabla 5.6	Lista de señales de hardware que recibe el controlador de los sensores de gas	130
Tabla 5.7	Lista de señales de hardware de los semáforos y estaciones de emergencia con el controlador.....	131
Tabla 5.8	Multicable MC-DI-003 utilizado para las señales de abierto y cerrado de las válvulas de diluvio	132
Tabla 5.9	Multicable MC-DI-004 utilizado para las señales de abierto, cerrado de las válvulas de diluvio, estación de emergencia y semáforo	132
Tabla 5.10	Multicable MC-AI-004 utilizado para las señales de los detectores de llama	133
Tabla 5.11	Multicable MC-AI-003 utilizado para las señales de los detectores de gas	133
Tabla 5.12	Lista de tubos de canalización eléctrica para cables de instrumentación	134
Tabla 5.13	Lista de señales de software de abierto y cerrado de válvula de diluvio que recibe el controlador para el sistema contra incendio	145
Tabla 5.14	Lista de señales de software que recibe el controlador de los sensores de llama	146
Tabla 5.15	Lista de señales de software que recibe el controlador de los sensores de gas	146
Tabla 5.16	Lista de señales de software que envía el controlador a los semáforos	147
Tabla 6.1	Verificación de funcionamiento adecuado de los sensores de llama	148
Tabla 6.2	Verificación de funcionamiento adecuado de los sensores de gas.....	149
Tabla 6.3	Verificación de funcionamiento adecuado de las válvulas de diluvio	149
Tabla 6.4	Verificación funcionamiento señales de alarma en las distintas áreas de refinería.....	150
Tabla 6.5	Verificación de la indicación visual de la interfaz hombre-máquina	150
Tabla A.1.	Lista de recursos necesarios para el proyecto	173
Tabla A.2.	Presupuesto necesario para la realización del proyecto	174

Capítulo 1: Introducción

Con el fin de ubicar al lector en este capítulo se realiza una breve descripción del proceso global en que se enmarca el problema y el proyecto a desarrollar. Esto se logra al especificar el problema existente, su contexto, razones por las cuales es importante resolver el problema y la técnica utilizada para implementar la solución cumpliendo con las restricciones o requerimientos establecidos por la empresa.

1.1 Problema existente e importancia de su solución

El estudio de la demanda nacional de gas licuado de petróleo (GLP) de los últimos veinticuatro años, según datos obtenidos de la Dirección de Servicio al Cliente de RECOPE, muestra una tendencia de crecimiento constante y aumento en la demanda nacional. El gas licuado de petróleo es el tercer producto de ventas después del diesel y las gasolinas. A partir de este estudio se procedió a realizar las obras de ingeniería básica para ampliar las capacidades de los sistemas de almacenamiento, importación y ventas de gas licuado de petróleo en la Refinería en Moín. RECOPE requiere construir la esfera YT-7711 con capacidad nominal de 4000m³ (25000 B) con el fin de subsanar su urgente necesidad de almacenamiento en este producto. Se hace necesario que este recipiente esférico entre en operación y se integre al sistema operativo del plantel a más tardar en enero del 2013. ^[34]

Para fines ilustrativos, en la figura 1.1 se muestra el tanque esférico YT-7710 que actualmente se encuentra operando en las instalaciones de RECOPE. Una vez terminada su construcción la esfera YT-7711 va ser de proporciones muy similares y va cumplir con las mismas funciones que la esfera mostrada en la imagen.



Figura 1.1 Recipiente esférico YT-7710, actualmente operando en el plantel de RECOPE

Cuando entre a operar el tanque esférico YT-7711, se va crear un ambiente inseguro alrededor de esta, esto debido a que el recipiente se va encargar de recibir, almacenar y trasegar gas licuado de petróleo, sustancia altamente inflamable. Por ende es necesario para la esfera un sistema de protección contra incendio automatizado que se active con la presencia de llama y/o altas concentraciones de gas en la atmósfera. Entre los beneficios que se obtienen al implementar el sistema se encuentran:

- a. Operación más segura y confiable durante el recibo, almacenamiento y trasiego de gas licuado de petróleo.
- b. Minimiza los riesgos del personal que participa en la operación de la esfera.
- c. Minimiza los riesgos del personal que se encuentran alrededor de la esfera YT-7711 pero que no están trabajando directamente con ella.
- d. Disminuye la probabilidad de que se produzca un accidente ambiental.
- e. Se reduce el impacto causado al ambiente en caso de que ocurra un accidente. ^[18]
- f. Evita o minimiza la pérdida de materiales y equipos en y alrededor de la esfera.

1.2 Solución seleccionada

A continuación se lista una serie de restricciones y requisitos establecidos por la empresa en cuanto a la solución esperada del sistema contra incendio automatizado:

- a. El sistema debe ser desarrollado con los últimos avances tecnológicos y conceptos en sistemas de control seguro.
- b. El sistema debe ser flexible para la expansión de su capacidad futura.
- c. Todos los equipos y materiales del sistema contra incendio de la esfera YT-7711 deben ser completamente nuevos y libres de imperfecciones.
- d. Todos los equipos y materiales del sistema contra incendio de la esfera YT-7711 deben estar ajustados a las últimas normas y estándares internacionales existentes
- e. Todos los equipos y materiales del sistema contra incendio de la esfera YT-7711 deben estar ajustados a las mejores prácticas de control de calidad del fabricante para garantizar su correcto funcionamiento.
- f. Todos los equipos y materiales del sistema contra incendio de la esfera YT-7711 deben ser modernos y haber sido probados en instalaciones similares.
- g. No se aceptarán equipos o materiales prototipos o en desarrollo tecnológico.
- h. El controlador utilizado para el sistema deben ser certificados para operar en el manejo y control de refinerías.
- i. El sistema contra incendio debe activarse de manera automática. En caso de fallo se debe accionar de manera manual ya sea en el campo o en los cuartos de control.
- j. Una vez activadas las válvulas de diluvio estas solo pueden cerrarse de manera manual.
- k. Los sensores de llama y gas deben contar con señal de auto diagnostico.
- l. Todos los procesos involucrados deben basarse en normas internacionales de acuerdo a las mejores prácticas de ingeniería para este tipo de industria.

[11] y [34]

El presente trabajo es desarrollado bajo la modalidad: Ingeniería, Procura y Construcción (IPC) y se cuenta con dos partes, la primera parte es RECOPE que por medio de la oficina de proyecto de Sistemas y Almacenamiento de Gas Licuado de Petróleo (SAGAS) de la Gerencia de Desarrollo tiene la responsabilidad de dar revisión de ingeniería de detalle y control de avance de obra y/o constructivo y la segunda parte la compone el contratista que es el encargado de la procura de materiales, montaje y construcción de la esfera YT-7711 del proyecto T1064-LN – SAGAS.

Este proyecto abarcará todo lo relacionado con el sistema de protección contra incendio. Este lo componen varios subsistemas, como lo son: el subsistema de detección de fuego, subsistema de detección de gas, subsistema de interfaz hombre máquina (HMI, por sus siglas en inglés), subsistema de activación y desactivación de alarmas y por último el subsistema de control y operación de válvulas para la esfera YT-7711, los cuales se explicarán a más detalle en el capítulo 5 (Descripción detallada de la solución). A continuación en la figura 1.2 se muestra un diagrama general del sistema contra fuego & gas y de sus subsistemas.

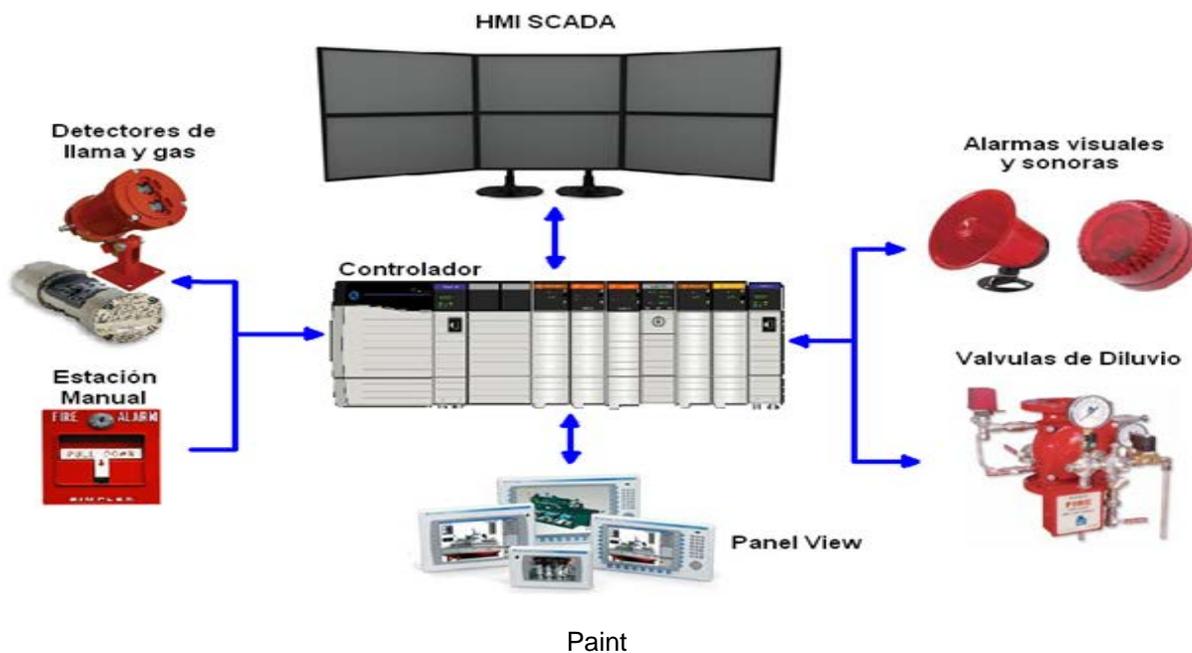


Figura 1.2 Diagrama general del sistema fuego & gas y de sus subsistemas

El sistema contra incendio de la esfera tiene operación automática originada por la detección de llama y/o alta concentración de volumen de gas. También la operación del sistema se puede hacer de forma manual remota con el operador desde el HMI ubicado en el cuarto de control de GLP. Con este se operan las válvulas de diluvio que suministran agua a los sistemas de anillos, de lanzas de agua y/o de columnas. Además para este sistema se van a instalar alarmas en el cuarto de control y en el campo para indicar emergencia de incendio y/o altas concentraciones de gas y se distribuirán según como lo recomiendan las normas del caso.

Capítulo 2: Meta y objetivos

En este capítulo se hace referencia a los aspectos de mayor amplitud a los cuales el proyecto pretende hacer una contribución. Al igual se indica de manera concreta e informativa el sistema que se va a desarrollar para resolver el problema planteado, de tal forma que se informe sobre la principal tarea o función que debe realizar el sistema por desarrollar. ^[17]

2.1 Meta

Crear un ambiente de mayor seguridad para la esfera YT-7711 al implementar un sistema automatizado contra emergencias de fuego y altas concentraciones de gas.

2.2 Objetivo General

Diseñar un sistema automatizado de protección contra emergencias de fuego y gas, basado en las normas API, NFPA y similares para el tanque esférico YT-7711, de RECOPE.

2.3 Objetivos específicos

- Elaborar las especificaciones y requerimientos de diseño del sistema contra incendio.
- Diseñar el lazo de control que cumpla con el algoritmo, prioridades de comunicación y la secuencia lógica de activación basados en los requerimientos del sistema.
- Definir los sensores y alarmas para el sistema de control que cumpla con los requerimientos establecidos por RECOPE.
- Sistematizar el sistema en una interfaz hombre-máquina.
- Diagnosticar los planos y documentos técnicos del sistema contra incendio, basándose en el esquema general de los lineamientos que el contratista debe seguir.

Capítulo 3: Marco teórico

En este capítulo se explican los principales temas relacionados con el sistema de fuego & gas para la esfera YT-7711. Se destacan aspectos de la solución como el uso de tecnología de punta y se examinan aspectos físicos, matemáticos y electrónicos del sistema desarrollado.

3.1 Descripción del sistema

Se procedió a determinar la manera en que opera el tanque esférico YT-7711, esto mediante entrevistas a los ingenieros del proyecto SAGAS, estudio y análisis de los planos de los diagramas de tubería e instrumentación y con base en observaciones de campo en el plantel de la refinería. De esta manera se obtuvo la siguiente información:

La esfera YT-7711 tiene como función recibir, almacenar y trasegar gas licuado de petróleo. En la figura 3.1 se presenta un diagrama general de la conexión de los procesos: múltiple de entrada, múltiple de transferencia y múltiple de ventas. Estos procesos son los necesarios para que la esfera YT-7711 y demás esferas existentes (YT-770, YT-771, YT-7710) cumplan con su función de recibir, almacenar y trasegar gas licuado de petróleo.



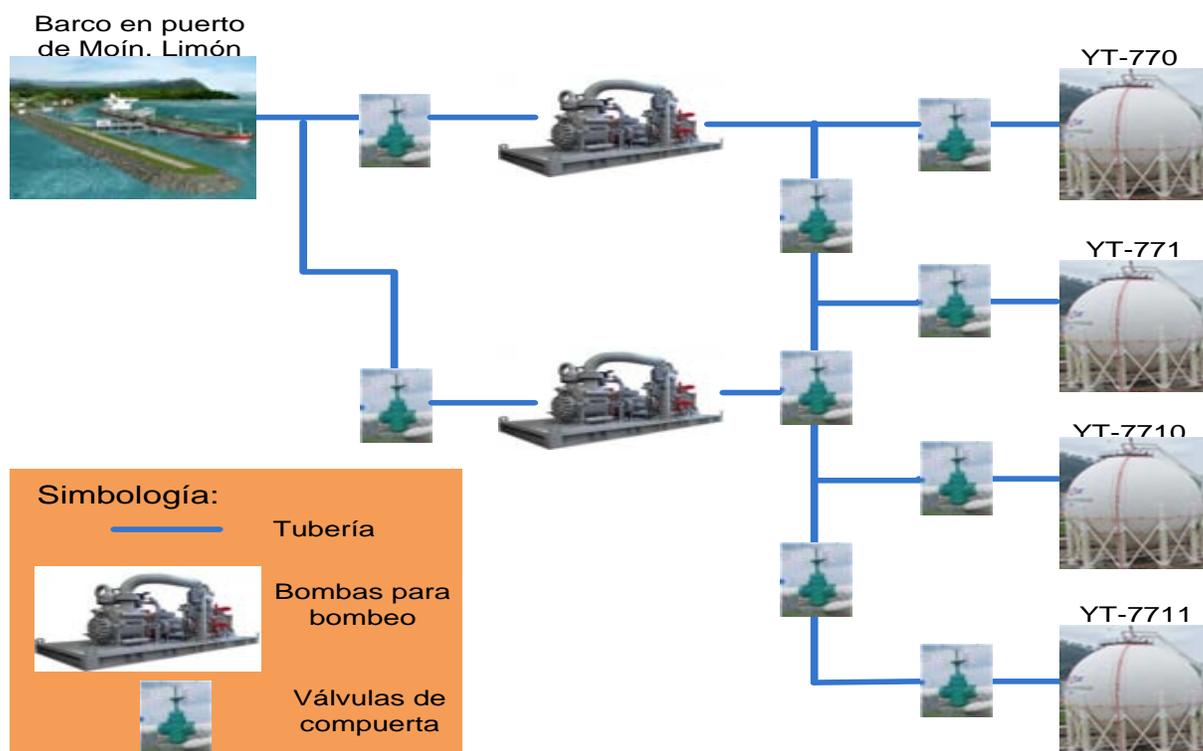
Microsoft Visio

Figura 3.1 Diagrama general del proceso de entrada, transferencia y venta de GLP

A continuación se procede a explicar de manera general cada uno de estos procesos:

3.1.1 Proceso múltiple de entrada:

El producto (GLP) llega en barco al muelle de Moín, en Limón, CR. Una vez posicionado el barco en el muelle, se conecta una manguera que transfiere el producto del barco a la tubería de RECOPE y a partir de allí por medio de bombas y válvulas de compuerta se transporta el GLP ya sea a la esfera YT-7711 y/o demás esferas existentes (YT-770, YT-771, YT-7710), según sea la necesidad del plantel. En la figura 3.2 se muestra un diagrama básico del proceso de entrada.

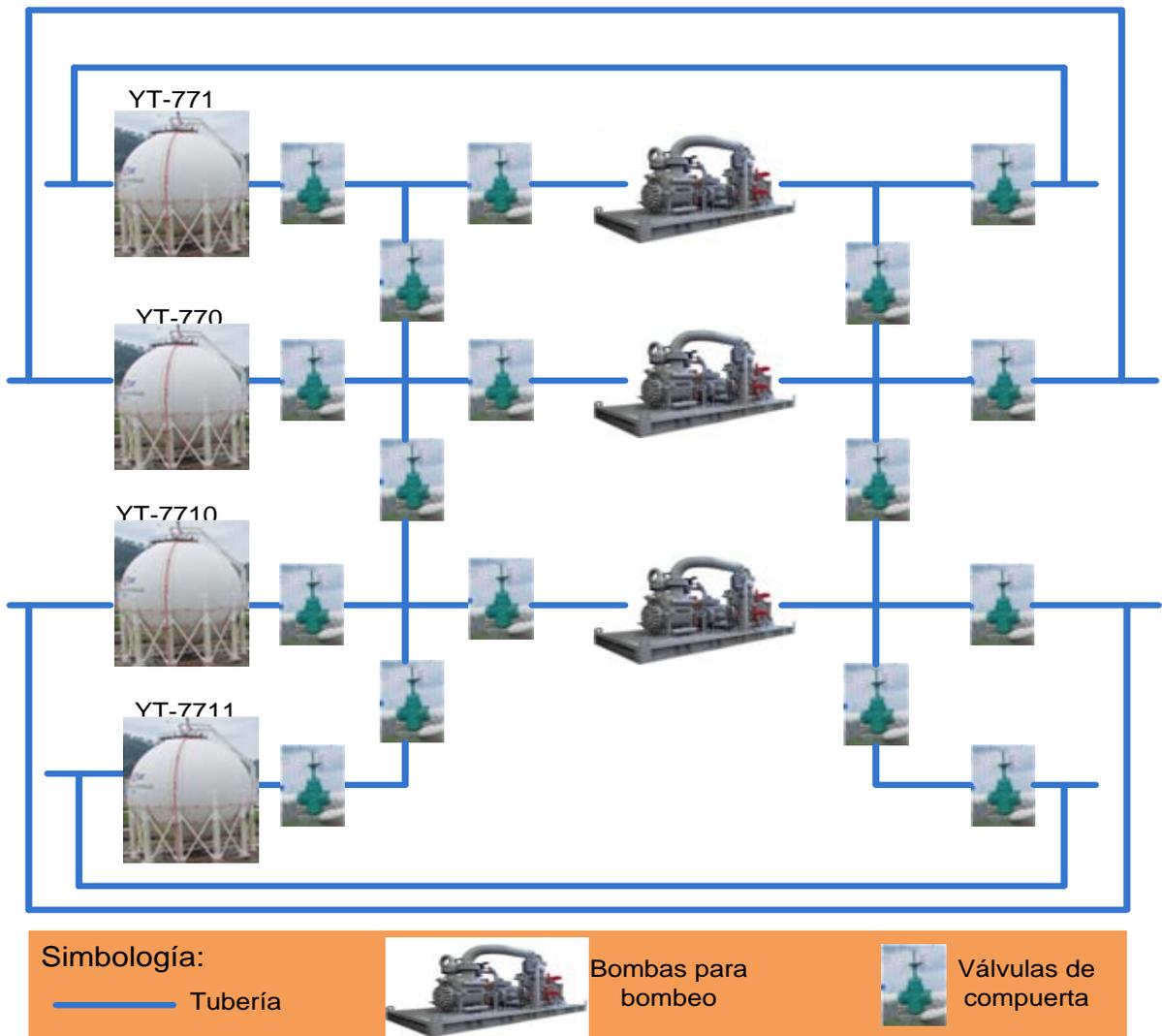


Microsoft Visio

Figura 3.2 Diagrama básico del proceso de entrada

3.1.2 Proceso de transferencia

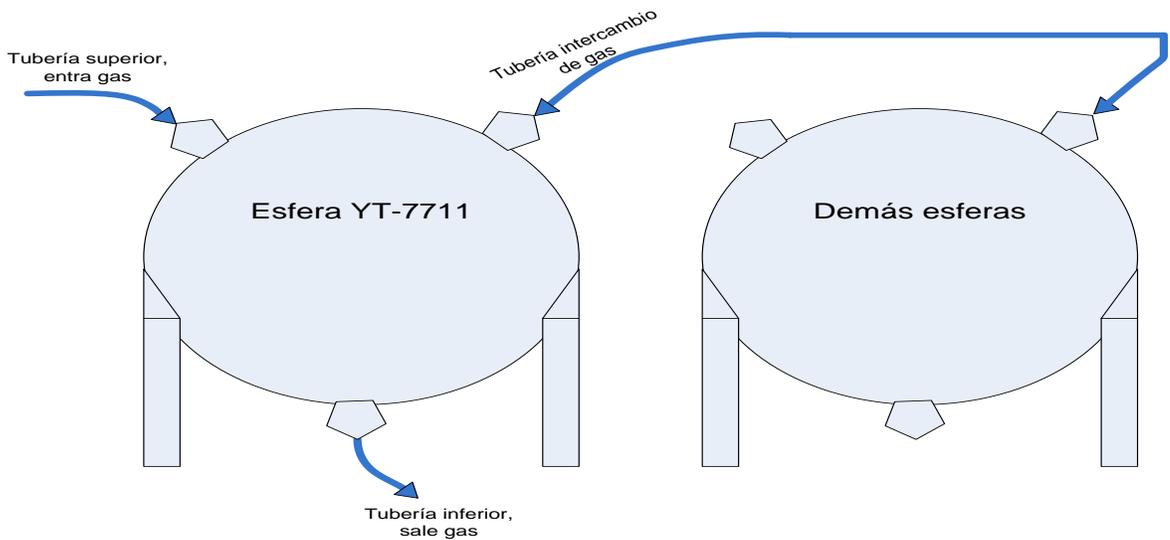
El proceso de transferencia es el encargado de pasar el gas licuado de petróleo de una esfera a otra. Este proceso cuenta con tres bombas y un sistema de válvulas de compuerta que al accionar y abrirlas se elige el camino por el cual va a pasar el producto. Con esto se puede escoger de cual esfera saco el GLP y a cual le introduzco el GLP. Este proceso se muestra en la figura 3.3.



Microsoft Visio

Figura 3.3 Diagrama básico de proceso de transferencia

La esfera YT-7711 y demás esferas tienen una tubería superior que se utiliza para llenar la esfera de GLP y por debajo se tiene una tubería que se utiliza para sacar el GLP de las esferas. También existe una tubería de intercambio de gas, que conecta todas las esferas. Esta tubería es la encargada de transportar el gas entre esferas ya sea para subir la presión o para bajar la presión dentro de las esferas. En la figura 3.4 se muestra el diagrama de la tubería de entrada, salida e intercambio de GLP para la esfera YT-7711.

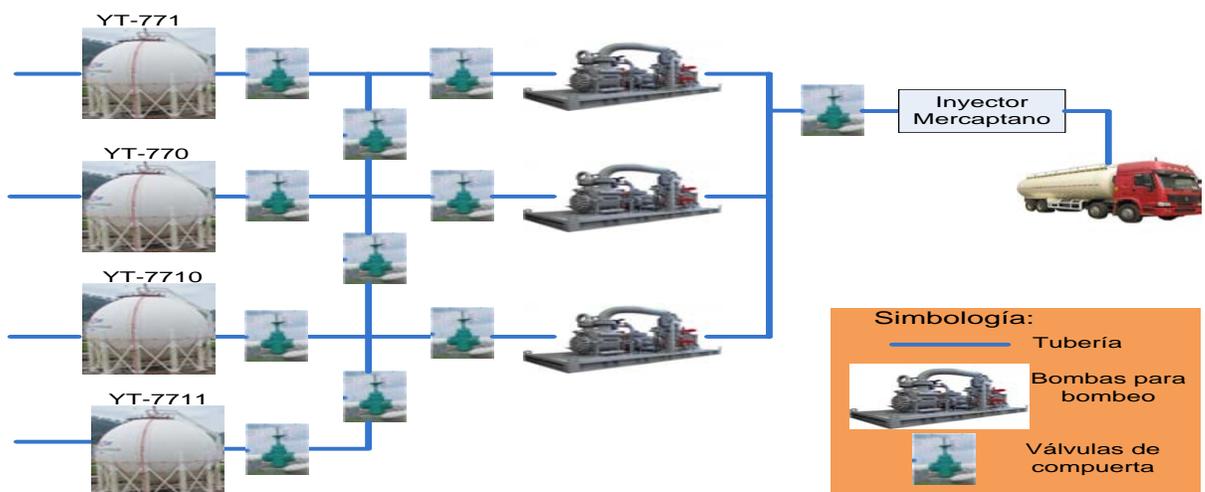


Microsoft Visio

Figura 3.4 Tubería de entrada, salida e intercambio de GLP para la esfera YT-7711

3.1.3 Proceso de Ventas

Para el proceso de ventas se extrae el GLP por la tubería inferior, utilizando tres bombas y un sistema de válvulas de compuerta, que al accionar y abrirlas se elige el camino por el cual va a pasar el producto. Casi al final de este proceso se le inyecta mercaptano, el cual es el encargado de darle olor al producto, para después ser almacenado en los camiones cisternas que se encargan de transportarlo a su destino final. En la figura 3.5 se muestra el diagrama básico para el proceso de ventas.



Microsoft Visio

Figura 3.5 Diagrama Básico del proceso de ventas

3.1.4 Arquitectura general de red

El sistema contra incendio forma parte de otros sistemas que requiere la esfera YT-7711 para su adecuado funcionamiento. Ejemplo de estos, es el sistema de procesos y sistema de seguridad. En la figura 3.6 se muestra la arquitectura general de red de todos los sistemas que va tener la esfera YT-7711. En esta siempre se trata de mantener redundancia de segundo nivel, esto se nota al observar que se tienen dos servidores para cada sistema, dos switches, dos clientes, entre otros. Esta redundancia de segundo nivel es sumamente importante mantenerlo, ya que se está trabajando con sustancia altamente inflamable y es necesario mantener un alto nivel de confiabilidad, seguridad y robustez, para disminuir la probabilidad de que ocurra un accidente y estar seguros de poder responder adecuadamente si sucede uno.

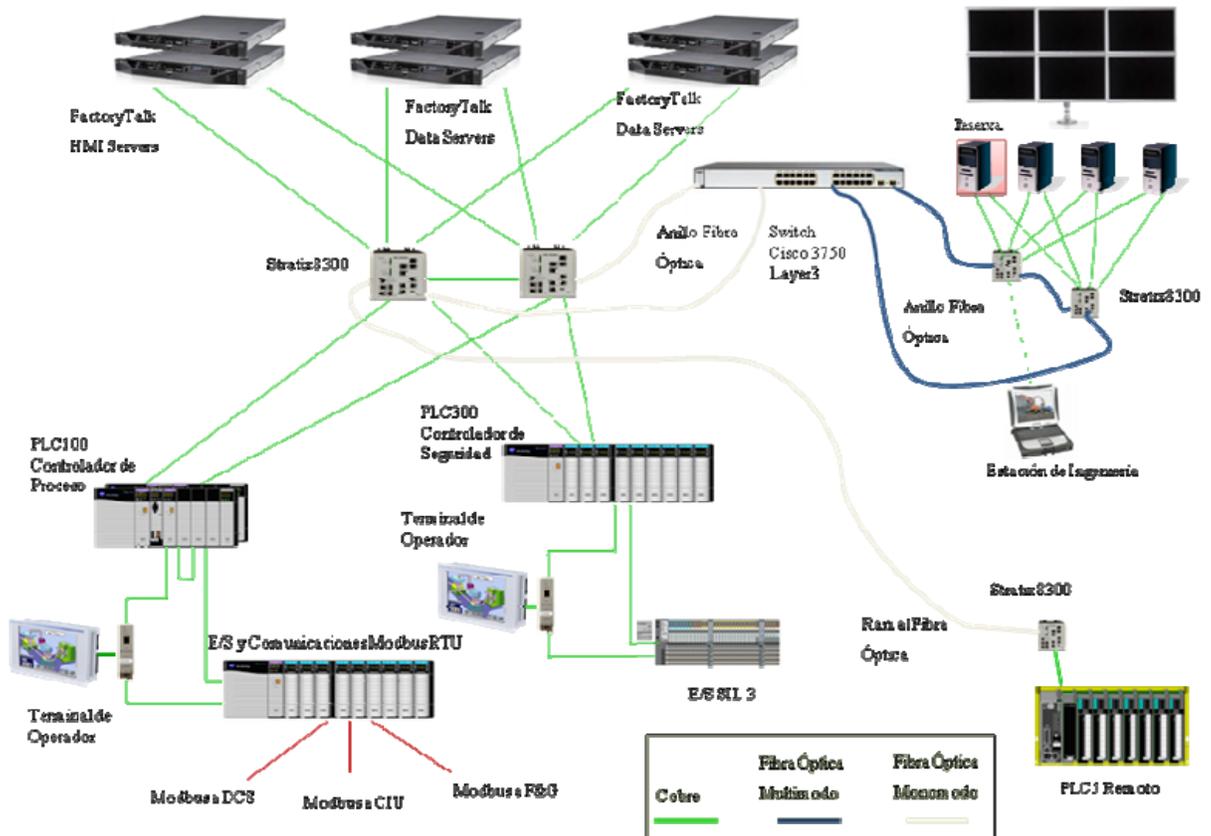


Figura 3.6 Arquitectura general de red

No se va entrar a detalle con la arquitectura de red mostrada en la figura 3.6 porque no forma parte del alcance para desarrollar el sistema contra incendio, pero es importante mostrar esta arquitectura para tener una idea del sistema total del cual forma parte el sistema contra incendio desarrollado en este proyecto. Donde se van a tener diferentes controladores programables, servidores, switches, paneles de visualización, en general equipo de alta tecnología, robustos y con alto nivel de seguridad, lo necesario para entrar a operar en un plantel de refinería.

Esta arquitectura general de red toma en consideración, no solo la esfera YT-7711 sino que también otro proyecto realizado por RECOPE en paralelo, como lo es la construcción de seis recipientes cilíndricos horizontales (RCH) con capacidad de almacenamiento de 255mm³. También existe otro proyecto a futuro que consiste en la construcción de 4 esferas más (YT-7712, YT-7713, YT-7714 y YT-7715) con la misma capacidad de almacenamiento que la esfera YT-7711.

Los proyectos anteriormente mencionados son para almacenamiento de GLP. Es por esta razón que el sistema contra incendio desarrollado para la esfera YT-7711 puede aplicarse de manera muy similar a los RCH's que se están construyendo y a las futuras esferas. Los equipos e instrumentos de control utilizados en este proyecto de sistema contra incendio, pueden ser los mismos para los demás recipientes, debido a la similitud en los procesos de funcionamiento y que se encuentran en la misma área clasificada.

3.1.5 Propiedades del gas licuado de petróleo

En la sección 1.6 de la API 2510 "Consideraciones de protección contra incendio para el diseño y operación de gas licuado de petróleo (GLP) para instalaciones de almacenamiento" se describen las propiedades que posee el GLP, las cuales son necesarias de conocer para entender la sustancia con la que se está tratando y así poder realizar las medidas correctas de protección. Entre estas propiedades cabe señalar que a temperatura normal, dígase 20°C y a presión atmosférica (1 atm ó ≈ 101325 Pa), el GLP se encuentra en estado gaseoso.

Es posible convertir el GLP a un estado líquido, ya sea manteniendo la sustancia bajo presión moderada o bajando la temperatura lo suficiente para que se efectúe la condensación. Esta propiedad es la que permite transportar el GLP en forma líquida para luego ser usado en su forma de vapor.

Para obtener líquido a presión atmosférica (1atm): si se trabaja con Butano se debe mantener la temperatura menor a -0.5°C y si se trabaja con Propano la temperatura debe ser menor de -42.2°C .

De igual manera para obtener líquido a temperatura normal (20°C): si se trabaja con Butano se debe mantener la presión atmosférica mayor de 2 atmósferas ($\approx 202634\text{Pa}$) y para Propano esta debe ser mayor de 8 atmósferas ($\approx 810537\text{Pa}$).

A continuación en la tabla 3.1 se muestra una comparación de varios tipos de combustibles, como lo son el gas natural licuado (GNL), GLP y gasolina. Esto con el fin de dar una idea de las características que posee el GLP con respecto a otros combustibles también utilizados en el consumo nacional.

Tabla 3.1 Comparación de propiedades de GLP con otros combustibles ^[20]

Riesgo	GNL	GLP	Gasolina
Tóxico	No	No	Sí
Cancerígeno	No	No	Sí
Inflamable	Sí	Sí	Sí
Forma nubes de vapor	Bajo circunstancias especiales	Sí	Sí
Asfixiante	Sí, en espacios confinados	Sí, en espacios confinados	No
Otros riesgos a la salud	No	No	Irritación en los ojos,
Punto de inflamación $^{\circ}\text{C}$	-188	-104	-45
Punto de ebullición $^{\circ}\text{C}$	-161	-42	32
Límites de explosividad en el aire (%)	5-15	2.1-9.5	1.3-6
Presión almacenada	Ambiente	A presión	Ambiente
Comportamiento si se derrama	Se evapora, formando nubes visibles que se dispersan fácilmente	Se evapora, formando nubes de vapor que se dispersan lentamente	Forma una piscina inflamable, limpieza ambiental requerida

La esfera YT-7711 va a contener una relación GLP de 60-40. Esto quiere decir que el producto va a ser compuesto de 60% Propano y 40% Butano. También va a contener otros elementos en proporciones menores como lo son etanol, i-propano, entre otros, pero estos son considerados no deseados y serán enviados a una antorcha para ser quemados y liberados a la atmósfera. Estos elementos no deseados se queman primero antes de ser liberados porque así son menos contaminantes.

Otra propiedad importante del GLP es que un galón de propano líquido se transforma en 270 galones de gas y un galón de butano líquido se transforma en 230 galones de gas. Es por esta propiedad que el GLP se almacena y transporta en condición de líquido.

La presión dentro de la esfera para mantener el GLP en estado líquido va a ir variando según la relación de propano-butano que se tenga. Para nuestro caso de 60-40 la presión va a ser alrededor de los 132 psi que son aproximadamente 910140 Pa. La presión crítica para esta condición está alrededor de los 145 psi, es decir unos 999775 PA. Por supuesto por razones de seguridad la esfera está diseñada para soportar presiones mayores a la crítica, llegando a soportar un poco más de 200 psi lo cual equivale a 1.379 MPa.

Las concentraciones de GLP en vapor son más pesadas que el aire, es decir una vez liberado el GLP al aire, este va a buscar irse a la parte más baja posible desplazando al aire que se encuentre en esa zona. Esta propiedad es aprovechada para desplazar el GLP por medio de drenajes hacia una zona de ambiente controlado y disminuir el peligro de explosión, esto se explica a detalle en el capítulo 5 "Descripción detallada de la solución". También cabe señalar que la densidad en forma líquida es aproximadamente la mitad de la del agua, por lo que entonces, en un lugar donde se tengan ambas sustancias el agua se iría hacia el fondo y el GLP se concentraría en la superficie del agua.

Además el GLP cuando se evapora no deja residuos y si el GLP es puro tiene la propiedad que no es corrosivo al metal y generalmente no corrosivo a aleaciones de

cobre. Sin embargo cuando están presentes azufre u otras impurezas la corrosión puede ser un problema serio. También hay que tomar en cuenta que el GLP no tiene propiedades de lubricación por lo que es necesario para su desplazamiento el uso de bombas, compresores, entre otros instrumentos.

Para terminar con las propiedades más importantes del GLP cabe señalar que este no posee color ni olor, razón por la cual se le agrega mercaptano (para darle olor al GPL) antes de ser enviado a los camiones cisternas para que el usuario final pueda identificar fugas. Dentro de la refinería para identificar fugas se tienen sensores fijos especiales para detectar gas y también operadores instruidos para desplazarse dentro del plantel haciendo lecturas de concentración de gas con instrumentos móviles para detectar cualquier fuga.

3.2 Antecedentes bibliográficos

Los sistemas electrónicos han evolucionado para que los procesos de alto riesgo tengan un ambiente más seguro, al implementar un sistema inteligente con tecnología de punta. Características como flexibilidad, mayor capacidad en dispositivos, tecnologías que simplifique el tiempo de reacción y la utilización de sistemas en múltiples aplicaciones, han hecho del control automático uno de los campos de mayor desarrollo actualmente.

Hoy en día los controladores no solo dominan la lógica de funcionamiento de máquinas, plantas y procesos industriales, sino que también pueden realizar operaciones aritméticas, manejar señales discretas y analógicas para realizar estrategias de control seguro.

El poder controlar un proceso de seguridad con un sistema que sea estable, robusto y flexible, al que se le pueden agregar distintos módulos conforme la aplicación así lo requiera, que se le pueda crear, editar y agregar secciones de código independientes para su programación en cualquier momento de la etapa de diseño o posterior a esta para su mantenimiento y que pueda controlar distintos procesos con un mismo

hardware, garantizando así la escalabilidad de un sistema de control, ha sido el aspecto relevante que los controladores brindan y que éste proyecto requiere.

Aunque los controladores están en el mercado desde hace ya mucho tiempo, es importante observar las actualizaciones y mejoras en estos. Evoluciones en hardware como el alto nivel de procesamiento matemático, software optimizado para monitorizar en tiempo real las señales, instrucciones para control automático, manejo de archivos y palabras ASCII. Además de la compatibilidad con una gran variedad de sensores para uso industrial, interfaces gráfica para el control de procesos (HMI), opciones de comunicación con otros controladores y computadoras a través de diferentes y variados protocolos de comunicación como Modbus, Profibus, DeviceNet, Ethernet/IP, entre otros; o de manera serial con estándares como RS-232, RS-485, RS-422 entre otros. Estas son opciones que la solución de este proyecto tiene disponibles y lo ponen a la altura de la tecnología actual.

3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema

Como se muestra en la figura 1.2 se tiene todo un conjunto de sensores capaces de detectar llama y altas concentraciones de gas en el sistema. Estos automáticamente envían una señal al controlador en caso que detecte una situación de emergencia, para que el sistema de fuego y gas utilice sus actuadores finales y así se logre eliminar la situación de peligro. También el sistema va ser capaz de activarse remotamente, utilizando el sistema Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA, por sus siglas en inglés), que por medio de una interfaz HMI, se puede monitorear y controlar los procesos e instrumentos del sistema de fuego y gas.

3.3.1 Sensores

Los sensores tienen encomendada la función de realizar mediciones en un sistema de control, la cual es fundamental para poder llevar a cabo el control en un proceso.

El sensor produce en sí mismo un fenómeno mecánico, eléctrico o similar, el cual relaciona con la variable de proceso que se está midiendo. [38]

Existen términos importantes que se relacionan con los sensores, los cuales son: el rango, la escala y el cero del instrumento. La escala del instrumento consiste en los valores mayor y menor de la variable a medir del proceso. El rango del instrumento es la diferencia entre estos valores mayor y menor de la escala. El valor inferior de medición de la escala se conoce como cero del instrumento, cabe destacar que este valor no necesariamente debe ser cero para llamarlo así.

Entre los sensores más comunes en los procesos de hoy en día se tienen los de temperatura, flujo, presión y nivel; de estos sensores es sumamente importante para los procesos de control conocer los parámetros que describen su comportamiento. Una de las características principales de un sensor es la ganancia, la cual se puede decir que es la relación del rango de la entrada respecto al rango de la salida en caso de que el sistema de control sea lineal. La ecuación 3.1 muestra esta relación entre rangos para obtener la ganancia.

$$K = \frac{\text{Rango salida}}{\text{Rango entrada}} \quad (3.1)$$

Existen procesos que son no lineales como por ejemplo la medición de flujo a través de un sensor diferencial de presión, para este caso en específico se tiene que la ganancia está dada por la ecuación 3.2.

$$K = \frac{32}{(F_{max})^2} \bar{F} \quad (3.2)$$

Dónde:

\bar{F} = Promedio de flujo volumétrico
 F_{max} = Flujo máximo

En esta expresión se aprecia que la ganancia no es constante y que está en función del flujo promedio; tanto mayor sea el flujo, mayor será la ganancia.

También cabe señalar que de manera general la respuesta dinámica de la mayoría de los sensores es mucho más rápida que la del proceso, con lo cual sus constantes de tiempo y tiempo muerto se pueden considerar despreciable y por ende su función de transferencia la da la ganancia pura. Al analizar la dinámica, la función de transferencia del instrumento generalmente se representa mediante un sistema de primer orden como se muestra en la ecuación 3.3.

$$G(s) = \frac{K}{\tau*s+1} \quad (3.3)$$

Dónde:

K: Ganancia sensor

τ : constante de tiempo del sensor

Para el sistema contra incendio desarrollado, la misma función de enviar una señal al controlador cuando se detecta llama lo realiza la estación manual, la diferencia consiste en que este último se activa manualmente con la acción de un operador, una vez que este haya detectado una situación de emergencia.

3.3.2 Panel de visualización y sistema SCADA

Por medio de los paneles de visualización, los operadores puede informarse sobre datos y estado de los distintos dispositivos que son manipulados por los controladores utilizados en los diferentes campos de la industria. Es decir, son utilizados para establecer comunicación entre el controlador lógico programable y el usuario del proceso ubicado en el campo. Aparte de brindar datos, con los paneles de visualización se puede activar y desactivar manualmente los actuadores finales, por ejemplo en este proyecto actúa sobre las válvulas de diluvio que suministran agua a los sistemas de anillos, de lanzas de agua y/o de columnas de la esfera. Este sistema de visualización y control utilizado para el desarrollo de este proyecto se comunica con el controlador por medio del protocolo de comunicación ModBus y se ubica en la parte frontal del gabinete que contiene al controlador de fuego y gas en el cuarto de control de GLP.

El sistema SCADA cumple la misma función que el panel de visualización, solo que es más detallado, informando al operador a través de pantallas (mímicos, alarmas y otras) del HMI el estado de equipos, recipiente y las líneas de ductos. Así el operador puede supervisar y aplicar los correctivos necesarios a los diferentes sistemas de manejo y almacenamiento de GLP.

3.3.3 Válvulas de control

Las válvulas de control se utilizan como elementos finales de control y son las más utilizadas en las plantas de proceso, donde se deben manejar los flujos para mantener en los puntos de control las variables que forman parte del proceso y que se deben controlar. Mediante el cambio en la apertura de estas válvulas se regula el flujo.

Una vez entendido el tipo de proceso que se desea controlar es necesario escoger el tipo de válvula que se va a utilizar y la acción que esta va a tomar en caso de falla de energía. Aquí es donde se introduce el concepto de normalmente cerrada o normalmente abierta. En el caso de normalmente cerrada se tiene que al fallar la energía la válvula se cierra completamente y para el caso de normalmente abierta se tiene lo contrario, al fallar la energía la válvula se abre. La decisión del tipo de válvula con la que se desee trabajar, debe ser basada como primer factor en la seguridad de la planta entera donde se realiza el proceso.

3.3.4 Dimensionamiento de la válvula de control

El dimensionamiento de la válvula de control es el procedimiento mediante el cual se ejerce el cálculo del coeficiente de flujo de la válvula (C_V), este se puede definir como la cantidad en volumen de líquido que fluye por unidad de tiempo cuando la válvula se encuentra completamente abierta. Cuando ya se calculó el C_V requerido y se conoce el tipo de válvula que se va a utilizar, el ingeniero puede obtener el tamaño de la válvula con base en el catálogo del fabricante.

Se debe tener cuidado con este último punto, porque aunque todos los fabricantes utilizan el método C_v para dimensionamiento de las válvula, las ecuaciones para obtener este coeficiente pueden presentar algunas diferencias de un fabricante a otro. La mayor diferencia entre ecuaciones para dimensionar las válvulas utilizadas se da con las que trabajan con fluidos que se comprimen (gas, vapor o vapor de agua).

Utilizando la ecuación 3.4 se puede dimensionar una válvula de control que se utiliza para líquidos, esta ecuación por lo general es la misma para todos los fabricantes.

$$f = C_v \sqrt{\frac{\Delta P}{G_f}} \quad (3.4)$$

Dónde:

f = el flujo del líquido en galones por minuto (gpm).

C_v = coeficiente de flujo de la válvula

ΔP_i = la caída de presión P_1-P_2 a través de la válvula en psi

G_f = la gravedad específica del líquido a las condiciones del flujo (temperatura, presión, entre otras)

Conociendo el flujo al cual trabaja el proceso en condiciones normales, de la ecuación 3.4 se puede despejar el coeficiente de flujo de la válvula quedando la expresión de la ecuación 3.5.

$$C_v = f \sqrt{\frac{G_f}{\Delta P}} \quad (3.5)$$

Existen otros argumentos, tales como correcciones de viscosidad, de vaporización instantánea y de cavitación, en la elección de las válvulas de control que se utilizan con líquidos.

Por último para el dimensionamiento de válvulas de control por medio del cálculo de C_v es recomendable dimensionar una válvula que cuando se abra completamente el flujo que pasa a través de ella sea más del que se requiere en condiciones normales de operación, se debe tomar esta medida en caso de que se requiera más flujo por razones específicas.

3.3.5 Características de flujo de la válvula de control

Para alcanzar un buen control, ayuda tener un proceso completo que tenga un comportamiento constante hasta donde sea posible, es decir la constante de tiempo, la ganancia y el tiempo muerto deben ser tan constantes como sea posible. Otra manera de expresar este punto es que se debe acercar el proceso a un sistema lineal a pesar de la no linealidad del mismo, esto se logra al reducir las características no lineales del sensor, el transmisor y la unidad de proceso que conforman el sistema.

Se puede definir la característica de flujo de la válvula de control como la relación entre el flujo a través de la válvula y la posición de la misma conforme varía la posición de 0% a 100%. Hay dos tipos de características de flujo, la primera es la característica de flujo inherente y la segunda se llama característica de flujo en instalación.

La característica de flujo inherente se observa cuando existe una caída de presión constante a través de la válvula. La segunda se refiere a la característica que se obtiene cuando la válvula está en funcionamiento y hay variaciones en la caída de presión, así como otros cambios en el sistema.

La figura 3.7 muestra tres de las curvas más comunes de característica de flujo inherente.

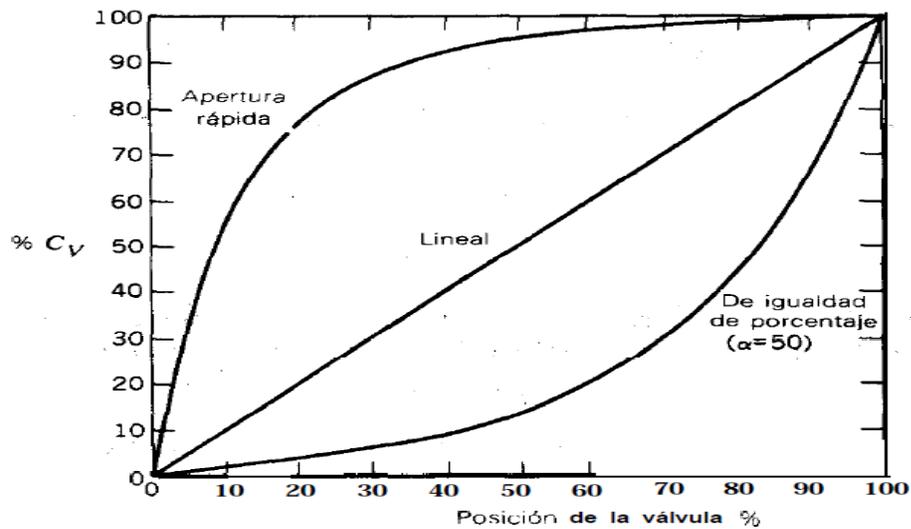


Figura 3.7 Curvas de las características de flujo inherente ^[37]

Al analizar la figura 3.7 se puede deducir que la característica de flujo lineal produce un flujo directamente proporcional al desplazamiento de la válvula, o posición de la válvula, es decir con un 70% de desplazamiento, el flujo es el 70% del flujo máximo. Este tipo de válvula se usa comúnmente en circuitos de nivel de líquido y en otros procesos en los que la caída de presión a través de la válvula es bastante constante.

Para la característica de flujo de porcentaje igual se puede notar que existe un cambio muy pequeño al inicio del desplazamiento de la válvula, pero conforme la posición de la válvula se abre hasta alcanzar la posición de abertura máxima, el flujo aumenta rápidamente. Este tipo de válvula son posiblemente las más comunes y se utilizan generalmente en procesos donde se esperan grandes variaciones en la caída de presión.

Por último observando la figura 3.7 se tiene que la característica de flujo rápido de abertura produce un gran flujo con un pequeño desplazamiento de la válvula. Se puede notar que la curva es lineal en la primera parte del desplazamiento, con una pendiente pronunciada. Es por estas cualidades que la válvula de abertura rápida no es buena para la regulación de flujo. Esta válvula es utilizada principalmente en procesos de abierto-cerrado, donde se requiere un gran flujo tan pronto como la válvula se comienza a abrir.

Para una válvula instalada en un sistema de tubería, cabe señalar que la caída de presión a través de ella se va cambiando conforme varía el flujo y con esto también varían las características de la válvula, esto es lo que se conoce como características en instalación. Esta caída de presión en la válvula y en el sistema está dada por la ecuación 3.6.

$$\Delta P_o = \Delta P_v + \Delta P_L \quad (3.6)$$

En la ecuación 3.7 y ecuación 3.8 se muestra la expresión para calcular las caídas de presión presentes en la ecuación 3.6.

$$\Delta P_L = K_L * G_f * f^2 \quad (3.7)$$

$$\Delta P_v = G_f \frac{f^2}{C_v^2} \quad (3.8)$$

Dónde:

ΔP_L : caída de presión debido a fricción, tuberías, equipo, entre otros.

ΔP_v : caída de presión debido a la válvula.

f: flujo a través de la válvula.

K_L : constante de fricción para la línea.

G_f : gravedad específica del líquido.

Para la válvula lineal se puede relacionar el coeficiente C_v con la posición de la válvula, esta expresión se muestra en la ecuación 3.9.

$$C_v = C_v |_{V_p=1} (V_p) \quad (3.9)$$

También para la válvula de porcentaje se puede relacionar el coeficiente C_v con la posición de la válvula con la ecuación 3.10.

$$C_v = (C_v |_{V_p=1}) * \alpha^{V_p=1} \quad (3.10)$$

3.3.6 Respuesta al impulso y funciones de transferencia de sistemas lineales

Una manera común de modelar sistemas lineales es utilizar funciones de transferencia para representar las relaciones entrada-salida entre variables. La función de transferencia se puede determinar empleando la respuesta al impulso, que se define a continuación:

Respuesta al impulso

Al tener un sistema lineal invariante en el tiempo con una entrada $u(t)$ y una salida $y(t)$, el sistema se puede caracterizar por su respuesta al impulso $g(t)$, que se define como la salida cuando la entrada es una función impulso unitario $\delta(t)$. Una vez que se conoce la respuesta al impulso de un sistema lineal, la salida del sistema, $y(t)$, para cualquier entrada, $u(t)$, se puede encontrar mediante la función de transferencia.

Función de transferencia

La función de transferencia de un sistema lineal invariante con el tiempo se define como la transformada de Laplace de la respuesta al impulso, con todas las condiciones iguales a cero. Siendo $G(s)$ la función de transferencia de un sistema con una entrada y una salida se define como:

$$G(s) = L[g(t)] \quad 3.11$$

La función de transferencia $G(s)$ se relaciona con la transformada de Laplace de la entrada y la salida a través de la siguiente relación:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad 3.12$$

Con todas las condiciones iniciales puestas a cero, $Y(s)$ y $U(s)$ son las transformadas de Laplace de $y(t)$ y $u(t)$, respectivamente. A continuación se mencionan algunas de las propiedades de la función de transferencia:

- La función de transferencia está definida solamente para un sistema lineal invariable con el tiempo. No está definida para sistemas no lineales.
- La función de transferencia entre una variable de entrada y una variable de salida de un sistema está definida como la transformada de Laplace de la respuesta al impulso.
- La función de transferencia entre un par de variables de entrada y salida es la relación entre la transformada de Laplace de la salida y la transformada de Laplace de la entrada.
- Todas las condiciones iniciales del sistema son iguales a cero.
- La función de transferencia de un sistema en tiempo continuo se expresa sólo como una función de la variable compleja s .
- Para sistemas en tiempo discreto modelados por ecuaciones en diferencias, la función de transferencia es una función de z cuando se emplea la transformada z .

3.3.7 Diagramas de bloques

Debido a que son simples y versátiles, los diagramas de bloques se emplean, con frecuencia, para modelar todo tipo de sistemas. Un diagrama de bloques puede ser utilizado simplemente para describir la composición e interconexión de un sistema, o junto con funciones de transferencia se puede emplear para describir las relaciones causa y efecto a través de todo el sistema. Los diagramas de bloques se pueden utilizar para el modelado de sistemas lineales así como el de no lineales.

En general, los dispositivos realizan operaciones matemáticas simples como suma, resta, multiplicación y algunas veces combinaciones de éstas. En la siguiente figura se muestra la representación en diagrama de bloques de estas operaciones.

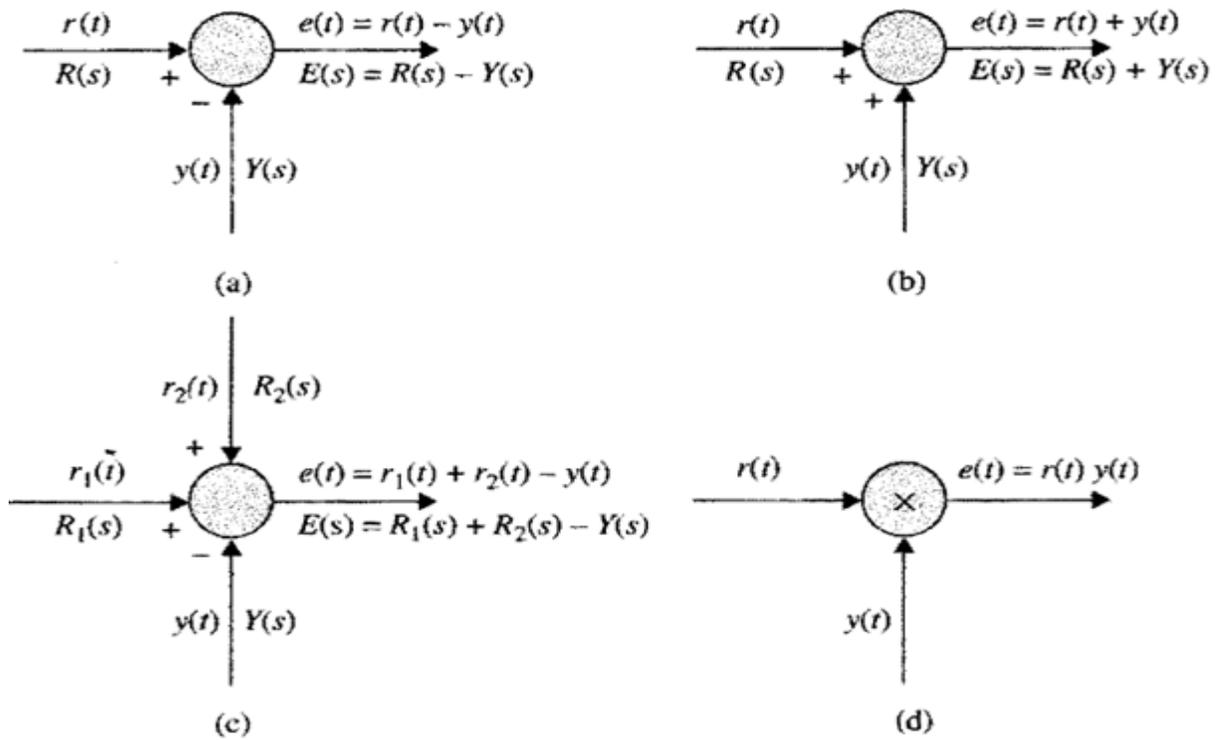


Figura 3.8 Operaciones de un diagrama de bloques de dispositivos típicos de detención de sistemas de control. (a) Resta. (b) Suma. (c) Suma y resta. (d) Multiplicación.^[23]

Las operaciones de suma y resta de la figura anterior son lineales, por lo que las variables de entrada y salida de estos elementos del diagrama de bloques pueden ser variables en el dominio del tiempo o variable en términos de la transformada de Laplace. En la figura 3.8 (a), el diagrama de bloque implica que:

$$e(t)=r(t)-y(t) \quad (3.13)$$

O

$$E(s)=R(s)-Y(s) \quad (3.14)$$

3.3.8 Función de transferencia de la válvula de control

Ya abarcados los aspectos mencionados hasta el momento, se tiene que la función de transferencia para una válvula de control está dado por la ecuación 3.15, que se muestra a continuación.

$$G_v(s) = \frac{K_v}{\tau_v * s + 1} \quad (3.15)$$

Donde:

K_v : ganancia de la válvula.

τ_v : Constante de tiempo de la válvula.

Y se tiene la relación mostrada en la ecuación 3.16.

$$K_v = 0,865 * C_v \quad (3.16)$$

Recordando que C_v es el coeficiente de flujo de la válvula.

3.3.9 Control automático de procesos

El control automático de procesos tiene como objetivo mantener en determinado valor de operación las variables del proceso tales como: temperatura, presiones, flujos, entre otras. Estas variables son de naturaleza dinámica, en ellos siempre ocurren cambios y siempre se deben relacionar con los términos de seguridad y producción especificados en las condiciones de diseño. El concepto de control automático de proceso se fundamenta en tener uno o una serie de instrumentos que controlen las variables sin necesidad de que intervenga el operador.

Existen tres operaciones básicas que deben estar en todo sistema de control, estas operaciones son:

- Medición (M): la medición de la variable que se desea controlar y por lo general se realiza mediante la combinación de sensor y transmisor.
- Decisión (D): Basado en la medición, el controlador debe tomar una decisión sobre lo que debe hacer para mantener la variable de interés, en el valor que se desea.

- Acción (A): Una vez tomada la decisión de que es lo que se va hacer, el controlador debe ejecutarla, por lo general ésta acción se realiza por el elemento final de control.

Es necesario para el diseño de sistema de control automático, tener suficientes conocimientos en la teoría de matemática y física del proceso específico con el que se trata. Al igual se hace fundamental tener conocimiento de la tecnología con la cual se llevará a cabo la implementación de dicho control. Es necesario para el sistema de control automático tener características de ser eficiente, rápido y preciso.

3.3.10 Control a lazo cerrado (realimentado)

Un control de lazo cerrado consiste en establecer una conexión o realimentación desde la señal de salida del proceso hacia la entrada del sistema. Para obtener un control más exacto, la señal controlada de salida debe ser realimentada y comparada con la entrada de referencia, y una vez efectuada esta comparación se debe enviar una señal actuante proporcional a la diferencia de la entrada y la salida a través del sistema para corregir el error. Para un control de lazo cerrado el sistema también puede contar con una o más trayectorias de realimentación como el que se acaba de describir. ^[23]

A continuación en la figura 3.9 se muestra la representación en un diagrama de bloques del control a lazo acerrado, esto con el fin de tener una idea más clara de cómo es la representación gráfica de la relación que existe entre los componentes de un sistema.

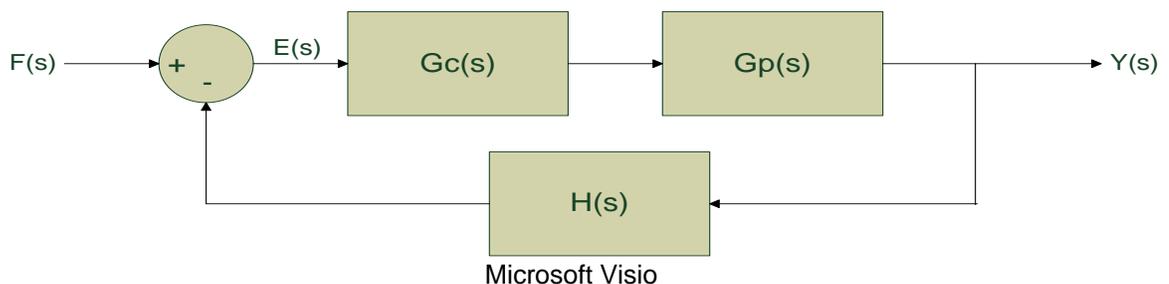


Figura 3.9 Diagrama de bloques del control a lazo cerrado

De este diagrama de bloques se tiene:

$F(s)$: Señal de entrada.

$E(s)$: Señal de error.

$Y(s)$: Señal de salida.

$H(s)$: Función de transferencia de realimentación.

$G_C(s)$: Función de transferencia del regulador o controlador.

$G_P(s)$: Función de transferencia de la planta a controlar.

De la figura 3.9 se puede deducir la función de transferencia para ese diagrama de control a lazo cerrado.

$$\frac{F(s)}{Y(s)} = \frac{G_P(s) * G_C(s)}{1 + G_P(s) * G_C(s) * H(s)} \quad (3.17)$$

En general un sistema de control a lazo cerrado posee muchas ventajas, entre ellas se puede mencionar que es más exacto y más adaptable que un sistema de control a lazo abierto, esto se debe a la implementación de la retroalimentación. La solución de este proyecto es de lazo cerrado por lo cual no es necesario profundizar en el tema de los sistemas de lazo abierto.

Uno de los efectos más importantes que la realimentación realiza sobre el sistema es reducir el error entre la entrada de referencia y la salida del sistema. El efecto general de la realimentación es que puede incrementar o disminuir la ganancia del sistema. En un sistema de control práctico y observando la ecuación 3.17, se puede ver que la función de transferencia está en función de la frecuencia, por lo tanto la magnitud de $1 + G_P(s) * G_C(s) * H(s)$ puede ser mayor que uno en un intervalo de frecuencia pero menos que uno en otro intervalo. Como resultado, la realimentación puede incrementar la ganancia del sistema en un intervalo de frecuencia pero reducirla en otro. ^[23]

Una de las características más importantes de un sistema es su estabilidad, esta describe si un sistema es capaz de seguir el comando de entrada, es decir si dicho

sistema es útil. Entonces se puede decir, que un sistema es inestable si sus salidas se salen de control. Para analizar el efecto de la realimentación sobre la estabilidad se hace referencia a la ecuación 3.17. Entonces si $G_p(s) \cdot G_v(s) \cdot H(s) = -1$, la salida del sistema es infinita para cualquier entrada finita y por ende el sistema se dice inestable. Por lo tanto puede pasar que un sistema que es originalmente estable, se convierta en inestable. Por esta razón cuando se trabaja con realimentación es necesario saber implementarlo adecuadamente, porque de lo contrario el resultado puede ser dañino. La estabilidad de un sistema es un tema muy específico para cada sistema y existen diferentes condiciones a tomar en cuenta para alcanzar el nivel de estabilidad deseado. Al incorporar la realimentación apropiadamente se puede conseguir la ventaja de estabilizar un sistema que es inestable.

3.3.11 Sistemas de control lineales y no lineales

Se puede decir que un sistema va formando su linealidad o no linealidad, de acuerdo a los métodos de análisis y diseño utilizados para desarrollarlo, aunque en la práctica, estrictamente hablando, los sistemas lineales no existen, ya que todos los sistemas físicos son no lineales en algún grado. Los sistemas de control realimentados son modelos fabricados por el analista para simplificar el análisis y diseño. Cuando las magnitudes de las señales en un sistema de control están limitadas en intervalos, en los cuales los componentes del sistema exhiben una característica lineal, se puede decir que el sistema es básicamente lineal. En el caso que las magnitudes de las señales se extienden más allá del intervalo de porción lineal, dependiendo de que tan seria es el grado de la no linealidad, el sistema no se debe seguir considerando lineal. Como ejemplo de no linealidad se puede mencionar los amplificadores usados en los sistemas de control, estos amplificadores a menudo exhiben un efecto de saturación cuando la señal de entrada es muy grande. Existe una gran cantidad de características no lineales que muy a menudo son introducidas en forma intencional en un sistema de control para mejorar su desempeño o proveer un control más efectivo. Los sistemas no lineales son difíciles de trabajar en forma matemática, y no existen métodos generales disponibles para resolver una amplia

variedad de tipos de sistemas no lineales. Por otro lado, los sistemas lineales cuentan con una gran cantidad de técnicas analíticas y gráficas para diseño y análisis. Por lo tanto para el diseño de sistemas de control, es recomendable, despreciar las no linealidades del sistema y diseñar el controlador basado en un modelo de sistema completamente lineal. Después, el controlador diseñado se aplica al modelo del sistema no lineal para ser evaluado o rediseñado utilizando simulaciones en computadora.

3.3.12 Sistemas invariantes con el tiempo y variantes con el tiempo

El sistema se denomina sistema invariante con el tiempo, cuando los parámetros del sistema de control son estacionarios con respecto al tiempo durante la operación del sistema. Aunque en la práctica, la mayoría de los sistemas físicos contienen elementos que derivan o varían con el tiempo.

Cuando las señales en varias partes del sistema son todas funciones de la variable continua tiempo t , se conoce como un sistema en tiempo continuo. Para estos tipos de sistema las señales se pueden clasificar como corriente alterna (ca) o corriente directa(cd). Al mencionar un sistema de control de ca, usualmente representa que las señales en el sistema están moduladas según algún esquema de modulación. Esto se refiere a que la información se transmite mediante una señal portadora de ca. Los sistemas de control de ca se utilizan en situaciones donde el ruido y las perturbaciones a menudo crean problemas. Por ejemplo al utilizar sistemas de control de ca modulados con una portadora de 400Hz o mayor, el sistema será menos susceptible a ruido de baja frecuencia. Algunos componentes típicos de un sistema de control de ca son: sincros, motores de ca, amplificadores, acelerómetros, entre otros. Al mencionar un sistema de control de cd, significa que las señales no son moduladas, por ende no habría movimientos de control correctivo. Ejemplos de componentes típicos de un sistema de control de cd son potenciómetros, amplificadores de cd, motores de cd, tacómetros, entre otros.

En realidad no todos los sistemas de control son estrictamente de cd o ca. Cuando un sistema incorpora una mezcla de componentes de ca y cd, se puede emplear moduladores y demoduladores para acoplar señales en varios puntos del sistema.

Los sistemas de control en tiempo discreto son diferentes de los sistemas de control en tiempo continuo porque las señales en uno o más puntos del sistema son, ya sea en la forma de pulsos o un código digital. Generalmente, los sistemas en tiempo discreto se subdividen en sistemas de control de datos muestreados y sistemas de control digital. Un sistema de control de datos muestreados cuentan con señales que están en forma de pulsos de datos. Los sistemas de control digital se refiere al uso de computadora o controlador digital en el sistema, siendo así señales en forma de código digital, como lo es un código binario.

Generalmente un sistema de datos muestreados recibe datos o información sólo en forma intermitente en instantes específicos. Este tipo de sistema de datos muestreados también puede clasificarse como un sistema de ca, ya que la señal del sistema está modulada por pulsos.

En los últimos años el controlador por computadora se ha hecho muy popular, debido a que las computadoras digitales proveen ciertas ventajas en tamaño y flexibilidad, al tener la capacidad de poder contener miles de elementos discretos en un espacio muy reducido. Normalmente, los sistemas de control digital son menos susceptibles al ruido.

3.3.13 Diseños de sistemas de control

El diseño de sistemas de control involucra los tres pasos siguientes:

1. Determinar qué debe hacer el sistema y cómo debe hacerlo (especificaciones de diseño).
2. Determinar la configuración del compensador o controlador relativa a cómo está conectado al proceso de controlado.

- Determinar los valores de los parámetros del controlador para alcanzar los objetivos de diseño.

Para establecer la relación entre el comportamiento en el tiempo y la ubicación de polos, se parte de que el sistema posee en lazo cerrado un comportamiento aproximado al de un sistema de segundo orden.

$$\widehat{G}_R = \frac{G_o(s)}{1+G_o(s)} = \frac{w_n^2}{s^2+2w_n\zeta s+w_n^2} \quad (3.18)$$

Esta aproximación es buena cuando el sistema en lazo cerrado posee un par de polos dominantes, esto se da cuando en la gráfica del lugar de las raíces el sistema posee un par de polos complejos bien lejos de otros polos y conjugados a la derecha. La ubicación de los polos del sistema de segundo orden esta dado por:

$$\begin{aligned} s_1, s_2 &= -\zeta w \pm \sqrt{w_n^2(\zeta^2 - 1)} \\ &= -\alpha \pm j w \end{aligned} \quad (3.19)$$

En donde:

$$\alpha = \zeta w_n \quad (3.20)$$

$$w = w_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (3.21)$$

La variable α controla la velocidad de crecimiento o decaimiento de la respuesta al escalón unitario $y(t)$. En otras palabras, α controla el amortiguamiento del sistema y se conoce como factor de amortiguamiento, o constante de amortiguamiento. La inversa de α , $1/\alpha$, es proporcional a la constante de tiempo del sistema.

En la siguiente figura se ilustra la relación entre la localización de las raíces de la ecuación característica y α , ζ , ω_n y ω .

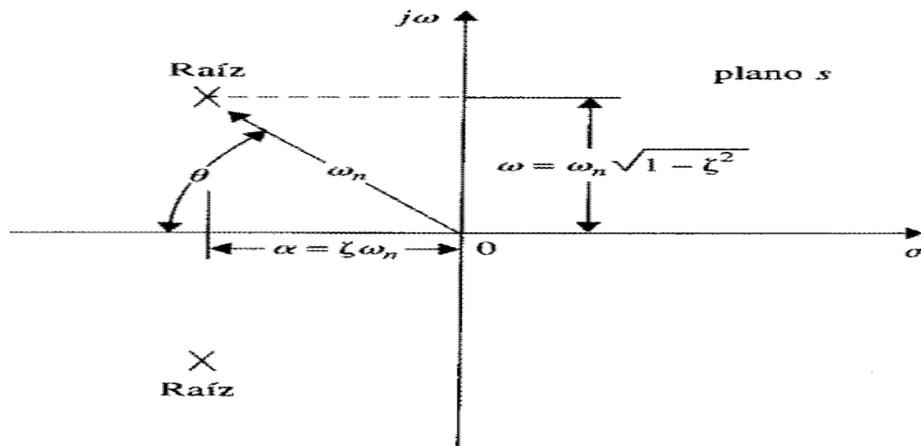


Figura 3.10 Relación entre las raíces de la ecuación característica del sistema prototipo de segundo orden y α , ζ , ω_n y ω .^[23]

Para las raíces de conjugación compleja que se muestran en la figura anterior:

- ω_n es la distancia radial de las raíces al origen del plano s .
- α es la parte real de las raíces.
- ω es la parte imaginaria de las raíces.
- ζ es el coseno del ángulo entre la línea radial de las raíces y el eje negativo cuando las raíces están en el semiplano izquierdo del plano s , $0 < \zeta = \cos\theta$

Las siguientes cuatro figuras muestran en el plano s , el lugar geométrico de ω_n constante, el lugar geométrico de ζ constante, el lugar geométrico de α constante y el lugar geométrico de ω constante, respectivamente.

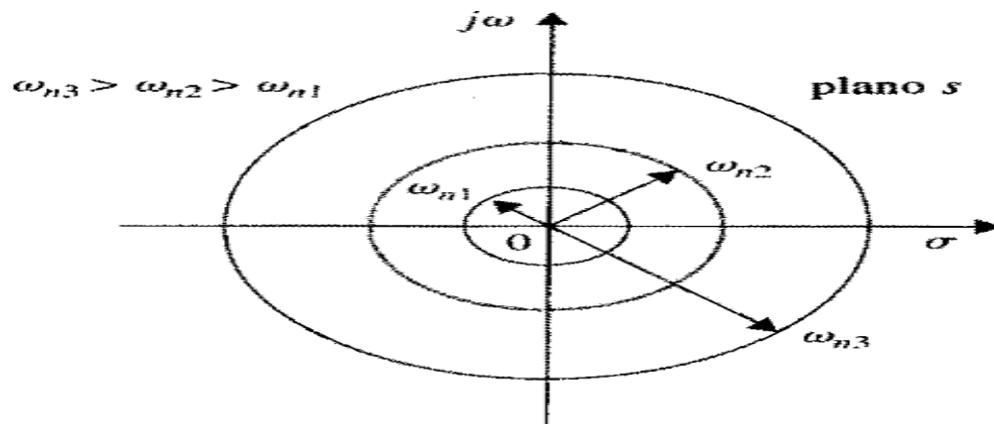


Figura 3.11 Lugar geométrico de la frecuencia natural no amortiguada constante.^[23]

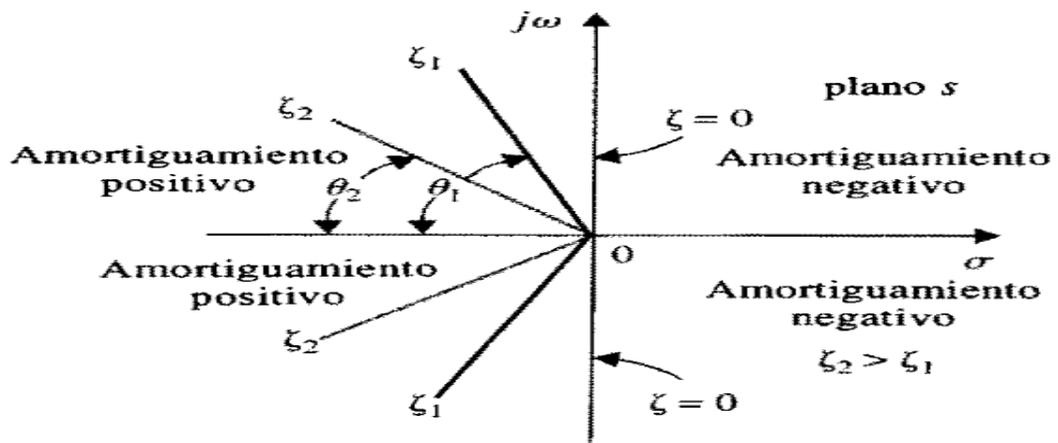


Figura 3.12 Lugar geométrico del factor de amortiguamiento relativo constante.^[23]

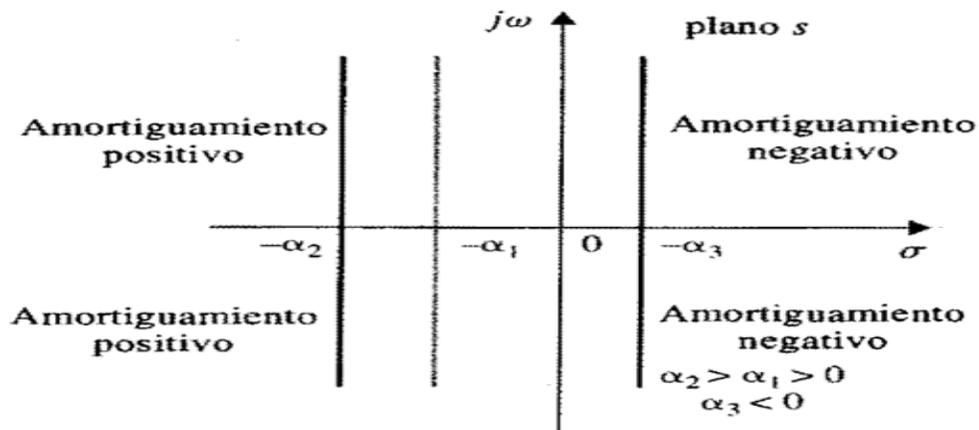


Figura 3.13 Lugar geométrico del factor de amortiguamiento constante.^[23]

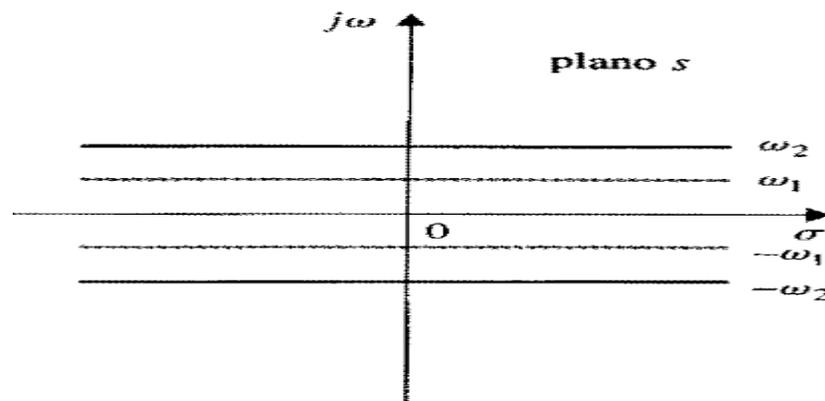


Figura 3.14 Lugar geométrico de la frecuencia de oscilación constante.^[23]

El amortiguamiento del sistema se identifica con las regiones en el plano s como sigue:

- El semiplano izquierdo del plano s corresponde al amortiguamiento positivo, este causa que la respuesta al escalón unitario establezca un valor final constante en el estado estable debido al exponente negativo de la $\exp(-\zeta\omega_n t)$. El sistema es estable.
- EL semiplano derecho del plano s corresponde al amortiguamiento negativo. El amortiguamiento negativo da una respuesta que crece en magnitud sin límite en el tiempo, y el sistema es inestable.
- El eje imaginario corresponde a cero amortiguamiento ($\alpha=0$ o $\zeta=0$). El amortiguamiento cero resulta en una respuesta de oscilación sostenida y el sistema es marginalmente estable o marginalmente inestable.

El amortiguamiento del sistema se ve influenciado por las raíces de la ecuación característica de segundo orden. A continuación se muestra la dinámica del sistema con respecto al valor de ζ :

Cuando $0 < \zeta < 1$, bajo amortiguamiento:

$$s_1, s_2 = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \quad (3.22)$$

Cuando $\zeta = 1$, amortiguamiento crítico:

Para este estado las raíces son reales e iguales

$$s_1, s_2 = -\omega_n \quad (3.23)$$

Cuando $\zeta > 1$, sobre amortiguamiento:

$$s_1, s_2 = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2-1} \quad (3.24)$$

Cuando $\zeta = 0$, no amortiguado:

$$s_1, s_2 = \pm j\omega_n \quad (3.25)$$

Cuando $\zeta < 0$, amortiguamiento negativo:

$$s_1, s_2 = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \quad (3.26)$$

La siguiente figura muestra el lugar geométrico de las raíces de la ecuación característica del sistema prototipo de segundo orden, cuando ω_n se mantiene constante y el factor de amortiguamiento relativo varía desde $-\infty$ hasta ∞ .

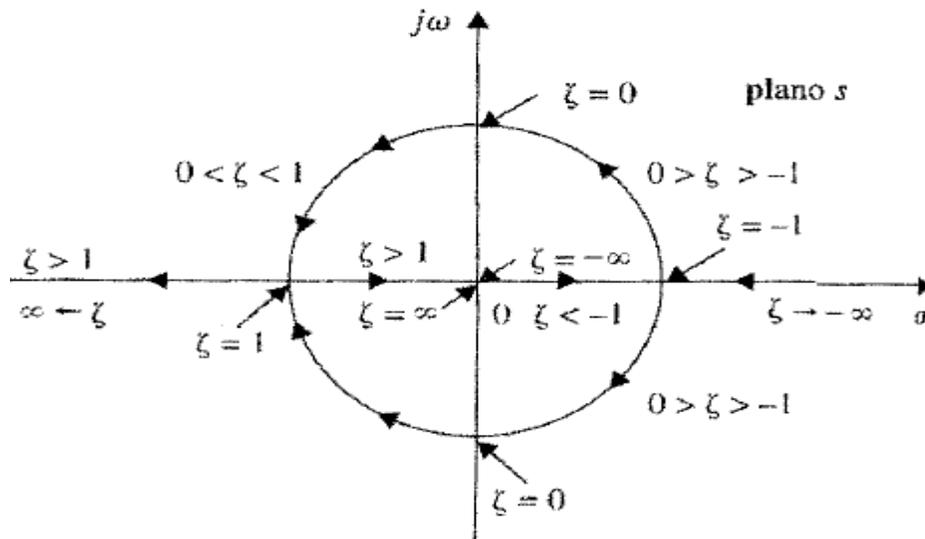


Figura 3.15 Lugar geométrico de las raíces con ω_n constante y ζ variando desde $-\infty$ hasta ∞ .^[23]

La figura a continuación ilustra la respuesta típica al escalón unitario correspondiente a varias localizaciones de las raíces antes mencionadas.

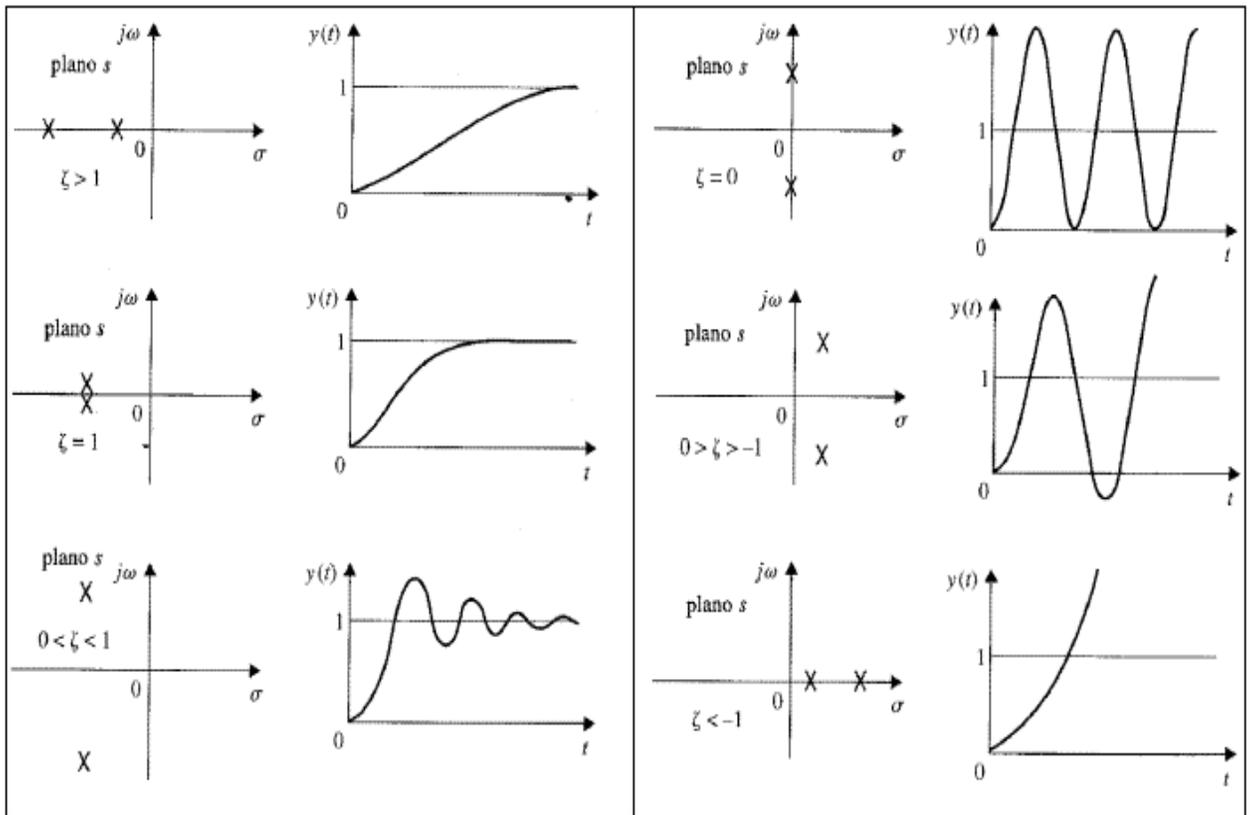


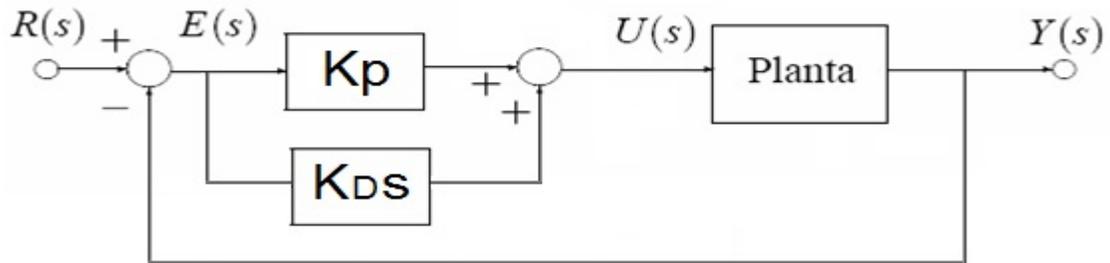
Figura 3.16 Respuesta al escalón para varios sitios del lugar geométrico de las raíces en el plano s .^[23]

3.3.14 Diferentes tipos de controladores

En la mayoría de los casos, mientras más complejo sea un controlador, es más costoso, menos confiable y más difícil de diseñar. El controlador proporcional es el más simple de los controladores ya que su comportamiento consta típicamente de un amplificador simple con una ganancia constante K . La señal de control a la salida del controlador está relacionada con la entrada del controlador mediante una constante proporcional. Un controlador también debe ser capaz de emplear la derivada o la integral de la señal de entrada.

Diseño con el controlador PD

En la siguiente figura se muestra un diagrama de bloques de un sistema de control realimentado.



Microsoft Office Visio

Figura 3.17 Sistema de control con el control PD

El control realimentado del diagrama anterior es del tipo proporcional-derivativo (PD) cuya señal de control aplicada al proceso en función del tiempo es:

$$u(t) = K_p e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (3.27)$$

En función de la frecuencia:

$$U(s) = K_p + K_D s \quad (3.28)$$

En donde K_p se denomina constante proporcional y K_D constante derivativa.

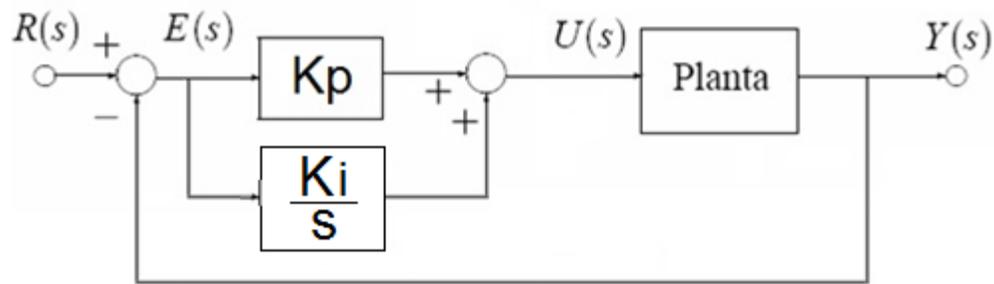
Un controlador PD diseñado adecuadamente afectará el desempeño de un sistema de control en las formas siguientes:

- Mejora el amortiguamiento y reduce el sobrepaso máximo.
- Reduce el tiempo de levantamiento y el tiempo de asentamiento.
- Presenta características del filtro pasa altas.
- Incrementa el ancho de banda.
- Mejora el margen de ganancia, el margen de fase y pico de resonancia " M_r ".
- Puede acentuar el ruido en altas frecuencias.

- No es efectivo para sistemas ligeramente amortiguados o inicialmente inestables.
- Puede requerir un capacitor muy grande en la implementación del circuito.

Diseño con el controlador PI

El controlador PI produce una señal que es proporcional a la integral con respecto al tiempo de la entrada del controlador. En la siguiente figura se ilustra un sistema con un controlador PI en serie.



Microsoft office visio

Figura 3.18 Sistema de control con el control PI

La función de transferencia del controlador PI es:

$$G_C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (3.29)$$

Se puede mencionar las ventajas y desventajas del controlador PI cuando es diseñado adecuadamente:

- Mejora el amortiguamiento y reduce el sobrepaso máximo.
- Incrementa el tiempo de levantamiento.
- Disminuye el ancho de banda.
- Mejora el margen de ganancia, el margen de fase y el pico de resonancia.
- Filtra el ruido de alta frecuencia.

- El problema de seleccionar una combinación adecuada de K_i y K_p para que el capacitor en la implementación del circuito del controlador no sea excesivamente grande, es más agudo que en el caso del controlador PD.

Diseño con el controlador PID

Se utiliza un controlador PID para que se empleen las mejores características de los controladores PI y PD. Considerando que el controlador PID consiste de una parte PI conectada en cascada con una parte PD. La función de transferencia del controlador PID se escribe como:

$$G_c(s) = K_p + K_D s + \frac{K_i}{s} \quad (3.30)$$

3.3.15 Software Utilizado

En este apartado se mencionan los software y las razones por las cuales se han utilizado para el desarrollo de este proyecto desde el punto de vista de programación del dispositivo controlador, el cual es el encargado de manejar todo el equipo relacionado al proceso. También se menciona el software utilizado para crear el layout del sistema de interfaz hombre máquina y el programa utilizado para establecer el enlace entre esta interfaz y el control remoto del proceso, así como también el simulador utilizado para el controlador.

El software RSLogix 5000 es utilizado para trabajar con las plataformas de controladores Logix, enfocados a la automatización de procesos. Este programa cumple con la IEC 61131-3 que es la tercera parte de la estandarización abierta de autómatas programables y sus periféricos, esta norma pretende ser la base real para estandarizar los lenguajes de programación en la automatización industrial, haciendo el trabajo independiente de cualquier compañía. ^[33]

RSLogix 5000 tiene una interfaz fácil de usar para el usuario, programación simbólica con estructuras y arreglos y un set de instrucciones comprensivas que

sirven para muchas aplicaciones. Con este programa se puede trabajar con lógica de escalera, texto estructurado y diagrama de bloques funcionales. Este software permite simplificar soluciones complejas de control ya desarrolladas, se puede tener un mayor acceso a información en tiempo real y desarrollar aplicaciones localizadas en una sola plataforma de control. ^[4]

También con RSLogix 5000 se puede lograr optimizar la productividad, seguridad y la capacidad de reaccionar rápidamente a las necesidades del mercado y panoramas presentes por condiciones de emergencias. Reduce el tiempo de arranque con una disminución en el tiempo de puesta en marcha sin dejar de lado la prioridad de mantener un control seguro, también rebaja el mantenimiento y los costos de entrenamiento al ser un programa fácil de implementar y de uso común para muchas industrias ^[6], con facilidad de acceso a manuales, tutoriales y lecciones en línea para su rápida comprensión.

El programa RSView32 se utiliza para monitorizar y controlar máquinas automatizadas y procesos, ya que es un componente basado en HMI. RSView32 facilita la conexión con otros productos de Rockwell Software, productos de Microsoft y aplicaciones de terceros. Con este programa se puede controlar y ver el estado de los equipos, alarmas y procesos de forma remota con un operador en un cuarto de control. Así provee las herramientas para maximizar la seguridad y productividad en los procesos, incluyendo simulaciones, editar objetos, realizar animaciones, actualizaciones en línea, facilidad para importar dibujos. Soporta el estándar OPC para una rápida y segura comunicación con una gran variedad de dispositivos de hardware provenientes de distintos vendedores. ^[5]

Otro programa utilizado es el RSLinx que es el encargado de establecer la conexión del software con el hardware. Se utiliza para muchas aplicaciones de Rockwell Software empresa encargada de su desarrollo, además se utiliza para hacer conexiones HMI provenientes de terceros. RSLinx es compatible con muchas aplicaciones de software que se ejecutan simultáneamente, comunicando a una gran

variedad de dispositivos en muchas redes de Rockwell Automation. Este programa cuenta con una lista de los distintos tipos de redes incluyendo Ethernet, ControlNet, DeviceNet y una lista de todos los equipos conectados a esas redes. Una vez ubicado la red y equipo a utilizar es solo de darle clic para tener acceso a ellos. ^[7]

Debido a que no siempre se disponía del controlador se requirió de un simulador para llenar esta necesidad de siempre poder contar con uno. El programa utilizado para simular la labor del controlador es el RSLogixEmulate 5000. Este dispone de una interfaz igual a la del controlador central modelo ControlLogix 5560 (L6) que se utilizó para manejar el control del proceso. En este simulador se puede agregar la mayoría de los módulos que se ofrecen en el mercado y se puede ver las señales que entran y las que salen para el control el sistema.

Este paquete de programas se escogió debido a las características especificadas anteriormente, las cuales contribuyen a una solución eficiente y a la vez sencilla para llevar a cabo la programación para el control del proceso.

3.3.16 Principios de seguridad industrial

La seguridad industrial es una labor de convencimiento entre trabajadores y patronos. Es deber de la empresa, institución u organización estimular la prevención de accidentes y brindar a todos los trabajadores un ambiente de trabajo seguro y saludable.

Higiene industrial y seguridad:

Se puede definir como aquella ciencia y arte dedicada a la evaluación, reconocimiento, participación y control de aquellos factores o elementos en el ambiente de trabajo, los cuales pueden causar deterioro de la salud, enfermedad, incomodidad e ineficiencia en los trabajadores, cuando estos desarrollan sus tareas diarias. Su aplicación es de gran importancia, ya que muchos procesos y operaciones industriales producen compuestos perjudiciales para la salud de los trabajadores. Debido a esto se hace necesario que el encargado del área industrial

tenga conocimientos de los compuestos tóxicos y/o asfixiantes más comunes de uso en la industria, así como de los principios para su uso. Se debe ofrecer protección contra exposición a sustancias tóxicas, polvos, asfixiantes que vayan en deterioro de la salud respiratoria de los empleados. Para la elaboración del casquete de la esfera es necesario muchas horas de soldadura, por lo que la empresa encargada de su construcción está en la obligación de brindar a los trabajadores máscaras para soldar y así proteger la salud de sus ojos.

Como objetivo principal de la seguridad e higiene industrial, se tiene prevenir accidentes laborales consecuentes de las actividades de producción. Una buena producción debe satisfacer las condiciones necesarias, tomando en consideración los 4 elementos indispensables: seguridad, higiene, productividad y calidad de los productos.

La seguridad e higiene industrial busca proteger la integridad del trabajador, así como mantener la salud en óptimas condiciones.

3.3.17 Teoría del fuego:

Concepto de fuego: Reacción química que consiste en la oxidación violenta de un material combustible; que se manifiesta como un proceso exotérmico mediante la emisión de luz, calor, gases (o humos) y llamas.

Concepto de incendio: Fuego no controlado que puede incinerar algo que no está destinado a quemarse. Su surgimiento puede ser súbito, gradual o instantáneo, con secuela de daños materiales que pueden interrumpir el proceso de producción, ocasionar lesiones o pérdidas de vidas humanas y/o deterioro ambiental. En la mayoría de los casos el factor humano, participa como elemento causal.

Triángulo del fuego:

Para que surja fuego, es necesario que exista simultáneamente y en proporciones adecuadas los siguientes tres componentes: un combustible, un comburente (agente

oxidante como el oxígeno) y calor o energía de activación. De igual manera es posible prevenir o atacar un fuego eliminando uno de los componentes anteriormente mencionados. Por lo general estos tres elementos se ilustran a través de un modelo denominado: triángulo del fuego. A continuación se muestra un diagrama del triángulo de fuego.



Figura 3.19 Triángulo del fuego

Comburente (agente oxidante):

Sustancia que participa en la combustión oxidando al combustible. Se encuentra normalmente en el aire con una concentración porcentual en volumen aproximada de 21%. Todos los comburentes tienen en si composición oxígeno disponible. Es necesaria la presencia de una proporción mínima de oxígeno para que se produzca la combustión, esta es aproximadamente de un 15%. El oxígeno puede estar en su estado gaseoso o líquido y existen diversos tipos de comburentes compuestos que aportan el oxígeno para que se dé la combustión.

Combustible:

Es cualquier material capaz de liberar energía cuando se oxida de forma violenta dejando como residuo calor (energía térmica), dióxido de carbono y algún otro compuesto químico. El combustible puede ser sólido, líquido o gaseoso, sin embargo

para que se inicie la combustión de cualquier material, a excepción del estado gaseoso, el combustible debe sufrir cambios hasta convertirse en vapor. Que en una proporción adecuada con el aire (límites de inflamabilidad), y una fuente de calor (flama abierta o chispa, que inicie o mantenga la reacción) darán lugar al fuego. En un fuego, el combustible puede eliminarse naturalmente, consumido por las llamas, o artificialmente, mediante procesos químicos y físicos que impiden al fuego acceder al combustible.

Energía de activación:

Sin el calor, el fuego no puede ni comenzar ni propagarse. Se requiere de energía para aumentar la temperatura del combustible, al punto que desprenda suficientes vapores (temperatura de inflamación) y ocurra la ignición. El calor es una fuerza térmica que eleva la temperatura de los cuerpos hasta hacerlos gasificar, volatilizar o dilatar, y es el principal causante de la propagación de un incendio, ya que éste puede viajar a través de un local ardiendo o en el ambiente. Puede eliminarse introduciendo un compuesto que tome una parte del calor disponible para la reacción. Por lo general se emplea agua, que toma la energía para pasar a estado gaseoso, pero también son efectivos polvos o gases con la misma función.

3.3.18 Métodos de propagación del fuego:

Transferencia de calor:

La transferencia de calor es el paso de energía térmica desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura, de esta manera siempre buscando el equilibrio térmico. Existen tres diferentes tipos de transferencia de calor, los cuales se explicarán a continuación:

Conducción: es un mecanismo de transferencia de energía térmica entre dos cuerpos por contacto directo de sus partículas, por ejemplo, una tubería de vapor en contacto con una pieza de madera transfiere su calor a la madera por contacto

directo. Un parámetro importante en los materiales es la conductividad térmica, la cual es una propiedad física que mide la capacidad de conducción de calor o capacidad de una sustancia de transferir el movimiento cinético de sus moléculas a sus propias moléculas adyacentes o a otras sustancias con las que está en contacto. La inversa de la conductividad térmica es la resistividad térmica, que es la capacidad de los materiales para oponerse al paso del calor.

Radiación: se da cuando la energía se mueve a través del espacio o de los materiales en forma de ondas, que se mueven a la velocidad de la luz. Cuando dos cuerpos se sitúan frente a frente y uno tiene mayor temperatura que el otro, la energía radiante pasara del más caliente al más frío. Todas las superficies con temperatura finita emiten energía en forma de ondas electromagnéticas.

Convección: se caracteriza porque se produce por intermedio de un fluido (líquido o gas) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. La convección se produce únicamente por medio de materiales fluidos. Lo que se llama convección en sí, es el transporte de calor por medio del movimiento del fluido. Por ejemplo los gases, producto de una combustión, tienden a ser más ligeros que el aire, entre mayor sea un incendio, éstos serán más calientes y ascenderán más rápido, hasta las partes altas de un edificio. Iniciándose una transferencia del calor por el movimiento del aire.

3.3.19 Clasificación de fuegos:

Los fuegos se caracterizan y se clasifican, de acuerdo al material que se está quemando. Por lo general se clasifica los fuegos en cuatro clases y se le asigna a cada clase un símbolo especial. Estos símbolos aparecen en los extintores, y permiten determinar si el extintor es apropiado para el tipo de fuego al que se desea aplicarlo. Estas clases son:

Fuego clase A: Ocurren en materiales combustibles sólidos como la madera y sus derivados, plásticos, textiles, entre otros. Una característica de este tipo de incendios

es que pasan de una combustión superficial a una profunda con la presencia de brasas, por lo tanto, para su extinción completa y eficaz se requiere de un agente extintor que absorbe el calor, como el agua. En la siguiente figura se muestra del lado izquierdo el símbolo que se utiliza en los extintores para indicar que es para fuegos clase A y la derecha el símbolo utilizado para indicar que el material presente también es de esta clase.



Figura 3.20 Símbolos para fuego clase A

Incendios clase B: Involucran a los líquidos y gases combustibles como el petróleo y sus derivados, alcoholes, grasas, butano, propano, metano, etc. son fuegos superficiales si se comparan con los incendios de clase a; el fuego de clase b ocurre en tanques abiertos o por derrames o fugas de sustancias combustibles. Se requiere, para su extinción, de un agente químico como el polvo seco, espumas, bióxido de carbono, o halón, capaces de sofocar el fuego o romper la reacción en cadena. A diferencia del anterior no deja residuo al quemarse. En la siguiente figura se muestra del lado izquierdo el símbolo que se utiliza en los extintores para indicar que es para fuegos clase B y la derecha el símbolo utilizado para indicar que el material presente también es de esta clase.



Figura 3.21 Símbolos para fuego clase B

Incendios clase C: Son comúnmente identificados como “fuegos eléctricos”. Se producen en “equipos o instalaciones bajo carga eléctrica” como por ejemplo los conductores y equipo electrónico energizado, como subestaciones, transformadores, plantas de luz, tableros de medidores, etc. Este tipo de incendios deben combatirse únicamente con agentes extintores que no conduzcan la electricidad, como el polvo químico seco, bióxido de carbono o halón. Una vez que la corriente eléctrica se haya interrumpido o desenergizado el equipo, se puede combatir el fuego con agua. En la siguiente figura se muestra del lado izquierdo el símbolo que se utiliza en los extintores para indicar que es para fuegos clase C y la derecha el símbolo utilizado para indicar que el material presente de esta clase.



Figura 3.22 Símbolos para fuego clase C

Incendios clase D: son los que se producen en polvos o virutas de aleaciones de metales livianos como el magnesio, aluminio, sodio o litio, y requieren para su extinción del uso de polvos especiales como el grafito para sofocar y absorber parte del calor generado; a falta de éstos se recomienda utilizar arena seca para la extinción. La siguiente figura muestra los símbolos utilizados para su representación.



Figura 3.23 Símbolos para fuego clase D

Una clasificación menos común es el fuego clase K. Este es aquel fuego que se produce y se desarrolla en los extractores y filtros de campanas de cocinas, donde se acumula la grasa y otros componentes combustibles que al alcanzar altas temperaturas produce combustión espontánea. Estos son generados por aceites y grasas vegetales. Los símbolos que representan dicha clase de fuego se muestra en la siguiente imagen.



Figura 3.24 Símbolos para fuego clase D

A continuación, para fines ilustrativos se muestra en la siguiente figura un ejemplo de incendio provocado por la explosión registrada en un tanque que contenía Gas Licuado de Petróleo en una refinería en Venezuela que ocurrió el 26 de agosto del 2012.



Figura 3.25 Incendio de un tanque de gas licuado de petróleo

3.3.20 Señalización:

Es una acción que se refiere a un objeto, una actividad o situación determinada que proporciona:

- Una indicación como por ejemplo vías de escape, refugios, entre otros.
- Una obligación como lo es, el uso de equipos de protección personal.
- Una advertencia por ejemplo presencia de explosivos, caída de rocas, entre otros.
- Una prohibición como por ejemplo la de no fumar, prohibido el paso.

La señalización trata básicamente de identificar los lugares y situaciones que presentan riesgo y son identificados por medio de letreros, colores, luz o sonido (semáforos, lámparas, sirenas, entre otros), comunicación verbal (orden, advertencia) o una señal gestual (movimiento de brazos y manos).

La señalización debe cumplir los siguientes requisitos:

- Atraer la atención del personal sobre la existencia de riesgos, prohibiciones u obligaciones.
- Alertar, lo más pronto posible, al personal cuando se produzca una situación de emergencia.
- Dar una interpretación clara del riesgo.
- Facilitar al personal la localización e identificación de instalaciones de protección, evacuación, refugios, emergencia o primeros auxilios.

Para la construcción de la esfera YT-7711 es necesaria la implementación de señales para indicar los puntos citados anteriormente. En la siguiente figura se muestra un claro ejemplo de unas de las señales utilizadas en el área de construcción para la esfera.



Figura 3.26 Ejemplo de señalización en el área de construcción de la esfera YT-7711

Se debe hacer señalización en pasillos, gradas, área de máquinas, áreas dedicadas a reparaciones, en fin a toda zona que se considere como peligrosa. También se debe señal rutas de evacuación, extintores, salidas de emergencia, obstáculos y objetos, entre otros.

Las señales en seguridad más utilizadas son ópticas que no es más que la aplicación de luz y color. El objetivo del color no es más que dar a conocer la presencia o ausencia y el tipo de peligro. También se utiliza la señalización acústica usando sonidos. Por medio de la señalización y la simbología del color podemos verificar los puntos de peligro y zonas de seguridad.

3.3.21 Qué es un sistema de red contra incendio

Es un sistema de seguridad, compuesto por una red de tuberías, una o más bombas hidráulicas, rociadores automáticos, válvulas y demás accesorios, cuyo objetivo es suministrar un caudal de agua determinado a una presión suficiente en los distintos puntos de suministro de una instalación contra incendios, que está dispuesto a funcionar en cualquier momento para combatir un incendio dentro de una planta de producción, edificio, tanques, etc. donde hay riesgo de incendio por cualquier manejo de materiales, gases altamente inflamables o potencialmente peligrosos.

3.3.22 Definición N.F.P.A.

N.F.P.A por sus siglas en inglés "*National Fire Protection Association*" (Asociación Nacional de la Protección contra Incendios). La N.F.P.A es una organización internacional fundada en 1896, encargada de desarrollar normas para proteger personas, propiedades y el medio ambiente del fuego. La N.F.P.A es la fuente principal mundial para el desarrollo y diseminación de conocimiento sobre seguridad contra incendios y de vida. Es importante destacar que el sistema de desarrollo de los códigos y normas de la N.F.P.A es un proceso abierto basado en el consenso que ha producido algunos de los más referenciados materiales en la industria de la protección contra incendios, incluyendo el Código Eléctrico Nacional, el Código de Seguridad Humana, el Código Uniforme contra Incendios, y el Código Nacional de Alarmas de Incendios.

En la actualidad, virtualmente, cada construcción, proceso, servicio, diseño e instalación están afectados por códigos y normas desarrollados por la N.F.P.A. Por medio de los Códigos contra Incendios y sus publicaciones, la N.F.P.A establece sólidos principios para la protección y seguridad. Las publicaciones de la N.F.P.A han sido traducidas a varios idiomas y son referenciadas alrededor del mundo.

Más de 79,000 miembros, representando 107 naciones, son parte de la red global de protección contra incendios.

Capítulo 4: Procedimiento metodológico

En este capítulo se describe las distintas etapas del método de diseño en ingeniería que se siguieron para llegar a la solución del problema. Entre estas etapas están el reconocimiento y definición del problema, obtención y análisis de información, síntesis de una solución, evaluación de las alternativas, análisis detallado de la solución, implementación de la solución, reevaluación y por último rediseño. Cabe mencionar que no se quiere establecer una única definición del método de diseño en ingeniería con las etapas anteriormente mencionadas.

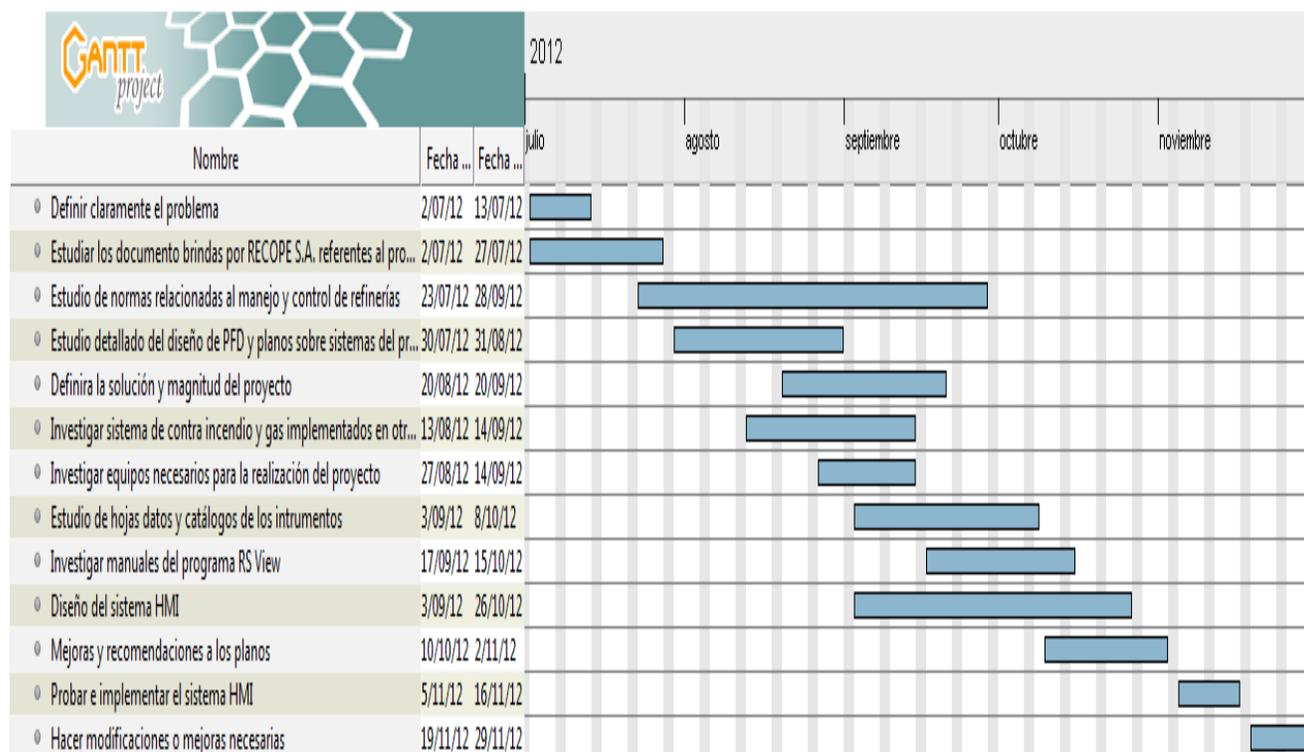
4.1 Reconocimiento y definición del problema

El problema existente se da debido a la presencia de un ambiente inseguro alrededor de la esfera YT-7711 de RECOPE, que va recibir, almacenar y trasegar gas licuado de petróleo, sustancia altamente inflamable. Es necesario para la esfera un sistema de protección contra incendio que se active con la presencia de llama y/o altas concentraciones de gas en la atmósfera, esto con el fin de disminuir los riesgos en una zona de alto peligro donde opera el personal de RECOPE.

Este problema nace de la necesidad de RECOPE por ampliar su capacidad de almacenamiento y distribución del GLP para satisfacer la demanda nacional. Para identificar y establecer claramente el problema se acudió a entrevistas y reuniones con ingenieros y técnicos de parte de RECOPE y del contratista. También se efectuaron visitas al campo donde actualmente se está construyendo la esfera YT-7711 y donde se tiene tres esferas funcionando. Cada una de estas tres esferas poseen un sistema contra incendio, pero se encuentran desactualizados debido a que el sistema no es automatizado y no cuenta con tecnología de punta debido a que por lo menos dos de ellas fueron construidas hace 21 y 31 años, YT-770 y YT-771 respectivamente. En este momento cabe recalcar que el sistema desarrollado en este proyecto debe ser seguro y moderno con tecnología de punta y lo más automatizado posible. También contribuyó de gran medida el asesor de la empresa que facilitó las visitas al campo y realizó explicaciones del problema aquí planteado.

Las actividades son necesarias para el cumplimiento del proyecto, estas permiten definir las etapas necesarias para el desarrollo de la solución. Desarrollar una estructura cronológica permite tanto a la empresa como al estudiante definir la duración del proyecto y cada uno de los avances durante el tiempo establecido para el desarrollo completo del proyecto, en este caso del 23 de julio al 29 de noviembre del 2012.

La figura 4.1 permite visualizar a través del diagrama de Gantt cada una de estas actividades, así como establecer la extensión de cualquiera de ellas y el nivel de trabajo que necesiten para su finalización. Dando al lector un conocimiento de la duración del proyecto y la viabilidad del mismo.



Gantt Project
Figura 4.1 Diagrama de Gantt

4.2 Obtención y análisis de información

Con base a los objetivos planteados anteriormente se han de realizar procedimientos para resolver ordenadamente el problema, estos han de tener una secuencia lógica de manera que permitan una solución fluida para el problema planteado anteriormente.

La información recolectada necesaria para el planeamiento y realización del presente proyecto, se hizo mediante entrevistas y reuniones con los ingenieros y técnicos de RECOPE y la empresa contratista. Estas reuniones y entrevistas abarcaron toda la lógica de funcionamiento, procedimientos de activación y desactivación y los requerimientos de diseño propios del proceso a controlar.

Es necesario estudiar los documentos brindados por RECOPE, como lo son: Instrumentación y Control, Especificación General de Detección de Llamas y Gas, Filosofía de control del sistema de GLP, el Tomo II- Alcance del Trabajo y Condiciones Técnicas Generales y Tomo III- Alcance de Ingeniería de Detalle, ambos del cartel de la contratación Licitación Pública 2010LN-00002-02. En estos documentos se explica los requerimientos mínimos para el diseño, la fabricación, la instalación y las pruebas del sistema de detección de llama y gas.

Posteriormente se procede a investigar y estudiar detalladamente las especificaciones y requerimientos establecidos en las normas nacionales e internacionales referentes al manejo y control de refinerías, diseño y construcción de instalaciones de gas licuado de petróleo, código eléctrico nacional, código de alarmas contra incendio, práctica recomendada para clasificación de áreas para equipos e instalaciones eléctricas en plantas petroleras, entre otras. Con estos primeros puntos se puede elaborar los requerimientos específicos de diseño del proyecto.

Se debe instruir con los diagramas de tubería e instrumentación para el almacenamiento de propano para la esfera YT-7711, diagrama de tubería e

instrumentación de la red de agua contra incendio (existente y nueva) y el diagrama de tubería e instrumentación para el sistema contra incendio esfera YT-7711 y demás documentos elaborados para contribuir al desarrollo del sistema contra incendio de la esfera.

Estudiar los diagramas de flujo de proceso (PFD, por sus siglas en inglés) brindados por el contratista, para poder realizarle mejoras, recomendaciones y tener claro el proceso de operación de los sistemas. Con este punto bien entendido se puede proceder a diseñar el algoritmo del proceso de control.

El uso de libros de control automático, instrumentación y programación fueron necesarios y todas estas fuentes bibliográficas se obtuvieron por medio de internet, préstamos de la biblioteca José Figueres Ferrer ubicada en la instalación del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago y por medio del uso del servicio de acceso remoto a la base de datos suscritas que ofrece esta misma biblioteca como lo son ebrary, e-libro, Knovel y repositorio TEC.

Los manuales y tutoriales también fueron necesarios para la obtención de información. Se utilizaron estos documentos para conocer el uso y funcionamiento de equipo y de programas necesarios para el desarrollo del proyecto.

Averiguar sobre los equipos e instrumentos necesarios para la realización del proyecto. Entre estos se puede mencionar las válvulas de diluvio, los detectores de llama y gas, los controladores, lanzas de agua, dispositivos y estaciones de alarma, entre otros. Para el cumplimiento de este punto se utilizarán hojas de datos, catálogos, manuales y cualquier otro tipo de documento que especifique las características de los dispositivos, los programas y la manera en que funcionan y condiciones de medición que presentan estos equipos. También se programarán visitas a la refinería para familiarizarse con los equipos, instrumentos y otros sistemas presentes en la instalación que pueden ayudar a la comprensión y desarrollo del proyecto.

Una vez comprendido los equipos e instrumentos necesarios para la realización del proyecto, se efectuaron varias consultas en internet, realizando visitas a páginas de los principales fabricantes de equipo para uso industrial, ya que estos son los que se requieren para la implementación de este sistema. Uno de los requisitos de RECOPE es que todo el equipo utilizado en el sistema haya sido utilizado en otras refinerías y sean probados en fábrica para garantizar su funcionamiento correcto.

Investigar los sistemas de fuego y gas implementados en otras refinerías. Esto con el fin de tomar ideas y realizar comparaciones con los sistemas existentes en otros lugares y los realizados para la esfera YT-7711.

Indagar sobre el uso de los programas necesarios para el desarrollo de este proyecto, como lo es RSView32, RSLogix5000, RSLinx Classic, entre otros para proceder a diseñar la programación de control, prioridades de comunicación y la secuencia lógica de activación de señal de enclavamiento para el sistema HMI y la simulación final del sistema completo de contra incendio.

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

Una vez obtenida la información, se generó distintas alternativas de soluciones que reunieran las características del sistema que se describe a lo largo de este documento, se procede a realizar una evaluación de estas soluciones tomando en cuenta sus ventajas y desventajas y se verifica que cumplan con los requerimientos del proyecto. Se realizaron cotizaciones y análisis de costos, alcance de los equipos, se evaluó la flexibilidad y facilidad para la implementación, entre otros criterios para escoger la mejor opción.

Se estableció que el controlador debe tener características modulares, para una mayor facilidad de mantenimiento y programación, que la capacidad de entradas y salidas fuera suficiente para las necesidades del proyecto, que fuera robusto y estable y que fuera conocido en el campo industrial.

Junto con estos criterios se tomó en cuenta la experiencia de los ingenieros que laboran en la instalación de RECOPE para llegar a la solución seleccionada.

4.4 Implementación de la solución

Este sistema se va implementar una vez finalizada la construcción de la esfera YT-7711 por ende es necesario que el diseño sea correctamente evaluado antes de que entre a funcionar, para comprobar la viabilidad de la solución que se implementó.

Para la realización de las pruebas se consideró toda una serie de posibles escenarios y la manera en que se debe solucionar cada una de ellos. Por este motivo fue necesario prever problemas cuando el sistema fuera montado en el campo. Las pruebas se realizaron de la manera más real posible por medio de simulaciones, tomando en cuenta el tiempo de retardo y demás características de todos los equipos utilizados para implementar la solución.

Con los equipos escogidos y con las especificaciones de funcionamiento del proceso, se realizó el estudio teórico de los lazos de control presentes en el proceso (llamas y concentración de gas); para así diseñar los correspondientes compensadores y obtener el control automático del proceso.

La interfaz hombre-máquina para el centro de control de operación, se diseñó como aplicación para el control del proceso, basados en las características solicitadas por RECOPE; en donde además esta empresa colaboró con los software utilizados y sus respectivas licencias.

Fue necesario cambiar el tipo de válvula de diluvio que inicialmente estaba propuesta. En un principio se tenía pensado trabajar con válvulas de diluvio que actuaran mecánicamente con un resorte, pero después de evaluar las condiciones de proceso e investigar a más detalle el mercado para este tipo de válvulas, se determinó cambiarlas por válvulas de control automático sin componentes mecánicos móviles. Es esta característica la más significativa para los sistemas de

protección contra incendios, en los que el funcionamiento fiable es el criterio más importante para la selección de equipos y en especial de las válvulas de control. Los resortes se dañan con mayor facilidad y por las condiciones ambientales donde se va implementar el sistema, es posible que el resorte sufra de corrosión en poco tiempo después de instalado. También si se introduce algún elemento no deseado entre el resorte, este puede que a la hora de accionarse quede atascado y no logre cumplir su función, deshabilitando el suministro de agua necesario para acatar la emergencia en cuestión.

En un principio se consideró que el sistema de alta y muy alta concentración de gas se active cuando los sensores de gas detecten un nivel de concentración de gas de 30% del límite inferior de explosividad (LEL, por sus siglas en inglés) y 60% LEL respectivamente. Examinando el escenario y por recomendaciones realizadas por parte de expertos en RECOPE se llegó a la conclusión que es mejor cambiar esta propuesta por una donde se active una primera alarma cuando se alcanza una concentración alta de gas a 20%LEL y una segunda alarma cuando se alcanza una concentración muy alta de gas referente a 50% del LEL. Entonces, se bajó el nivel de LEL requerido para que entre a funcionar el sistema de protección para gas, esto con el fin de disminuir la posibilidad que ocurra un accidente.

4.5 Reevaluación y rediseño

En este punto se mencionan las posibles futuras mejoras que se pueden llevar a cabo al sistema desarrollado. Claro está, que la empresa deberá evaluar el desempeño de la solución mejorada y deberá establecer prioridades en los cambios que se requieran, además de estudiar si es factible y/o necesario ajustarse a nuevas tecnologías o agregar nuevas funciones al sistema contra incendio. Eventualmente, distintas mejoras surgirán con el uso del sistema, sin embargo algunas ideas se brindan a continuación.

Se puede implementar un sistema de control de temperatura, donde por medio de sensores, controlador y actuador se puede mantener la temperatura de la esfera en

un nivel deseable. Se puede tener 4 sensores distribuidos en la parte superior de la esfera. Cuando uno o más sensores manden señal de que la temperatura en la chapa de la esfera es de 38°C o mayor, se activa el sistema de enfriamiento de la esfera con agua hasta alcanzar una temperatura de 36°C. Este riego de agua se haría con el mismo sistema de tuberías que el utilizado para el sistema contra incendio con la diferencia que nada más se activaría el anillo para la corona y el diluvio central.

A futuro con el surgimiento de nuevas tecnologías, nuevos procesos se puede realizar mejoras y recomendaciones a los planos anteriormente mencionados, para modificar así el sistema o algunos de los subsistemas que componen el sistema de fuego y gas.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

En este capítulo se explica el diseño de la solución y el orden que se implementó para llegar a esta. También en este apartado se hace referencia a los criterios de diseño que fueron considerados, fundamentados con las relaciones matemáticas y físicas involucradas. Se establecen las normas y estándares internacionales existentes que son acatados para la implementación de la solución.

Este capítulo se dividió en tres secciones claramente separadas, como lo son: el análisis de las diferentes soluciones y la selección final, descripción detallada del hardware implementado (módulos físicos utilizados en el sistema y su interconexión) y la descripción detallada del software realizado (rutinas de programación del sistema).

5.1 Análisis de soluciones y selección final

Como parte importante del proceso del diseño en ingeniería, después de haber entendido y analizado completamente el problema, es plantear diferentes soluciones y escoger la que mejor se adapte al proyecto. Para asegurar que la solución elegida sea la más apropiada es necesario evaluar las ventajas y desventajas de cada una de las distintas opciones elaboradas para solucionar el problema. Esta evaluación debe basarse en criterios de expertos y en las restricciones del proyecto, para así llegar a elegir la mejor solución.

Para la no objeción de planos y documentos entregados por el contratista, se debe cumplir con:

- El plano o documento debe estar en su versión final o sea en su versión tres; cuando no tenga comentarios u observaciones adicionales.
- El primer documento entregado por el contratista se reconoce como versión uno y si es necesario modificar esta versión se pasa inmediatamente a versión dos y si no es necesario se pasa a la versión tres.

- La versión dos de cualquier documento puede tener cuantas revisiones sean necesarias antes de pasar a ser versión tres.
- Todos los instrumentos y equipos ofrecidos por el contratista para el sistema contra incendio, deben estar incluidos en la lista de marcas brindada por RECOPE para poder ser utilizados.
- Todos los planos y documentos deben cumplir con las especificaciones de seguridad, ambiental, industrial, higiene ocupacional y cualquier otro documento que forme parte integral del cartel del proyecto SAGAS.
- Todo documento o plano relacionado con el sistema contra incendio debe cumplir con todas las especificaciones de diseño mencionadas a lo largo de este proyecto.

Como nota importante según el cartel del proyecto SAGAS, el sello de no objeción brindado por RECOPE no es una aprobación ni un compartir de responsabilidades, con esto el contratista queda enteramente responsable del suministro, fabricación, montaje, construcción, capacitación y puesta en marcha de los respectivos sistemas.

Es importante recalcar que cada una de las soluciones planteadas en un principio debe cumplir con las normas y estándares nacionales e internacionales que se relacionan con el sistema contra incendio implementado en refinerías.

A continuación se listan las normas y estándares utilizados, de acuerdo a las secciones que sean de aplicación, para el desarrollo de este proyecto.

De la norma National Fire Protection Association (NFPA) se usó:

- National Electrical Code (NFPA 70)
- National Fire Alarm, Code (NFPA 72)
- Práctica recomendada para la clasificación de líquidos inflamables y de áreas peligrosas (clasificadas) para instalaciones eléctrica en áreas de procesamiento químico(NFPA 497)

De la American Petroleum Institute (API):

- Design & Construction of GLP Installations (API 2510)
- Fire Protection Considerations for Design and Operation (API 2510A)
- Classification of Locations for Electrical Installations at Petroleum Facilities (API RP 500).

De la Instrument Society of America (ISA)

- Instrumentation symbols and identification (S5.1)

De la International Electrotechnical Commission (IEC)

- Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems (IEC 61508)
- Functional safety: Safety instrumented systems for the process industry sector (IEC 61511)

A nivel nacional existe el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO) que es una asociación privada, sin fines de lucro, con personería jurídica y patrimonio propio. Fue creada en el año 1987, y en 1995 fue reconocida, por decreto ejecutivo, como el Ente Nacional de Normalización, este reconocimiento se puede mantener si la Asociación cumple a satisfacción con el encargo que le hace la Ley.

A pesar de ser el ente nacional de normalización, INTECO no cuenta con normas para el sector petro-químico por lo que este instituto se reconoce como miembro y afiliada de distintos entes internacionales, como lo son: ISO, IEC, NFPA, entre otros, que si cuentan con normas específicas para una cantidad más amplia de campos de la industria.

Para este proyecto, INTECO debería intervenir en todo lo relacionado con la protección contra incendios, pero este ente apenas ha adoptado la decisión de elaborar la norma y no ha iniciado la labor técnica. Entonces muchas de las normas

que pueden involucrarse con el desarrollo de este proyecto, hasta la fecha no han sido aprobadas, es por esta razón que para el diseño de este sistema se ha enfocado en las normas y estándares internacionales, que también son bien vistas y aprobadas por INTECO.

Cabe mencionar que las normas y estándares utilizados para este proyecto son las últimas ediciones, al menos que una edición específica sea indicada. Es necesario recordar que estas normas y estándares no son manuales de diseño, sino que son guías y recomendaciones a seguir para que los diseños elaborados por los ingenieros en distintos campos, cumplan con las especificaciones mínimas de seguridad.

Como se mencionó en el apartado 1.2 el sistema contra incendio se compone por varios subsistemas cuya función se describe a continuación y en los apartados 5.2 y 5.3 se describe a detalle las especificaciones de hardware y software respectivamente utilizados para estos subsistemas:

5.1.1 Subsistema de detección de fuego

Este subsistema lo componen cuatro sensores de llama, que como su nombre lo indica son los encargados de detectar cualquier presencia de llama alrededor de la esfera YT-7711. Se hace necesario para su correcta identificación asignarle un código a cada instrumento y equipo que forma parte del sistema. En este proyecto, a este código, se le denomina el tag del instrumento. En el caso de estos cuatro sensores se les asignó los siguientes tags: BE-7711A, BE-7711B, BE-7711C y BE-7711D. Donde, BE indica que son detectores de llama, según lo establecido en la norma ISA S5.1: Instrumentation symbols and identification, el número 7711 hace referencia a la esfera y la secuencia A, B, C, D se utiliza para diferenciar los sensores entre sí. Asignarle tags facilita la labor de identificar y dar mantenimiento a los instrumentos, especialmente cuando se trabaja en zonas con gran cantidad y variedad de equipo.

Después de analizar las esferas que se encuentran actualmente en funcionamiento y el entorno de la esfera que se encuentra en construcción, se llegó a la decisión de colocar dos sensores arriba de la esfera (BE-7711A, BE-7711B) y los dos restantes debajo de ella (BE-7711C, BE-7711D), estos a una distancia de separación cercana a la del diámetro de la esfera. En la figura 5.1 se muestra un diagrama que indica la elevación de instalación de cada sensor, esta elevación es con respecto al nivel del mar. Por ahora que la esfera se encuentra en construcción no se puede especificar la posición exacta donde se van a instalar los sensores, solo se puede detallar la altura donde van a ser colocados y una propuesta aproximada de su localización. Esto se da porque para definir la posición exacta de los sensores es necesario tener completada la construcción de la esfera y así en campo poder definir cuál es el punto donde no va haber obstrucción o por lo menos se va tener la menor obstrucción posible. También para la instalación se tiene que tomar en cuenta que los detectores de llama van a tener un ángulo de visión de 120° , de esta manera se tienen que posicionar con el ángulo correcto para lograr una cobertura completa del área de interés alrededor de la esfera.

Los sensores deben detectar presencia de llama por medio de ondas de luz dentro del rango ultravioleta e infrarrojo. El detector hará una comparación del rango de espectro de luz ultravioleta e infrarrojo y enviará señal de alarma cuando ambos espectros de luz estén dentro de los rangos que especifican que lo detectado es una llama. También para mayor seguridad los sensores deben ser capaces de generar señales de auto diagnóstico, esto quiere decir que cada uno de los sensores debe ser capaz de realizar una auto evaluación y enviar una señal para indicar que está en buen estado y otra señal que indique que el sensor no se encuentra en buen estado. Este es el tipo de tecnología de punta que se requiere para un sistema de tanto riesgo como lo es uno de contra incendio para una refinería.

El sistema de contra incendio se activará cuando mínimo, un sensor envíe señal que detectó presencia de llama. Esto con el fin de hacer el sistema lo más seguro

posible y disminuir cualquier posibilidad de riesgo que pueda provocar accidente alguno.

Como se muestra en la figura 1.2 estos dispositivos se encargarán de enviar señales discretas al controlador. Después este está encargado de comunicarse con el panel de control de llama y gas (FGP, por sus siglas en inglés) y el sistema SCADA. El primer dispositivo se ubica en el cuarto de control de refinería y con él se puede supervisar de manera sencilla el estado del sistema de fuego y gas, el estado de los sensores y activar el sistema manualmente en caso de emergencia. El sistema SCADA está ubicado en el cuarto de control de GLP, desde aquí el operador puede monitorizar remotamente el estado del sistema, el estado de los detectores de llama y de ser necesario, si no se ha activado automáticamente el sistema de fuego y gas, se puede activar manualmente desde este cuarto de control. La función de este sistema SCADA se va a explicar a detalle más adelante.

Es necesario poder supervisar el estado del sistema de fuego y gas desde estos dos puntos, para que en caso de cualquier fallo de comunicación de algunos de los dos puntos, siempre se pueda supervisar y controlar el sistema contra incendio. Es decir si falla la comunicación con el sistema SCADA se va poder supervisar y controlar el sistema de fuego y gas desde el panel de control de llama y gas y en viceversa si falla el panel de control de llama y gas se va poder contar con el sistema SCADA. Entonces, siempre se va poder monitorizar el estado del sistema ya sea que falle el panel de control o el controlador. Es un asunto de redundancia de segundo nivel, el cual es necesario para este sistema que cuenta con un alto índice de peligro.

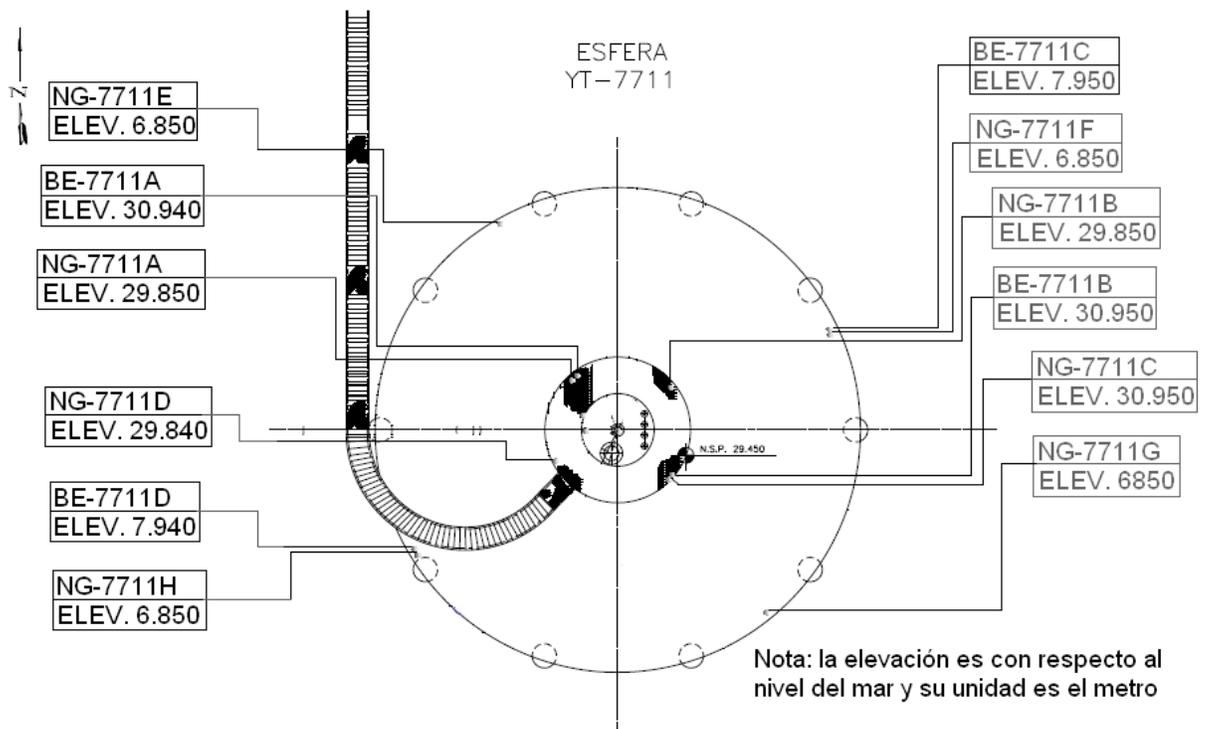


Figura 5.1 Diagrama de la ubicación de altura de los sensores de llama y gas

5.1.2 Subsistema de detección de gas

Para el sistema contra incendio se cuenta con 8 detectores de gas. A los cuales se le asignaron los siguientes tags: NG-7711A, NG-7711B, NG-7711C, NG-7711D, NG-7711E, NG-7711F, NG-7711G y NG-7711H. Se les fijó este TAG porque de acuerdo a la norma ISA S5.1, NG indica que son detectores de gas, después el 7711 es por la esfera donde se van a ubicar y la secuencia de A-H es para diferenciarlos uno de otro. En la figura 5.1 se muestra la elevación con respecto al mar que van a tener cada uno de los sensores. Se puede notar que los sensores NG-7711-A, NG-7711-B, NG-7711-C y NG-7711-D se colocarán en la parte superior de la esfera y los sensores NG-7711-E, NG-7711-F, NG-7711-G y NG-7711-H en la parte inferior de la esfera. Al igual que para los sensores de llama, no se puede especificar con detalle la visión de línea que van a tener los sensores, porque esta se determina una vez que haya finalizado la construcción de la esfera, esto se debe a que es solo en ese

momento que se puede determinar con exactitud los obstáculos que va tener la línea de visión de los detectores.

Parecido a los sensores de llama, los detectores de gas enviarán señales al controlador y de aquí se enviarán señales al panel de control de llama y gas y al sistema SCADA, ubicados en el cuarto de control de refinería y el cuarto de control de GLP, respectivamente. Desde estos dos puntos se puede supervisar el estado del sistema de fuego y gas, el estado de los sensores, el nivel de concentración de gas en la atmósfera y de ser necesario poder activar el sistema de fuego y gas.

Al igual que en el subsistema de detección de llama se envía señal a estos dos puntos para que en caso de que se pierda comunicación en uno de los equipos, siempre se va poder supervisar el estado del sistema por medio del otro equipo.

Para considerar que una atmósfera es no explosiva se debe mantener un balance adecuado entre el nivel de oxígeno y el nivel gas. Es por esta razón que para evitar una atmósfera explosiva, se debe mantener el porcentaje de gas en la atmósfera por debajo de lo denominado como: límite inferior de explosividad (LEL, por sus siglas en inglés), ya que, por debajo de este nivel hay más oxígeno que gas y por ende la atmósfera se considera no explosiva. Para el caso en que el porcentaje de gas en la atmósfera es mayor al LEL se tiene suficiente oxígeno y suficiente gas para que se presente una atmósfera explosiva. El LEL para GLP es aproximadamente de 2% en el aire para el propano y un 1.5% para el butano también en el aire. Como medida de precaución se dará una serie de alarmas para indicar que la concentración de gas se está acercando al LEL y así tomar las acciones necesarias para contrarrestar ese incremento. El sistema dará una primera alarma si se alcanza un 20% del LEL, esto indica que se ha alcanzado una alta concentración de gas y una segunda alarma si se alcanza un 50% LEL o mayor, esto indica que se ha alcanzado una muy alta concentración de nivel de gas. Estas alarmas pueden ser observadas en el HMI y en el panel de control de llama y gas. Para que se activen las alarmas es necesario que mínimo dos sensores de gas detecten alta o muy alta concentración de gas. Se optó

que mínimo sean dos sensores para activar las alarmas con el fin de evitar que se den falsas alarmas, según lo establecido en la norma API 2510. El alza en los niveles de concentración de gas se puede dar debido a fugas en la tubería o alrededor de la esfera YT-7711. La figura 5.2 muestra de manera gráfica los niveles donde se activa la primera y segunda alarma, así como también el límite entre la atmósfera explosiva y el LEL.

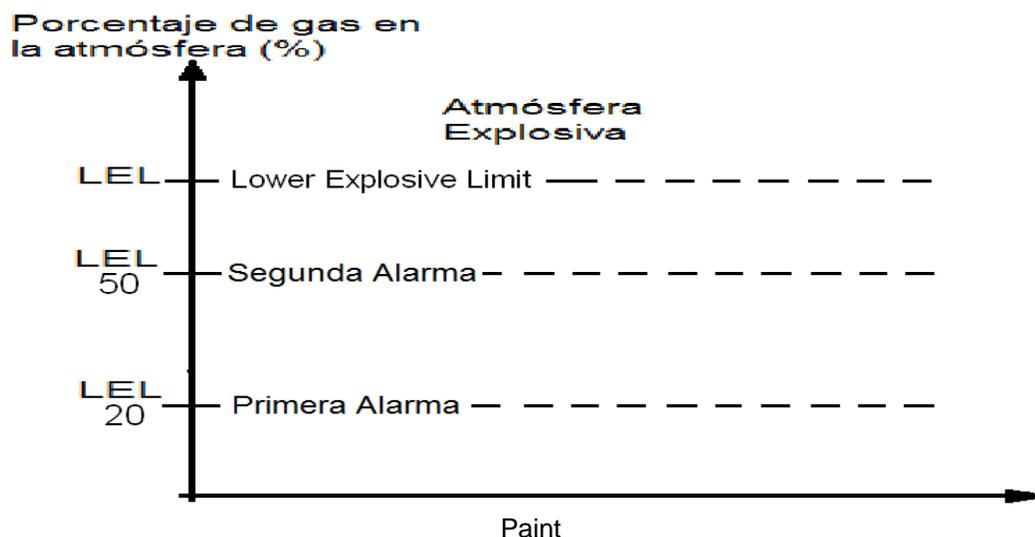


Figura 5.2 Niveles a considerar para la existencia de una atmósfera explosiva dependiendo del porcentaje de gas.

Si se alcanza un nivel de concentración de gas suficiente para crear una atmósfera explosiva solo se requiere de una fuente de ignición para que surja un incendio y consecuentemente ocurra una explosión. Este sistema se creó precisamente para poder prevenir con anticipación la aparición de una atmósfera explosiva, dando señales de alarma para que se tomen las acciones necesarias de prevención.

Las concentraciones de GLP en vapor son más pesadas que el aire, por lo que este tenderá a bajar al suelo. Aprovechando esta propiedad, se va construir un dique alrededor de la esfera para no dejar salir el gas al campo y confinarlo dentro del área del dique. El dique deberá ser capaz de contener la capacidad máxima del tanque esférico más el 25% del volumen total que puede contener la esfera, esto lo

recomienda la norma API 650. Es necesario que el suelo dentro del dique presente una pendiente de mínimo un 1%, también recomendado por norma. La pendiente va llevar al GLP a un sistema de drenaje que se va encargar de transportarlo a un dique remoto alejado del área de peligro. Se transporta al dique remoto porque este es un ambiente controlado, alejado del área de peligro y ahí la ventilación natural se encargará de dispersar el vapor de GLP para que no represente amenaza alguna.

5.1.3 Subsistema de control y operación de válvulas

El sistema va contar con un controlador exclusivo para el sistema de fuego y gas, marca Allen Bradley, líderes a nivel mundial en la industria de controladores. El controlador va estar ubicado en el cuarto de control de refinería y va a ser el cerebro del sistema contra incendio. Al controlador le van a llegar señales de los cuatro sensores de llama, de cada uno de los ocho sensores de gas, de la estación de emergencia ubicada en el campo, va estar en constante comunicación bidireccional con el sistema SCADA, el panel de control de llama y gas y las válvulas de diluvio, también el controlador va ser el encargado de activar las alarmas sonoras y visuales ubicadas en el campo y en los cuartos de control de refinería y de GLP.

El controlador activa de manera automática el sistema contra incendio una vez que uno o más de los detectores de llama envía señal de alarma de fuego. De igual manera, se activa automáticamente una primera alarma si dos o más sensores de gas detectan alta concentración de gas en la atmósfera y una segunda alarma si dos o más detectores de gas mandan señal de muy alta concentración de gas en la atmósfera. El sistema contra incendio se puede activar de forma manual utilizando la estación de emergencia ubicada en el campo, estos son activados por los operadores cuando se detecta una situación de emergencia. La señal proveniente de la estación de emergencia es enviada al controlador y este se encarga de activar el sistema contra incendio.

Como se mencionó anteriormente el controlador va estar en constante comunicación bidireccional con el sistema SCADA, ubicado en el cuarto de control de

GLP, y con el panel de control de llama y gas, ubicado en el cuarto de control de refinería. En la figura 5.3 se muestra un diagrama con un posible escenario de fallo de comunicación entre el controlador y el sistema SCADA y en la figura 5.4 otro posible escenario de fallo de comunicación pero esta vez entre el controlador y el panel de visualización.

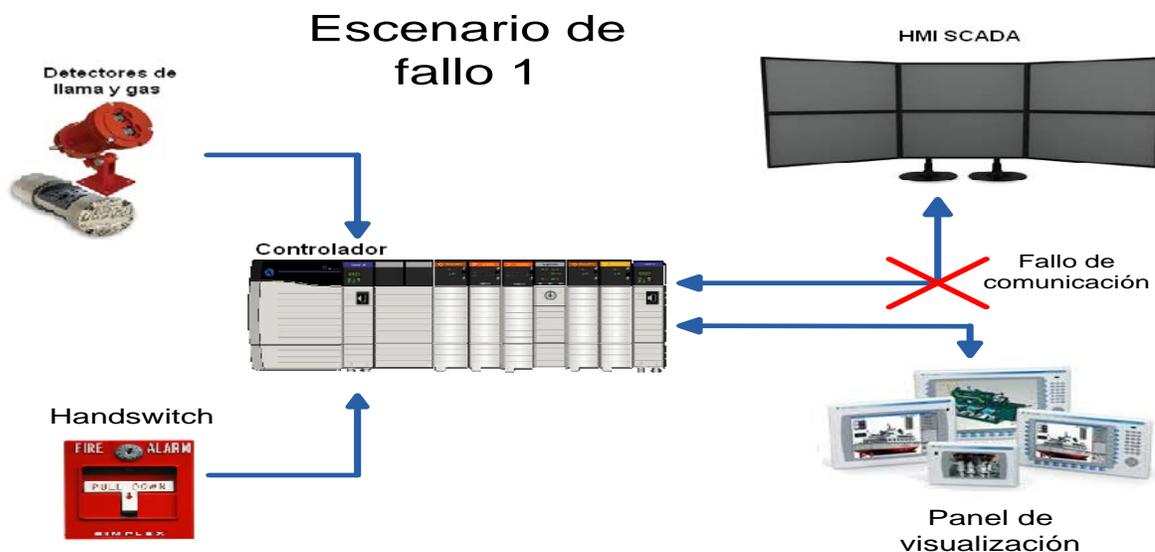


Figura 5.3 Diagrama de posible fallo de comunicación entre el controlador y el sistema SCADA

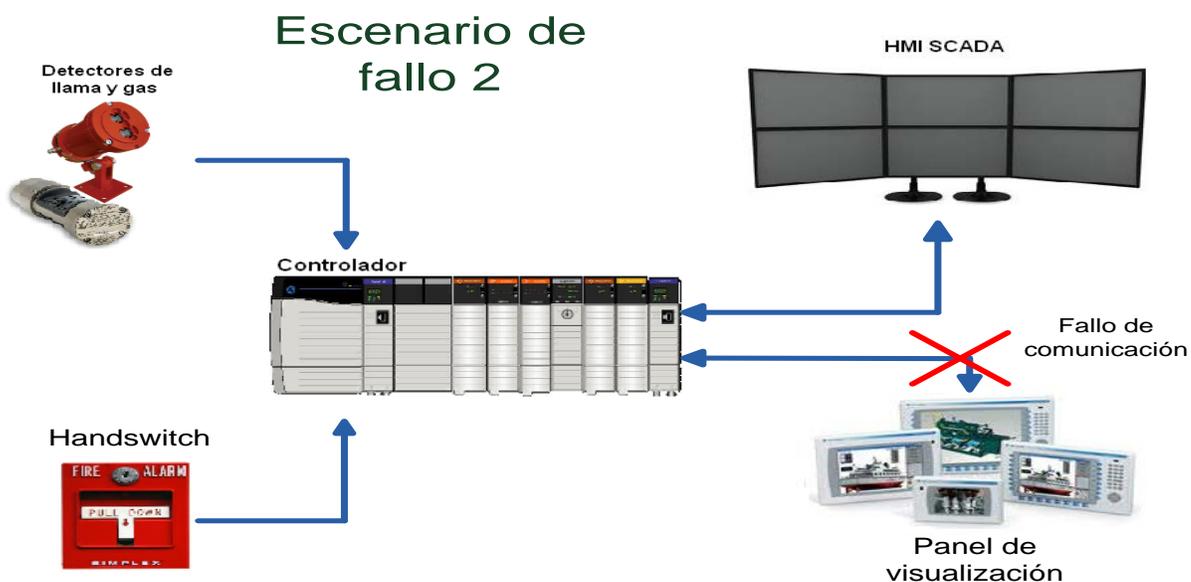


Figura 5.4 Diagrama de posible fallo de comunicación entre el controlador y el panel de visualización

Se puede observar, en la figura 5.3, en el escenario de fallo 1 que se perdió comunicación con el sistema SCADA, pero todavía se puede supervisar y controlar el estado del sistema contra incendio a través del panel de control de llama y gas. Para el caso del escenario de fallo 2, figura 5.4, a pesar de que se perdió la comunicación con el panel de visualización todavía se puede supervisar por completo el sistema contra incendio por medio del sistema SCADA. Se puede concluir que a pesar de fallas no deseadas de comunicación, aun así se tienen otras alternativas para no perder la vigilancia y control del sistema.

El sistema contra incendio va contar con 5 válvulas de diluvio las cuales se van activar cuando dejan de recibir un pulso eléctrico de 24 VDC provenientes del controlador. El tag que se les asignó a estas válvulas es: XSV-7711A, XSV-7711B, XSV-7711C, XSV-7711D y XSV-7711E. Las letras XSV según la norma ISA S5.1 se utilizan para identificar que son válvulas de diluvio. La numeración 7711 hace referencia a la esfera y las letras de A-E es para distinguir una válvula de la otra.

La válvula XSV-7711A es la encargada de suministrar agua al lado izquierdo del anillo central, primer anillo, segundo anillo, tercer anillo, cuarto anillo y al anillo inferior de la esfera. Cada uno de estos anillos va a tener una serie de rociadores encargados de bañar la esfera con agua cuando entre a operar el sistema contra incendio. En la siguiente figura se muestra las distintas válvulas de diluvio y la respectiva tubería que suministran.

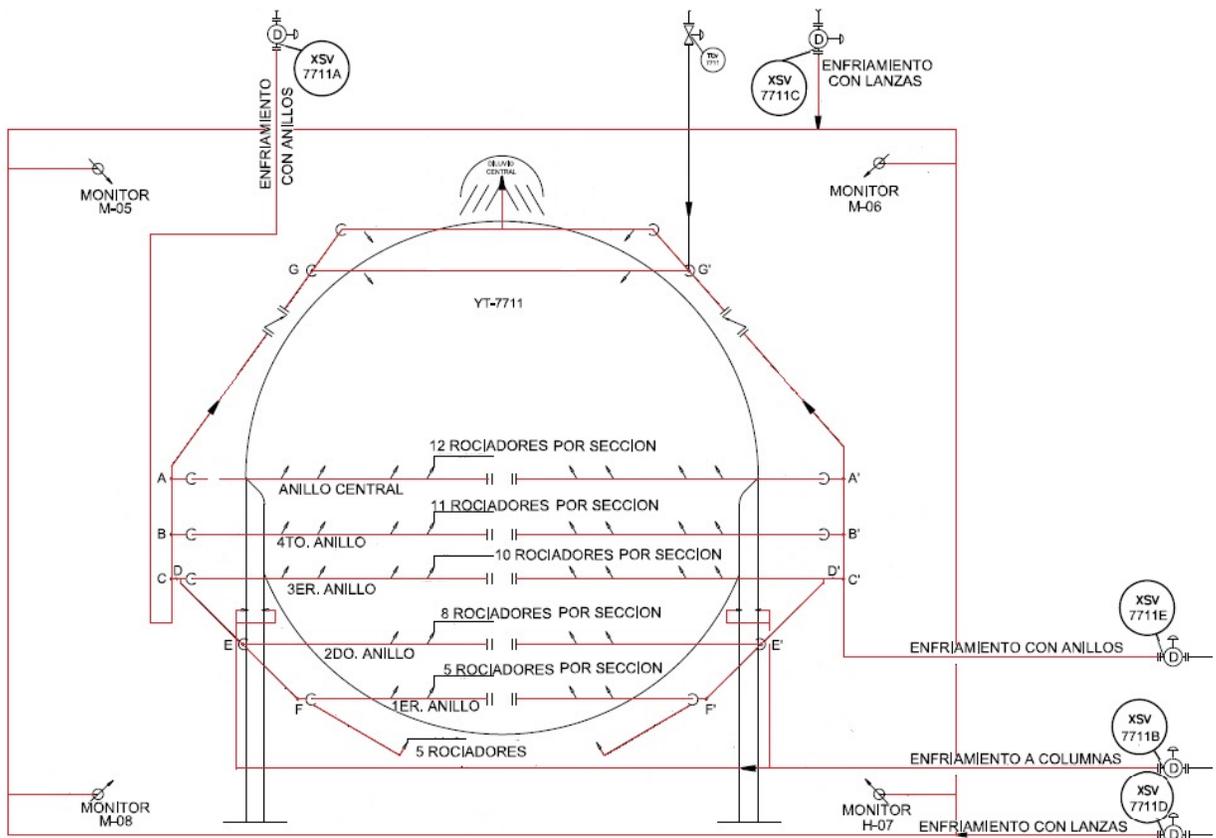


Figura 5.5 Válvulas de diluvio con sus respectivas tuberías de enfriamiento

La válvula de diluvio XSV-7711B es la encargada de suministrar agua a las columnas que soportan a la esfera. La XSV-7711C y XSV-7711D proveen de agua a las lanzas de agua que se van a localizar fuera del dique. Por último la válvula de diluvio XSV-7711E es la encargada de suministrar agua al lado derecho del anillo central, primer anillo, segundo anillo, tercer anillo, cuarto anillo y al anillo inferior de la esfera. Esta última válvula junto con la XSV-7711A provee de agua al anillo de la corona de la esfera y el diluvio central.

Cuando se le solicita al controlador ya sea de manera automática o de manera manual activar el sistema contra incendio de la esfera, todas las válvulas de diluvio se abren simultáneamente por medio de una señal que dejan de recibir del controlador. En caso de fallo y alguna de las válvulas no se abra correctamente, se tiene como opción un bypass que cumple la función de canalizar el agua por una vía

de tubería secundaria usando válvulas de apertura y cierre. Estas válvulas de apertura y cierre son manuales, o sea hay que ir al campo para que entren en operación. Cada bypass con su respectiva válvula se encuentra en paralelo a cada una de las válvulas de diluvio.

Todas las válvulas de diluvio traen de fábrica la opción de agregarles un indicador de presión en la recámara del diafragma. Con este indicador se puede saber si la válvula está completamente abierta, cerrado o cae en error de apertura, esto último quiere decir que no está completamente abierta o completamente cerrada. Esto se hace por medio de la diferencia de presión que se obtiene cuando la recámara del diafragma libera el agua en ella. Si la válvula de diluvio se encuentra cerrada existe una mayor presión en la recámara que cuando se encuentra abierta. La señal generada por el indicador de presión se envía al sistema SCADA y al panel de control de llama y gas. De esta manera a parte de poder controlar la apertura de las válvulas, también se puede revisar remotamente si estas están cerradas, abiertas o en estado de error.

Como medida de seguridad se optó por emplear unas válvulas de diluvio, que una vez activadas, estas solo pueden ser desactivadas manualmente, esto quiere decir que un operador debe ir al campo y a cada una de las válvulas de diluvio se le debe reponer su respectivo bloqueo mecánico. Una vez realizado esto, quedan listas para ser utilizadas nuevamente cuando sea necesario. Este procedimiento se estableció para asegurar que las válvulas de diluvio se cierren solo cuando se haya confirmado por completo que el incendio o situación de emergencia haya concluido.

Por la naturaleza del proceso y prioridades de seguridad del sistema se solicita que las válvulas de diluvio sean de tipo normalmente abierta. Se solicita esta especificación porque es preferible que en caso de emergencia, como por ejemplo que se corte por alguna razón todo suministro de energía, la válvula quede abierta y choreando la esfera a que quede cerrada y no se pueda contar con el suministro principal de agua. Es por esta razón que las válvulas de diluvio bajo condición

normal, van a estar energizadas por el controlador con 24 Vcc. La válvula también debe ser de apertura rápida porque es indispensable una pronta respuesta ante una situación de emergencia.

5.1.4 Subsistema de interfaz hombre máquina

Es favorable que el sistema SCADA cuente con un sistema de interfaz apropiado y agradable al operador que lo va utilizar. La operación remota de la esfera, se configurará utilizando esta interfaz, que se conoce como Sistema de Interface Hombre-Máquina (HMI). Esta se mostrará en un video wall de 2x3, que consiste en 6 distintos monitores muy unidos y con divisiones muy pequeñas. En la figura 1.2 se muestra estos seis monitores que los operadores van a tener para monitorizar la operación de la esfera. La comunicación entre el controlador y el HMI es por medio de una red Ethernet IP.

Para el diseño del HMI se tomó como referencia los sistemas de HMI que tiene implementado RECOPE para otros procesos de control. Siguiendo el código de colores, forma de navegar a través de pantallas e iconos que los operadores actuales de RECOPE están acostumbrados a utilizar. Para las tuberías, si estas están de color rojo indican que no hay flujo de agua y cuando cambian a color verde indican que si hay flujo de agua. A esta última condición se le agregan líneas a la tubería de color rojo, para indicar la dirección que toma el flujo de agua. En la figura 5.6 se muestra la pantalla principal que va observar el operador para supervisar y controlar el sistema contra incendio de la esfera YT-7711.

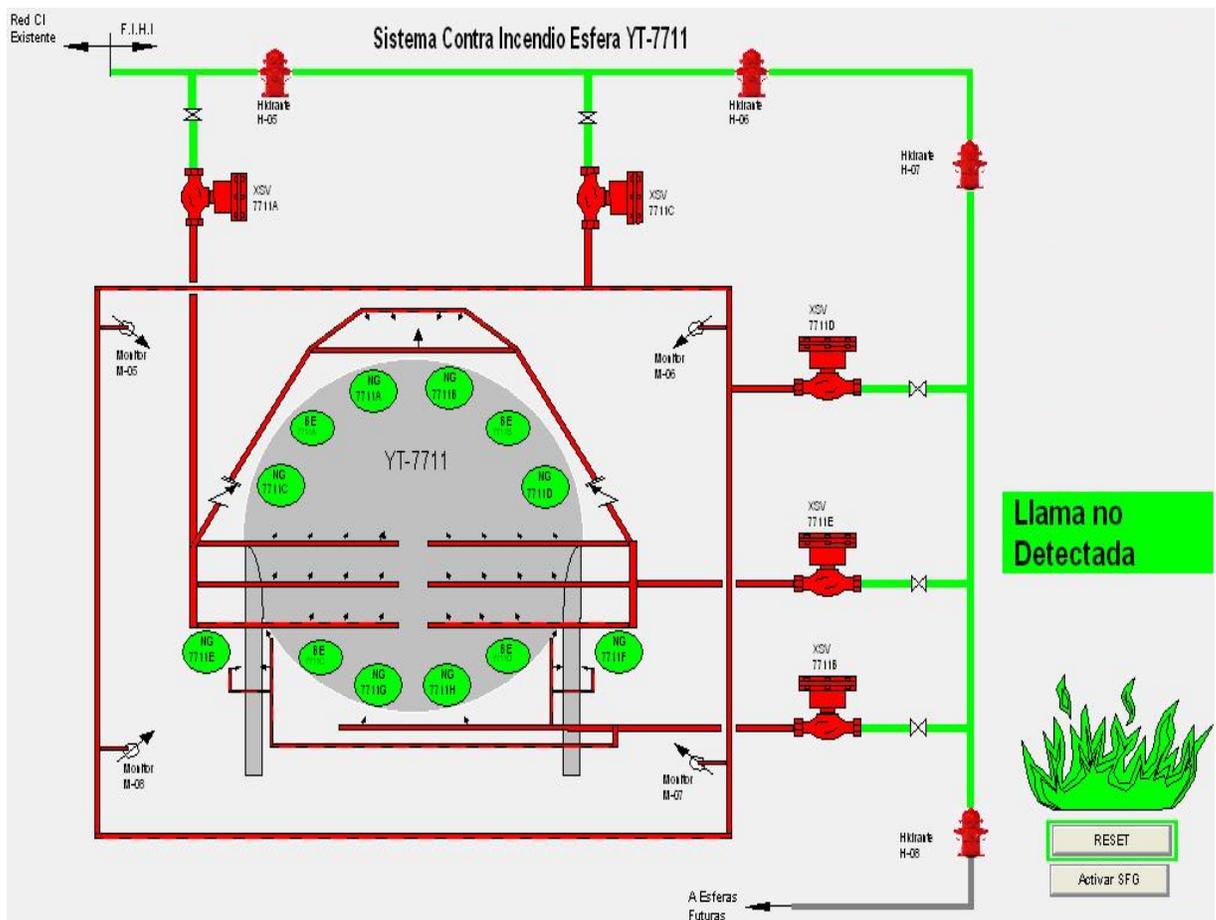


Figura 5.6 Pantalla principal del sistema HMI

En la figura anterior se puede notar la esfera, las cinco válvulas de diluvio, las tuberías, los cuatro sensores de llama, los 8 sensores de gas y el estado del sistema y alarmas.

Para las cinco válvulas de diluvio se tiene que si están de color verde indican que están abiertas, rojas indican que están cerradas y amarillo parpadeante que hubo problema en la apertura. En la figura 5.7 se muestra como cambia de color la válvula de diluvio y la tubería si se abre una válvula de diluvio, en este caso la XSV-7711A.

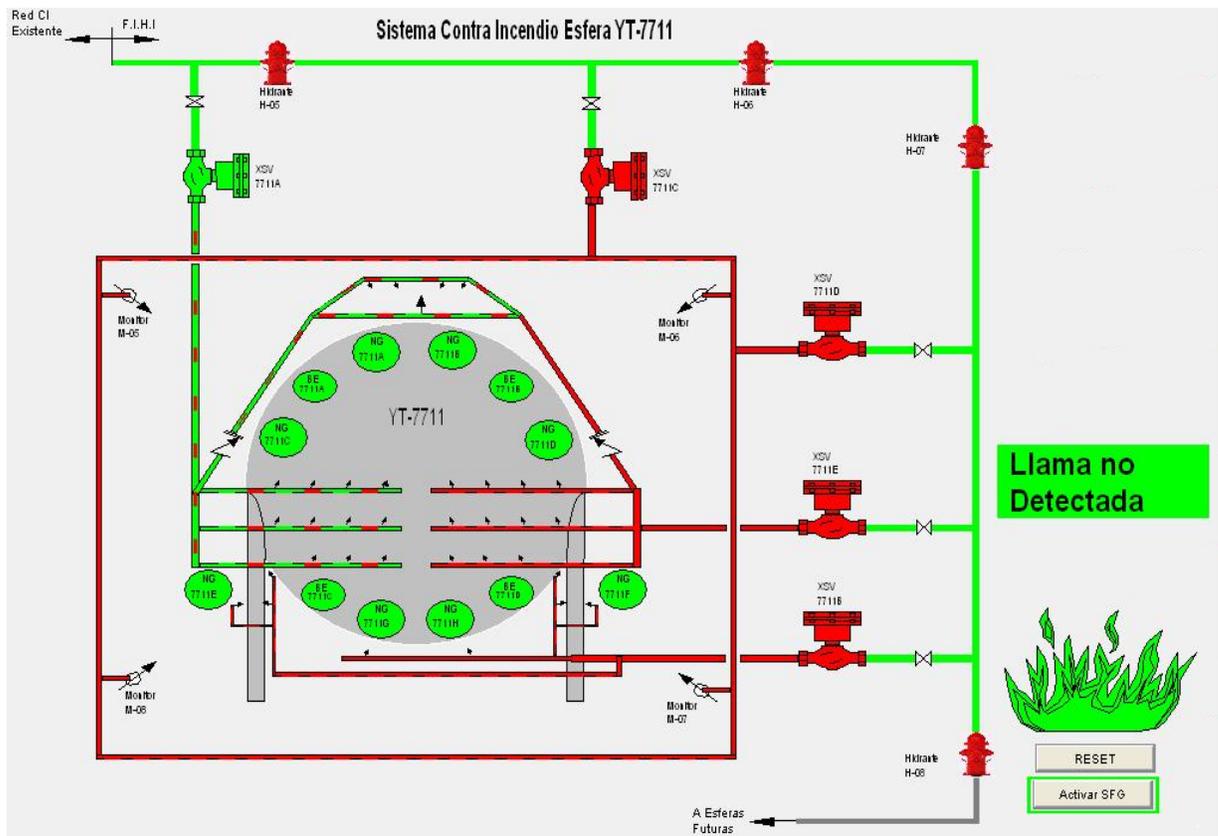


Figura 5.7 Válvula XSV-7711A abierta en pantalla principal del HMI

Se puede notar que la válvula XSV-7711A cambió a color verde y la tubería conectadas a ella también. Esto mismo sucede con las demás válvulas de diluvio si se abren.

Si el operador quiere entrar a más detalle sobre el estado de cualquiera de las válvulas de diluvio, puede darle clic con el puntero del mouse a cualquiera de los iconos que representan las válvulas de diluvio. Esta acción lo llevará a una nueva pantalla como la que se muestra en la figura 5.8.

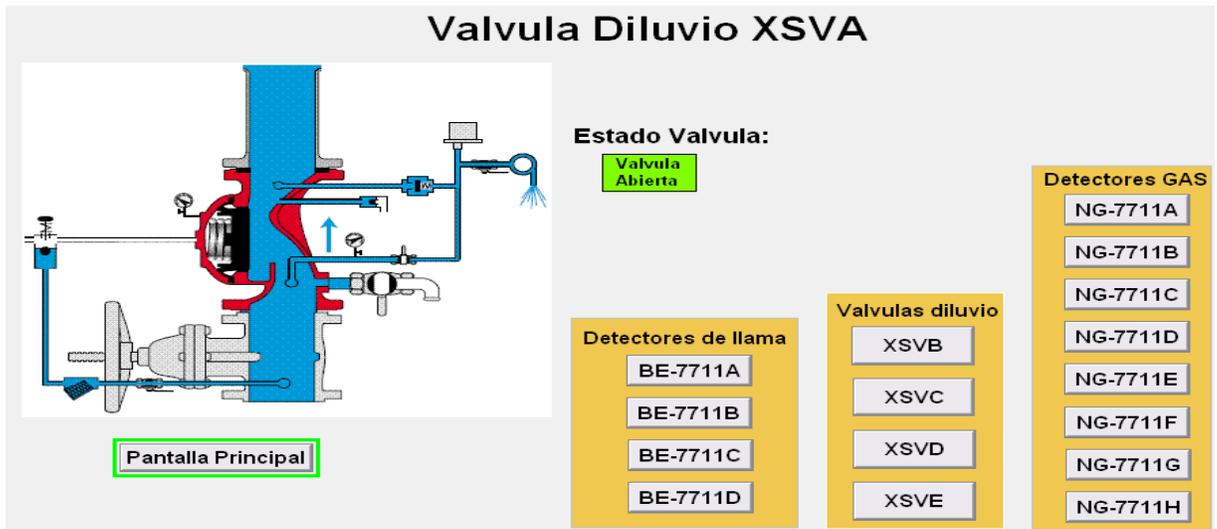


Figura 5.8 Pantalla válvula de diluvio para el sistema HMI

En este caso se dio clic al icono de la válvula de diluvio XSVA y nos envió a esta pantalla, donde se puede ver una figura de la válvula de diluvio y que esta se encuentra abierta y no presenta problemas de apertura. También desde esta pantalla se puede por medio de botones regresar a la pantalla principal, a la pantalla de cualquiera de las otras válvulas de diluvio y de los sensores.

En la figura 5.9 se muestra las posibles figuras en caso de que la válvula se encuentre abierta, cerrada o en error de apertura.

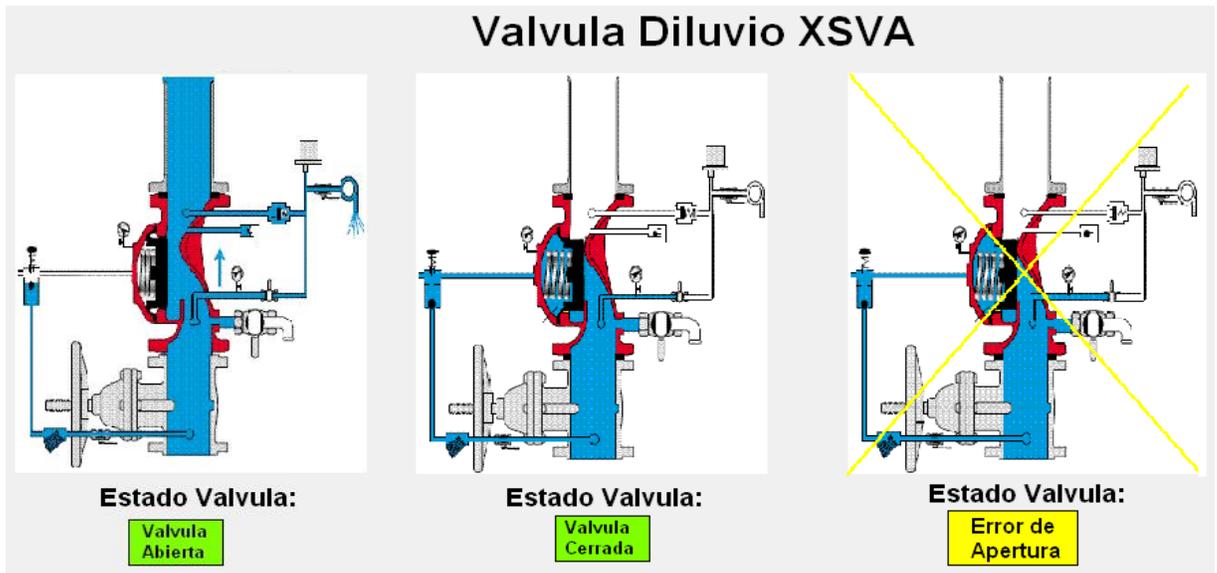


Figura 5.9 Diferentes estados para las válvulas de diluvio en el sistema HMI

Se puede ver que para un estado de error de apertura se muestra un cuadro en amarillo indicando este estado y una equis del mismo color sobre la figura de la válvula, recordando que el color amarillo debe estar parpadeando, para llamar lo más pronto posible la atención del operador.

Por medio de este sistema HMI, el operador en el cuarto de control de GLP puede ir supervisando cuando los operadores en campo van cerrando las válvulas de diluvio porque el color de las válvulas y la tubería va ir pasando de verde a rojo.

Volviendo a la pantalla principal mostrada en la figura 5.6, se tiene para los sensores de llama un color verde para indicar que se encuentran en buen estado, amarillo parpadeante que existe un error de datos o que están en mal estado y rojo parpadeante cuando detectan llama. Se puede conocer el estado de los sensores por la señal de auto diagnóstico que generan estos mismos, indicando si están en buen o mal estado. Al igual que para las válvulas de diluvio, se le puede dar clic a cualquiera de los iconos que representan los sensores de llama y aparecerá una pantalla informando sobre el estado del sensor deseado y si ha enviado señal de presencia de llama. Al dar clic sobre el icono del detector de llama aparece una pantalla como la que se muestra en la figura 5.10.

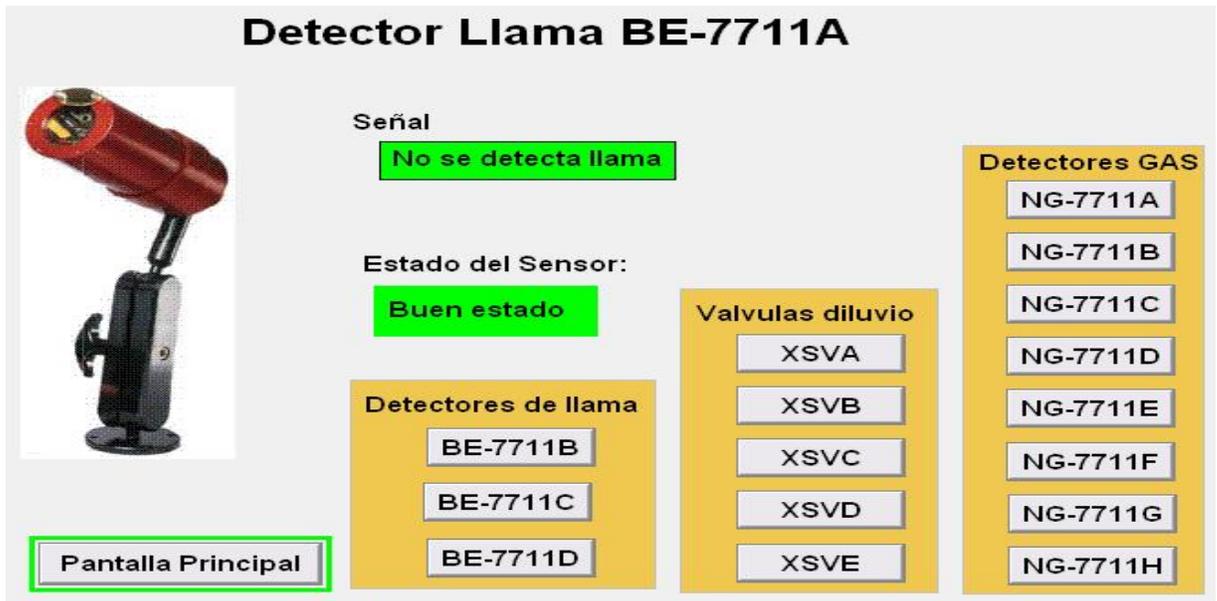


Figura 5.10 Pantalla Detector de llama para el sistema HMI

Como se puede apreciar también se cuenta con botones que permiten ir a la pantalla principal, a los otros sensores y a las válvulas de diluvio. Las condiciones que pueden tener los distintos sensores de llama se muestran en la figura 5.11.



Figura 5.11 Diferentes estado para los detectores de llama en el sistema HMI

Para los sensores de gas se procede con la misma lógica que para los detectores de llama. Al darle clic a cualquiera de los iconos de los sensores de gas en la pantalla principal se muestra la pantalla que aparece en la figura 5.12.



Figura 5.12 Pantalla para los detectores de gas para el sistema HMI

De igual manera se va representar con color verde cuando los sensores se encuentran en buen estado, de color amarillo parpadeante cuando se encuentran en mal estado o existe error de dato y color rojo parpadeante cuando la concentración de gas es alta o muy alta para la primera y segunda alarma respectivamente, es decir una concentración de gas mayor a 20% del LEL o mayor a 50% del LEL.

En la figura 5.13 se muestra los diferentes estados que puede tener los sensores de gas.

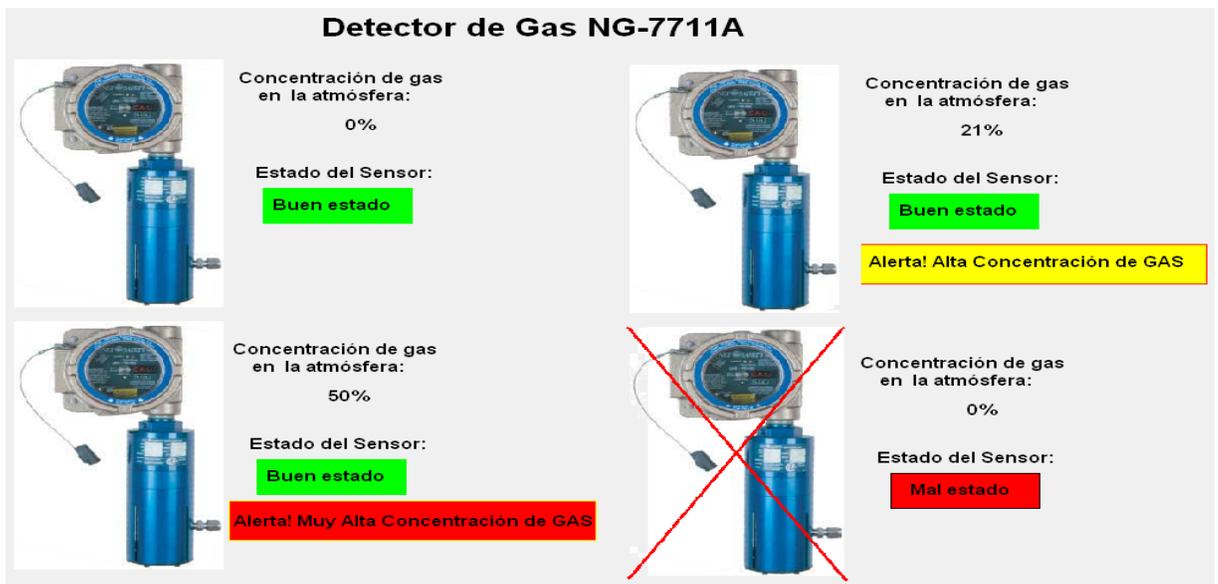


Figura 5.13 Diferentes estados para los detectores de llama en el sistema HMI

Por medio de este sistema HMI, el operador en el cuarto de control de GLP puede ir supervisando en tiempo real, el estado de los sensores y alguna situación de emergencia.

Debido a la importancia de mantener registrado todos los eventos de alarma, se debe presentar en esta misma interfaz HMI, una ventana que el operador pueda acceder para revisar el sumario de alarmas y eventos. Tal ventana puede ser similar a la mostrada a continuación.

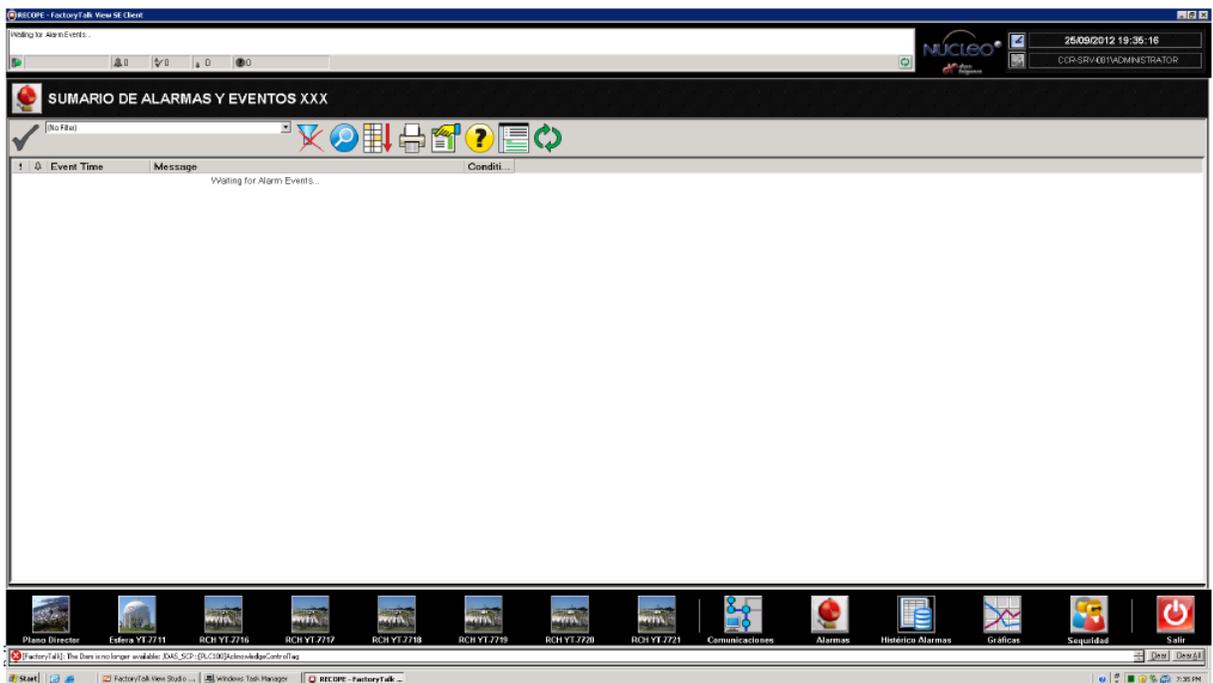


Figura 5.14 Sumario de alarmas y eventos

En el cuarto de control se va contar con una impresora que puede ser utilizada para imprimir este sumario de alarmas y eventos.

5.1.5 Subsistema de activación y desactivación de alarmas

Se van a tener instaladas alarmas sonoras y alarmas visuales para alertar a los operadores cuando exista situación de emergencia. Ambos tipos de alarmas se ubicarán tanto en el cuarto de control de GLP como en el campo.

En el campo (en la zona alrededor de las esferas):

Se instalarán indicadores visuales y sonoros situados en la parte superior e inferior de la esfera, para que el operador que se encuentre realizando trabajo en esta zona pueda darse por enterado de alguna situación anómala.

Ambos tipos de indicadores deberán ser activados por la generación de alarma del sistema F&G y cualquier otro sistema de seguridad que vaya a tener la esfera YT-7711. Este sistema de alarmas se activa con cualquier presencia de situación de emergencia.

Indicadores visuales: se utiliza un semáforo de estado para áreas clasificadas, cuyos colores representan los siguientes estados:

- a. Verde, para indicar que no hay situación de emergencia.
- b. Amarillo parpadeante para alarmas generales.
- c. Rojo parpadeante para condiciones de emergencia.

Las alarmas generales son todas aquellas alarmas que se generan pero que no son por detección de fuego y/o alta concentración de gas y/o muy alta concentración de gas. Ejemplo de esta condición es cuando se requiere aislar la esfera para entrar en acción de mantenimiento o limpieza de esta, en una situación como esta, se va encender la luz amarilla del semáforo de estado.

Se le llama condición de emergencia, cuando se detecta fuego y/o alta concentración de gas y/o muy alta concentración de gas. El semáforo enciende su luz roja parpadeante para indicar este estado.

Indicadores auditivos: Estos deben ser sirenas pequeñas para área clasificada.

En el cuarto de control de operadores:

Debe haber indicadores visuales y sonoros ubicados en el cuarto de control, con el fin de alertar al operador de una situación de emergencia y así este pueda realizar las acciones necesarias del caso.

Ambos tipos de indicadores deberán ser activados por la generación de alarma de del sistema F&G o cualquier otro sistema de seguridad. Este sistema de alarmas se activa con cualquier presencia de situación de emergencia, esto con el fin de alertar a los operadores presentes en las zonas respectivas.

Indicador visual: Se debe presentar por medio de una alarma parpadeante ubicada dentro del cuarto de control y en la pantalla del HMI en el cuarto de control.

Indicadores auditivos: Estos deben ser sirenas pequeñas.

Como estos indicadores son para el cuarto de control, se opta por una solución combinada para áreas clasificadas. Un solo dispositivo, que se encargue de dar la indicación tanto visual como sonora dentro del cuarto de control.

5.2 Descripción del hardware

5.2.1 Detectores de llama

A continuación en la tabla 5.1 se describen los requisitos que el contratista debe cumplir a la hora de comprar e instalar los detectores de llama para el sistema contra incendio de la esfera YT-7711.

Tabla 5.1 Descripción general de los requisitos para los sensores de llama

Datos Generales				
Tag	BE-7711A	BE-7711B	BE-7711C	BE-7711D
Servicio	Detectar fuego parte superior esfera	Detectar fuego parte superior esfera	Detectar fuego parte inferior esfera	Detectar fuego parte inferior esfera
Cuerpo				
Material	Aluminio	Aluminio	Aluminio	Aluminio
Clasificación eléctrica	Clase I, división 1, Grupos C & D	Clase I, división 1, Grupos C & D	Clase I, división 1, Grupos C & D	Clase I, división 1, Grupos C & D
Montaje	En tubo de 2" diámetro			
Tipo de sensor				
Tipo	Ultravioleta/Infrarrojo	Ultravioleta/Infrarrojo	Ultravioleta/Infrarrojo	Ultravioleta/Infrarrojo
Rango de detección del detector	120° Horizontal/ 95° Vertical			
Rango espectro medición	IR: 4.4µ/ UV: 185 a 260 nanómetros			
Tiempo de respuesta	Menos de 5 segundos			
Tiempo de retardo	Configurable de 0 a 5 segundos			
Tipo de sensibilidad	Ajustable	Ajustable	Ajustable	Ajustable
Capacidad contactos	1A a 24 VDC	1 A. A 24 VDC	1 A. A 24 VDC	1 A. A 24 VDC
Conexión eléctrica	3/4" FNPT	3/4" FNPT	3/4" FNPT	3/4" FNPT
Caja Nema	NEMA 250 tipo 6P			
Suministro eléctrico	24 VDC o VCC			
Auto diagnóstico	Si	Si	Si	Si
Tipo unidad electrónica	A base de microprocesador			
Certificado intrínsecamente seguro	Si requerido	Si requerido	Si requerido	Si requerido
Accesorios				
Accesorios de calibración	Kit de calibración	No	No	No
Condiciones ambientales				
Rango humedad	0-95 % no condensable			
Temperatura (°C): Max/ Min	35°/17°	35°/17°	35°/17°	35°/17°

De los fabricantes que actualmente se encuentran en el mercado se destacó la empresa Net Safety Monitoring INC, la cual es líder mundial en la industria de monitorizar. Esta empresa ofrece sensores con las características presentadas anteriormente, debido a la garantía y pruebas de fábrica se le recomienda al contratista utilizar estos sensores. A continuación en la figura 5.15 se muestra una imagen de los detectores de llama tipo infrarrojo y ultravioleta, modelo UV/IRS-A, que ofrece la empresa Net Safety Monitoring INC. ^[16]



Figura 5.15 Detectores de llama recomendados para el sistema contra incendio

Repasando lo estudiado en el apartado 3.3.1, se tiene como función de transferencia para el sensor de llama:

$$H(s) = \frac{K}{\tau*s+1} \quad (5.1)$$

Dónde:

K: Ganancia sensor

τ : constante de tiempo del sensor

La ganancia del detector en el rango utilizado esta dado por la relación entre el rango de entrada y el de salida de la siguiente manera:

$$K = \frac{\text{Rango salida}}{\text{Rango entrada}} = \frac{20mA - 4mA}{4.4\mu m} = 3.63mA/\mu m \quad (5.2)$$

Además, se toma de la hoja de datos respectiva del sensor la constante de tiempo del transmisor para propano como combustible, la cual se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 5. 2 Tiempo de respuesta para el sensor de llama^[19]

Combustible	Tamaño	Distancia (pies/m)	Tiempo de respuesta (segundos)
n-Heptane	1' x 1'	140/42.7	10.6
Metanol	36" Plume	40/12.2	9.7
Methane	16" Plume	100/30.5	5.9
Propano	1' x 1'	35/10.6	4.0
Jet Fuel	1' x 1'	90/27.4	4.7
Diesel	1' x 1'	80/24.4	5.1
Lube Oil	1' x 1'	50/15.2	6.7
Etanol	1' x 1'	60/18.3	5.7
Gasolina	1' x 1'	120/36.6	5.9

Por lo tanto se obtiene de la hoja de datos que el tiempo de respuesta para el sensor de llama para propano como combustible es de 4 segundos.

Por lo que la función de transferencia para el sensor de llama para el sistema contra incendio queda de la siguiente manera:

$$H(s) = \frac{3.63}{4*s+1} \quad (5.3)$$

5.2.2 Detectores de Gas

A continuación en la tabla 5.3 se describen los requisitos que el contratista debe cumplir a la hora de seleccionar e instalar los detectores de gas para el sistema contra incendio de la esfera YT-7711.

Tabla 5.3 Descripción general de los requisitos para los detectores de gas

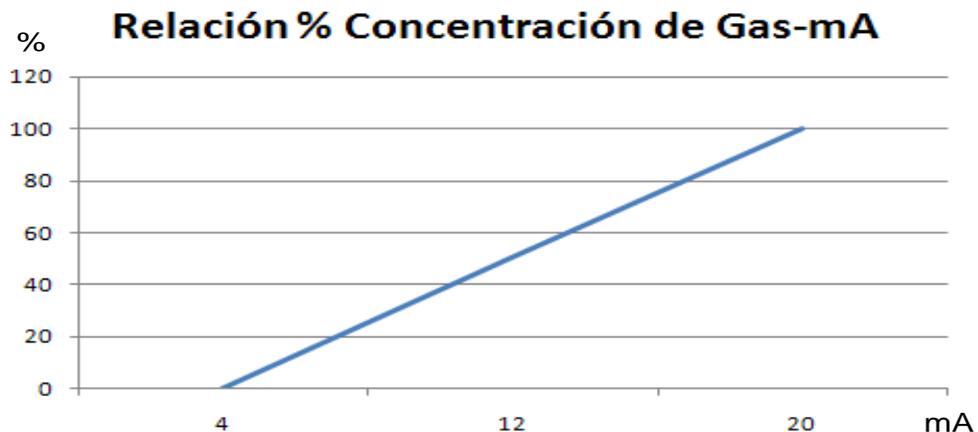
Datos generales				
Tag	NG-7711A	NG-7711B	NG-7711C	NG-7711D
Servicio	Detecta GLP área esfera YT-7711			
Auto diagnóstico	Sí	Sí	Sí	Sí
Localización instalación	Parte superior de la esfera			
Cuerpo				
Material Caja	Aluminio	Aluminio	Aluminio	Aluminio
Clasificación eléctrica	Clase I, división 1, Grupos C & D	Clase I, división 1, Grupos C & D	Clase I, división 1, Grupos C & D	Clase I, división 1, Grupos C & D
Tipo de Sensor				
Tipo	Infrarrojo	Infrarrojo	Infrarrojo	Infrarrojo
Gas a detectar	GLP	GLP	GLP	GLP
Rango de detección	0-100% LEL	0-100% LEL	0-100% LEL	0-100% LEL
Alarma por muy alta	Si, 50% LEL	Si, 50% LEL	Si, 50% LEL	Si, 50% LEL
Alarma por alta	Si, 20% LEL	Si, 20% LEL	Si, 20% LEL	Si, 20% LEL
Capacidad contactos	5A 24 VCD/ 250 VCA			
Unidad electrónica	Microprocesador/ tipo inteligente	Microprocesador/ tipo inteligente	Microprocesador/ tipo inteligente	Microprocesador/ tipo inteligente
Configurable	Sí	Sí	Sí	Sí
Precisión	3% escala total	3% escala total	3% escala total	3% escala total
Tiempo de respuesta	Menor a 5 segundos			
Número de digits	8	8	8	8
Caracteres Tipo	Alfanumérico	Alfanumérico	Alfanumérico	Alfanumérico
Caja NEMA	NEMA 7	NEMA 7	NEMA 7	NEMA 7
Conexión Eléctrica	3/4 " FNPT	3/4 " NPT	3/4 " NPT	3/4 " NPT
Salida para indicar % concentración gas	4-20mA	4-20mA	4-20mA	4-20mA
Accesorios				
Gases de calibración	Propano	Propano	Propano	Propano
Condiciones ambientales				
Temperatura operación (°C): Mín. / Máx.	-20°C a +75°C	-20°C a +75°C	-20°C a +75°C	-20°C a +75°C
Rango humedad	0-100% no condensable	0-100% no condensable	0-100% no condensable	0-100% no condensable

Las características para los sensores NG-7711E, NG-7711F, NG-7711G Y NG-7711H son las mismas que las listadas en la tabla anterior, la única diferencia es que serán instalados en la parte inferior de la esfera.

Al observar la tabla 5.3 se especifica que los detectores de gas deben tener una salida de 4-20mA, para indicarle al controlador el porcentaje de concentración de gas existente en la atmosfera. Por lo tanto, se tiene una relación lineal entre la corriente de salida "i" de los sensores y el porcentaje de concentración de gas "%". La ecuación 5.4 muestra como calcular la concentración de gas a partir de los mili amperios que se tenga en la salida del sensor.

$$\% \text{ concentración de gas} = (0.0625 * i - 0.25) * 100 \quad (5.4)$$

En la figura 5.16 se muestra de manera gráfica la relación lineal de la ecuación anteriormente mencionada.



Microsoft Office Excel

Figura 5.16 Relación porcentaje concentración de gas-mA

Despejando la variable "i" de la ecuación 5.4, se puede encontrar la corriente que el sensor envía como salida, cuando se activa la primera señal de alarma generada por alta concentración de gas a 20% LEL:

$$i = \frac{(\% \text{ concentración de gas} \div 100) + 0.25}{0.0625} = \frac{0.2\text{mA} + 0.25\text{mA}}{0.0625} = 7,2\text{mA} \quad (5.5)$$

Con una concentración de 20%LEL, el detector de gas envía como salida 7,2mA al controlador, esto se puede corroborar con la gráfica mostrada en la figura 5.16

Realizando el mismo procedimiento se puede determinar que la segunda alarma se genera cuando el sensor envía una señal de salida de 12mA, que es cuando la concentración de gas en la atmósfera es de 50% LEL.

De los fabricantes que actualmente se encuentran en el mercado se destaca la empresa Net Safety Monitoring INC., la cual es líder mundial en la industria de monitorizar. Esta empresa ofrece el detector de gas millennium SIR100 con las características presentadas anteriormente y debido a la garantía y pruebas de fábrica se le recomienda al contratista utilizar este modelo de sensor. A continuación en la siguiente figura se muestra una imagen de los detectores de gas, utilizando el espectro de onda de luz infrarroja que ofrece la empresa Net Safety Monitoring INC.^[16]



Figura 5.17 Detectores de gas recomendados para el sistema contra incendio

Para calcular la función de transferencia para los detectores de gas se realiza el mismo procedimiento que se desarrolló en la sección 5.2.1, calculando primero la ganancia:

$$K = \frac{20mA - 4mA}{1} = 16mA \quad (5.6)$$

De la hoja de datos del sensor de gas se tiene que la constante de tiempo es de 4 segundos. Por lo tanto la función de transferencia queda de la siguiente manera:

$$H(s) = \frac{16}{4*s+1} \quad (5.7)$$

5.2.3 Estación manual de emergencia para el sistema contra incendio

La estación de emergencia está ubicada en el campo cercano a la esfera YT-7711, es de acción mecánica, de operación manual y una vez activada entra en operación el sistema contra incendio de la esfera.

Debido a la funcionalidad que presenta este dispositivo, debe ser de fácil acceso y visibilidad. Esto con el fin de que pueda ser activado por cualquier operador o personal presente en la zona que observe una condición de riesgo o conato de incendio. En la figura 5.18 se muestra una estación manual del sistema contra incendio marca simplex. Se recomienda utilizar el modelo simplex 2099-9144, el cual es muy utilizado en muchos de los campos de la industria, utilizado para condiciones de clima pesado y para aplicaciones que se requiere instrumentos a prueba de explosiones.



Figura 5.18 Estación manual del sistema contra incendio

Esta estación manual es calificada como NEMA 4x. Aprobado para instalarse en áreas de clase I, grupo B, C y D; clase II, grupo E, F y G. Tiene un rango de operación de temperatura de -55°C a 150°C para aplicaciones al aire libre. Los contactos funcionan con 1A 30VDC; 10A 120VAC. Para desactivar este sistema de estación manual, es necesario ir donde está ubicada cada estación y utilizar la llave correspondiente. Esto como medida de seguridad para testificar que las estaciones se desactiven solo cuando se confirma que ya no existe ninguna amenaza proveniente de alguna situación de emergencia. [36]

5.2.5 Válvulas de diluvio

Primero se consideró trabajar con una válvula de diluvio marca BERMAD modelo FP 400E-2M. Esta válvula es robusta, diseñada para funcionar correctamente con aplicaciones de plantas petroquímicas. Posee la característica de ser a prueba de explosión para áreas de alto riesgo y solo se puede cerrar manualmente. La válvula descrita anteriormente se muestra en la siguiente figura.



Figura 5.19 Válvula de diluvio Bermad modelo FP 400E-2M

El modelo FP 400E-2M cuenta con un resorte que mantiene cerrado el diafragma. Esto es posible debido a la diferencia de presión existente, al tener una presión mayor en la recámara del solenoide, se mantiene presionado el resorte. Para abrir la válvula de diluvio es necesario que esta reciba un pulso eléctrico que provoca

liberación de agua en la recámara de solenoide provocando una disminución en la presión que ejerce el resorte. En la siguiente figura se muestra el corte lateral de la válvula de diluvio en estado abierto y en estado cerrado.

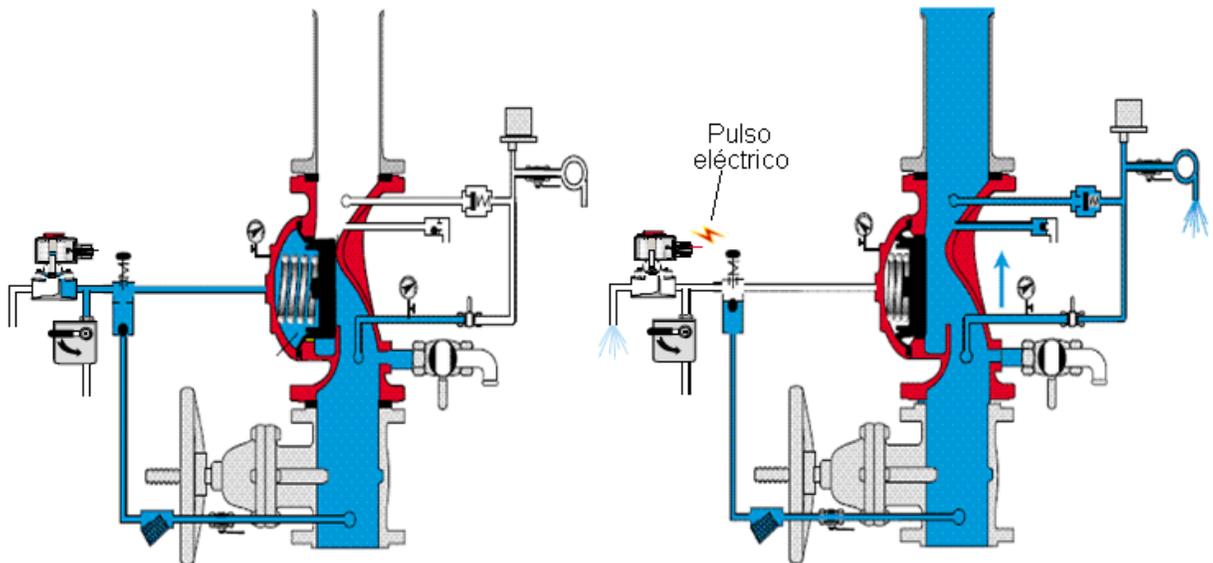


Figura 5.20 Estado abierto y cerrado de Válvula de diluvio Bermad modelo FP-400E-2M

En un principio se consideró esta válvula para implementarla en el sistema contra incendio porque cumple con las especificaciones anteriores, pero se deseaba conseguir una con menos componentes mecánicos móviles. Por consiguiente se optó por una válvula de diluvio Inbal serie 700D, específicamente el modelo 799D. Estas válvula Inbal representan un gran avance en el diseño conceptual de válvulas automáticas de control de agua. Desarrolladas a partir de principios básicos, dichas válvulas están exentas de las limitaciones impuestas por la mano humana que caracterizan a las válvulas de control convencionales, accionadas por diafragma. El desarrollo de las válvulas Inbal tienen como concepto primordial “sin componentes mecánicos móviles”, una característica significativa en sistemas de protección contra incendios, en los que el funcionamiento fiable es el criterio más importante para la selección de equipos y en especial de las válvulas de control. ^[19]

La construcción sin componentes mecánicos móviles garantiza una vida prolongada de operación confiable, reduciendo los costos de mantenimiento y no se pega (por

corrosión interna) al permanecer en posición cerrada por períodos prolongados. Las características de apertura rápida, aunque suave, de la válvula Inbal eliminan el golpe de ariete y los daños consecuentes de efecto de onda.

Esta válvula cuenta con recubrimiento anticorrosivos que posibilitan su buen funcionamiento en lugares cercanos al mar o con alto contenido salino, este es el caso para la refinadora ubicada en Limón, CR. A continuación se lista una serie de requerimientos mínimos con los cuales cumple la válvula Inbal.

- Pocos componentes mecánicos móviles
- Conexión roscada o bridada
- Capaz de acoplarse a una tubería de 8"
- Presión de trabajo máximo: 300psi (21 bar)
- Presión de trabajo mínima: 20 psi (1.5 bar)
- Temperatura de agua máxima: +65°C
- Posición de instalación vertical u horizontal
- Previene la activación en falso por efectos de onda y/o golpes de ariete
- Pruebas hidráulicas en fábrica, en condiciones reales de presión y flujo.
- Apertura manual o automática activado con señal eléctrica de 24 VDC la solenoide
- Debe rearmarse y ser puesto en funcionamiento nuevamente, después de haber sido abierta.

En la siguiente figura se muestra una imagen de la válvula de diluvio Inbal serie 700D.

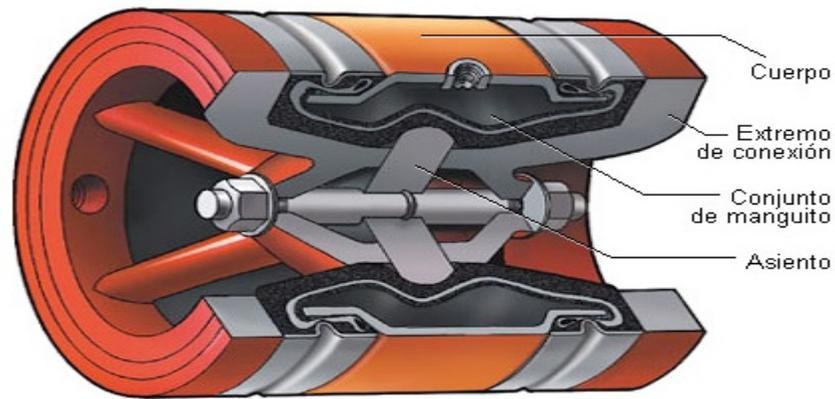


Figura 5.21 Válvula Inbal serie 700D

El principio de funcionamiento para mantener la válvula cerrada consiste en aplicar una presión de entrada a la cámara de control. El equilibrio entre la presión y la fuerza en el actuador mantienen la válvula en posición cerrada herméticamente, como se muestra en la siguiente figura:

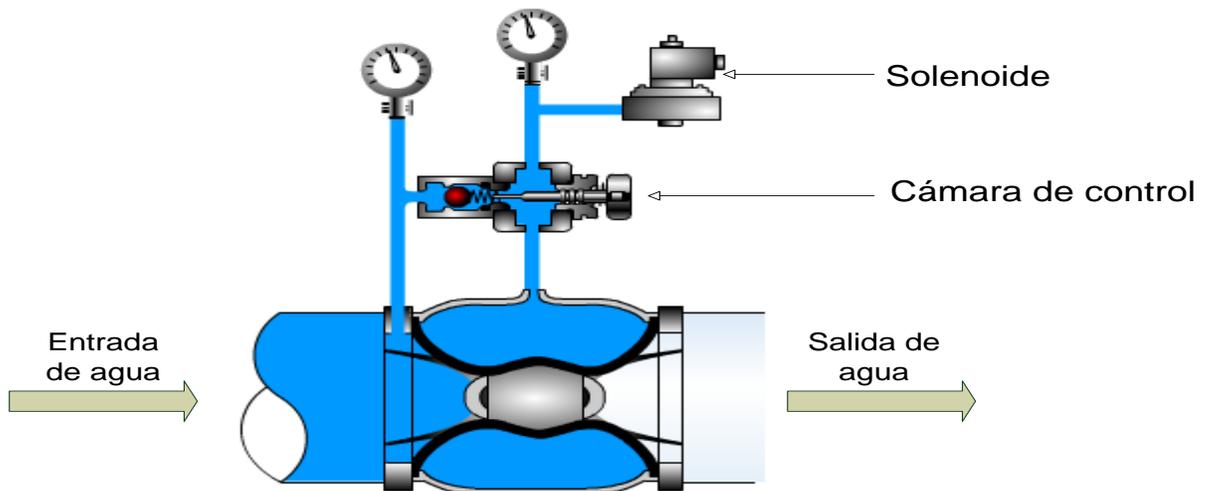


Figura 5.22 Válvula Inbal en posición – sellado hermético

Para abrir la válvula es necesario activar el solenoide por medio de una señal eléctrica. Al efectuar esta acción se libera el agua contenida en la cámara de control a la atmósfera y esto provoca una disminución en la presión de esta misma cámara y por ende aparece un desequilibrio de presiones provocando que la válvula Inbal se abra completamente.

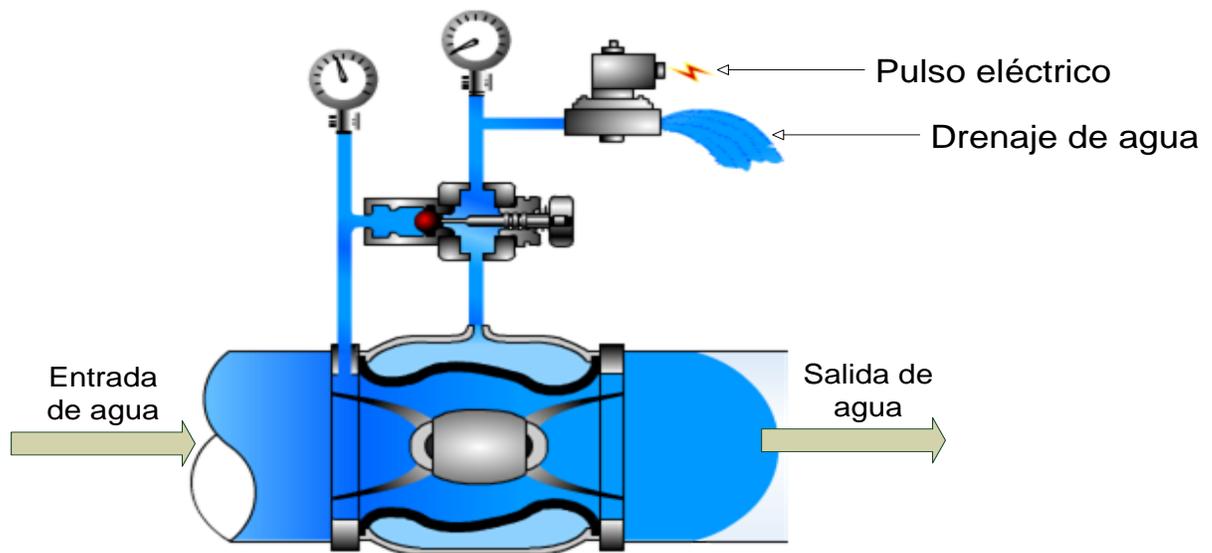


Figura 5.23 Válvula Inbal en posición apertura completa

En la hoja de datos de la válvula Inbal 799D se muestra los valores respectivos de los coeficiente de flujo de la válvula (C_v) dependiendo del diámetro de la tubería donde se va a instalar. Esta información se muestra en la siguiente imagen.

Diámetro de Válvula		Coeficiente de Caudal		$\Delta P = \left(\frac{Q}{K_v}\right)^2$	$\Delta P = \left(\frac{Q}{C_v}\right)^2$
mm	pulg	K_v	C_v	$\Delta P =$ Pérdida de Carga en bar.	$\Delta P =$ Pérdida de carga en psi.
40	1½"	60	70	$Q =$ Velocidad de flujo en m ³ /h.	$Q =$ Velocidad de flujo en gpm.
50	2"	90	105	$K_v =$ Coeficiente de caudal.	$C_v =$ Coeficiente de caudal.
65	2½"	115	133		
80	3"	140	162		
100	4"	330	383		
150	6"	610	708		
200	8"	1150	1334		
250	10"	1630	1891		
300	12"	2365	2743		

Figura 5.24 Datos del valor del coeficiente de flujo C_v de la válvula de diluvio

Teniendo las características propias del sistema contra incendio, el cual cuenta con una tubería de 8" para las válvulas de diluvio y a una apertura total el coeficiente de flujo de la misma es de 1334 gpm. Con estos datos y repasando del marco teórico que la relación entre el coeficiente de flujo C_v y el coeficiente de ganancia de la válvula K_v está dada por la ecuación 5.8, se puede obtener el valor de K_v .

$$K_v=0.865 \cdot C_v \quad (5.8)$$

$$K_v=0.865 \cdot 1334 \approx 1150 \text{ m}^3/\text{h} \quad (5.9)$$

Para esta válvula de diluvio se tiene que la constante de tiempo o tiempo de respuesta es de 2 segundos. Por ende, repasando lo que se ha estudiado, la ecuación de la función de transferencia para una válvula de control está dada por la siguiente ecuación.

$$G_v(s) = \frac{K_v}{\tau \cdot s + 1} \quad (5.9)$$

Dónde:

K_v : Ganancia sensor

τ : constante de tiempo del sensor

Por lo que se tiene como resultado la siguiente ecuación para la función de transferencia de la válvula de control.

$$G_v(s) = \frac{1150}{2 \cdot s + 1} \quad (5.10)$$

5.2.4 Controlador ControlLogix

Como parte importante para la realización del control automático del sistema contra incendio, está el estudio matemático de los lazos de control; esto ya que a partir de dicho estudio se proponen los compensadores específicos para cada uno de los lazos cerrados.

El estudio matemático de los lazos de control involucra las características propias de cada instrumento de control a utilizar y del sistema físico de la planta como lo puede ser tuberías, producto a manipular, entre otros.

Elaborar un lazo de control para el sistema completo contra incendio desarrollado en este proyecto, llegaría a ser sumamente complejo, con una función de transferencia de orden muy elevado y diagramas de bloques tan complicados que perderían su propósito de dar al diseñador un método simple de modelar un sistema. Por esta razón se ha simplificado el sistema completo en varios subsistemas, abarcando en esta sección los dos más importantes como lo son el de detección y control de llama y el de detección y control de gas.

Para el lazo de control y detección de llama primeramente se hace referencia a la función de transferencia del sensor de llama calculada en la sección 5.2.1, la cual se vuelve a presentar a continuación:

$$H(s) = \frac{3.63}{4*s+1} \quad (5.11)$$

Recordando también la función de transferencia de la válvula de diluvio:

$$G_v(s) = \frac{1150}{2*s+1} \quad (5.12)$$

Que se puede expresar de la siguiente manera

$$G_v(s) = \frac{575}{s+\frac{1}{2}} \quad (5.13)$$

Con esta ecuación se puede ubicar el lugar de las raíces, en donde se cuenta con un polo en -0.5. Para diseñar el compensador se va utilizar el criterio de compensado por ubicación de un cero (z_o) arbitrario. Este criterio consiste en colocar el valor de cero a la derecha del polo real más lento, en este caso -1/2, siempre tomando en cuenta no llegar a afectar la estabilidad del sistema y manteniéndose entre el rango establecido por el eje $j\omega$ y el polo real más lento. Por lo tanto, como criterio de diseño se escogerá colocar el cero en -0.3.

Otro criterio de diseño consiste, en considerar para un compensador de atraso una ganancia K_p . Esta ganancia proporcional del compensador va ser un valor menor a la unidad, esto debido a que se tiene por parte del sistema una ganancia de la válvula sumamente alta, por lo que la ganancia total del sistema debe reducirse con el compensador. Es necesario esta reducción, porque al tener una ganancia muy elevada se van a tener sobre impulsos muy elevados y en ocasiones puede provocar que el sistema entre en oscilación. Por este motivo se escoge una ganancia proporcional de $K_p=0.001$ reduciendo en una milésima parte la ganancia propia de la válvula de diluvio. Por lo tanto la función del compensador resultante es la que se muestra a continuación.

$$G_p(s) = 0.001 \frac{s+0.3}{s} \quad (5.14)$$

Con esto, se tiene que el lazo cerrado de detección y control de llama al agregar el compensador queda conformado como se muestra en la siguiente figura.

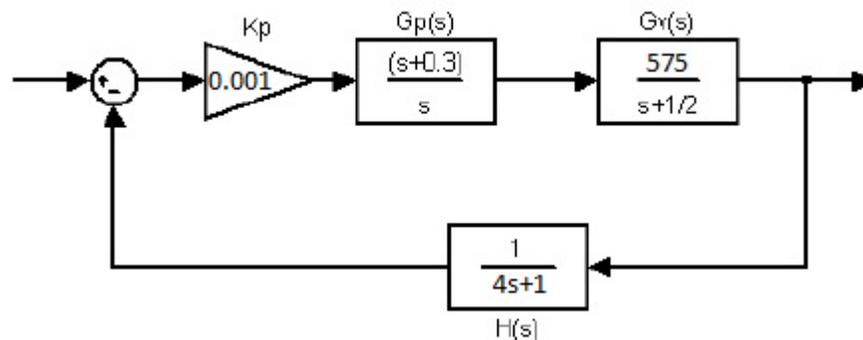


Figura 5.25 Diagrama de bloque de la detección y control de llama

Para el lazo de control y detección de gas, es necesario recordar la función de transferencia calculada en la sección 5.2.2.

$$H(s) = \frac{16}{4s+1} \quad (5.15)$$

Con la función de transferencia de la válvula de diluvio presentada en la ecuación 5.13, se muestra un polo en -0.5.

Al diseñar el compensador para el lazo de control y detección de gas se parte del mismo criterio utilizado para obtener el compensado del lazo de control y detección de llama explicado anteriormente. Por lo tanto como criterio de diseño se escogerá el cero del compensador en -0.4. De igual manera para reducir la ganancia total del sistema y evitar los grandes sobre impulsos y oscilaciones propios de sistema se introducirá como ganancia proporcional del compensador un valor menor a la unidad. Este valor de ganancia proporcional es de $K_p=0,001$, para reducir en una milésima parte la ganancia propia de la válvula de diluvio. La función del compensador resultante es por lo tanto la que se muestra a continuación.

$$G_p(s) = 0.001 \frac{s+0.4}{s} \quad (5.16)$$

Así, se tiene que el lazo cerrado de control y detección de gas del sistema contra incendio, al agregar el compensador queda conformado como se muestra en la siguiente figura.

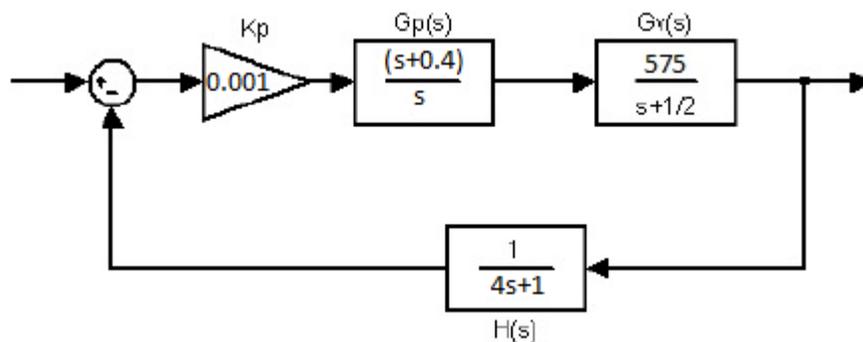


Figura 5.26 Diagrama de bloque de la detección y control de gas

Debido al alto nivel de seguridad que se exige para este sistema contra incendio, es necesario que el controlador en el plantel de refinería sea exclusivo para el sistema de fuego y gas, es decir que no sea utilizado para otros propósitos o sistemas dentro del plantel, también debe ser robusto y fabricado para uso industrial. Este controlador debe estar certificado para poder operar en el manejo y control de sistemas de fuego y gas en refinerías. Preferiblemente el controlador debe estar calificado con un nivel de integridad de seguridad (SIL, por sus siglas en inglés) mayor o igual a 2.

Por las razones anteriormente dadas, se utilizó un controlador central modelo ControlLogix 5560 (L6), perteneciente a la familia Logix de Allen-Bradley, este se colocó en el chasis 1756 que dispone de 17 ranuras para agregar módulos. Este controlador permite un rápido procesamiento de datos y comunicación con diferentes tipo de redes, como los son DeviceNet, Ethernet/IP, ControlNet, entre otras; teniendo así la posibilidad de integrar una solución fiable y eficiente.

La figura 5.27 muestra el controlador utilizado con un chasis de 10 ranuras en vez de 17 ranuras.



Figura 5.27 Controlador ControlLogix utilizado para el sistema contra incendio

A este controlador se le agregan módulos de entrada y salida como el mostrado en la figura 5.28, el cual es el módulo de entradas digitales 1756-IA16. Para este proyecto se utilizaron dos de estos módulos de entradas digitales. ^[3]



Figura 5.28 Módulo de entradas digitales 1756-IA16

También se utilizó dos módulos 1756-0B16E como módulos de salida digital, estos son físicamente parecidos a los de entrada digital. Cada módulo de entrada y salida digital tiene 20 pines, de los cuales 16 son para entradas o salidas y a cada pin le entra o sale 24 VDC.

Además se utilizó un módulo de salida analógica (1756-OF8) y dos módulos de entrada analógica (1756-IF16) que tienen 36 pines cada uno, de los cuales 16 son para datos de entrada. Cuentan con un rango para entrada de $\pm 10.5V$. El módulo de salida analógico cuenta con 20 pines de $\pm 10V$.^[2]

A continuación en las figuras 5.29, 5.30 y 5.31 se presentan las conexiones de los pines para el módulo de entrada digital 1 (E1), módulo de entrada digital 2 (E2) y módulo de entrada analógica 3 (E3) respectivamente.

Módulo E1 1756-IA16

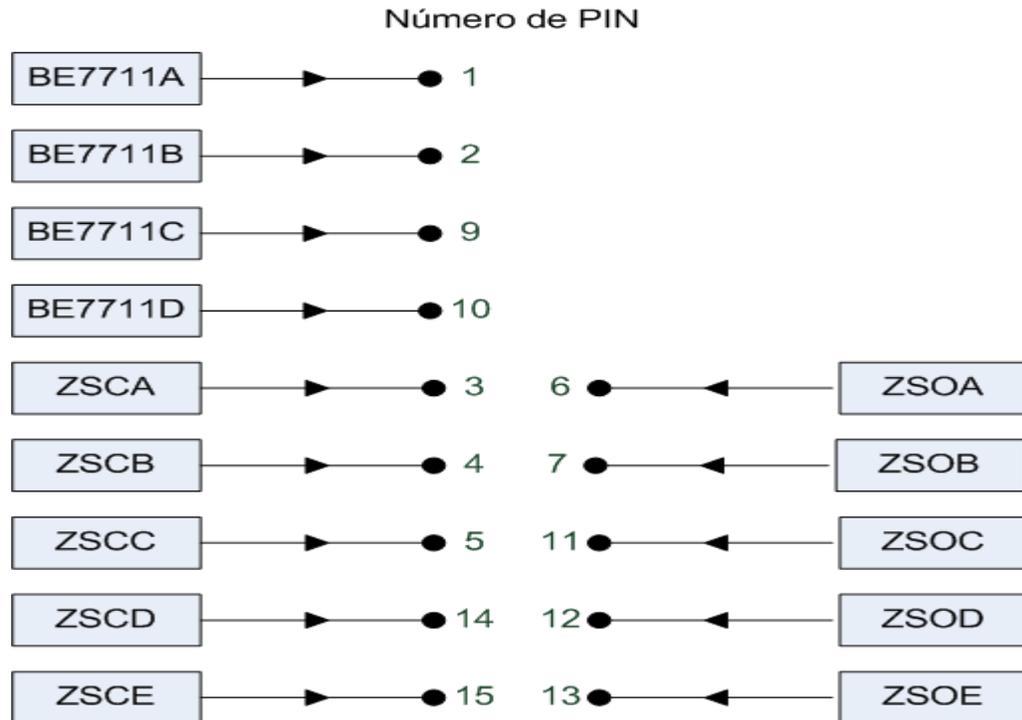


Figura 5.29 Pines utilizado del módulo de entrada E1

Las entradas ZSC y ZSO son los indicadores de posición provenientes de la válvula de diluvio, indican si la válvula está abierta o cerrada respectivamente y se presentará una condición de error si ambas señales están activas o si ambas señales están apagadas.

Los módulos de entrada digital tienen internamente dos fusibles electrónicos, como modo de resguardo en caso de que se reciba una señal mayor a la deseada, los fusibles se activan y protegen al módulo. Un fusible es para proteger la entrada proveniente de los pines del cero al siete y el otro es para proteger la entrada de los pines ocho al quince. Por esta razón, como parte del diseño, se repartió como entrada un detector de llama de la parte superior de la esfera y otro de la parte inferior de la esfera dentro de los pines que cubre el primer fusible (los pines del cero al siete). Los otros dos sensores restantes se conectaron al segundo fusible (los

pinos del ocho al quince). De esta manera se permite siempre tener cubierta el área inferior y superior de la esfera a pesar de que se active uno de los fusibles.

De la misma manera se trabaja con los indicadores de posición. Unos van conectados a los pines del primer fusible y otros a los pines del segundo fusible. Es necesario asegurarse que el sistema siempre entre en funcionamiento por lo que se tomaron en cuenta este tipo de escenarios para llegar a la mejor solución, donde a pesar de que se presenten fallos el sistema puede funcionar en caso de emergencia.

Módulo E2 1756-IA16

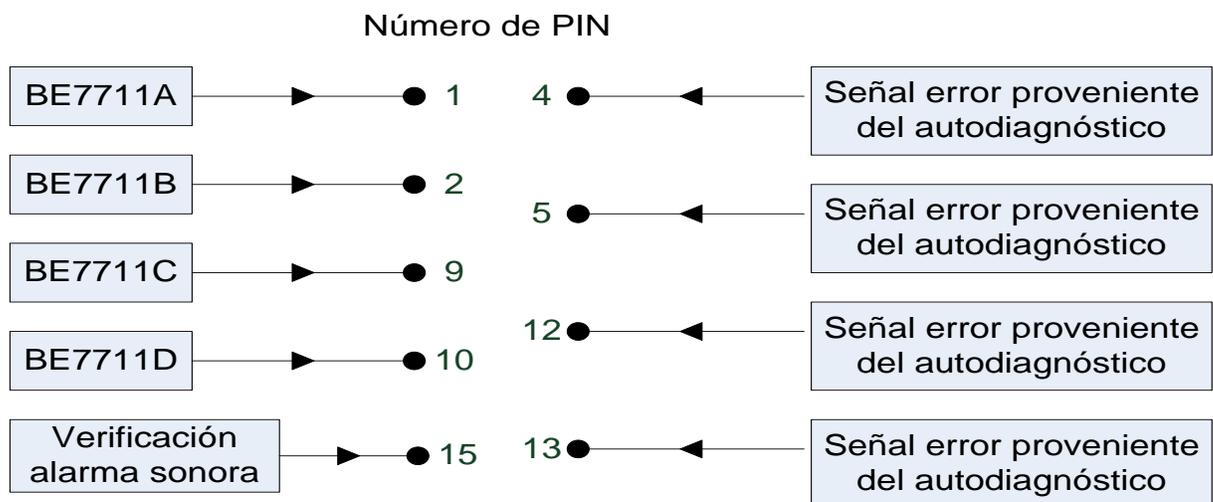


Figura 5.30 Pines utilizado del módulo de entrada E2

El módulo E2 tiene nuevamente las entradas de los detectores de llama, esto con el objetivo de enfatizar en la seguridad de un sistema con redundancia doble. A este módulo también le entran las señales de error provenientes del auto diagnóstico que realiza cada uno de los detectores, igualmente distribuidos entre los dos fusibles. Por último el módulo E2 tiene como entrada en el pin quince una señal de verificación de alarma sonora. Esta consiste, en que, una vez activada la alarma sonora que anuncia la presencia de situación de emergencia, el controlador debe recibir una señal por el pin quince para confirmar que la alarma sonora verdaderamente se activó.

Módulo E3 1756-IF16

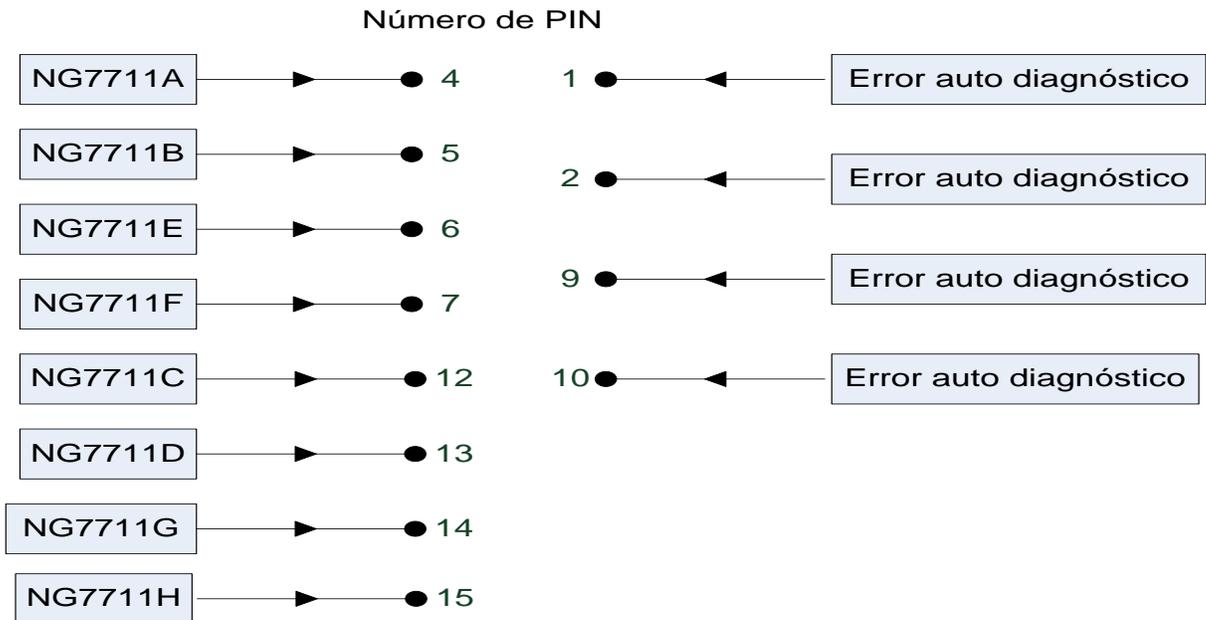


Figura 5.31 Pines utilizado del módulo de entrada E3

Como tercer módulo de entrada E3 se tiene conectado los ocho detectores de gas igualmente distribuidos tomando, en cuenta los dos fusibles. Cuatro sensores están conectados en el primer fusible y los cuatro restantes en el segundo fusible. Para el primer fusible se tiene dos detectores ubicados en la parte superior de la esfera y dos ubicados en la parte inferior de esta. Esta misma conexión se mantiene para el segundo fusible, así a pesar de que haya algún fallo y se active uno de los fusibles, el sistema pueda seguir detectando en el área tanto superior como inferior de la esfera.

A este tercer módulo de entrada también le entra cuatro señales de auto diagnóstico cada una generada por cuatro detectores de gas. Las cuatro señales de auto diagnóstico, provenientes de los cuatro sensores restantes entran al módulo E4.

El cuarto módulo (E4), tiene la misma configuración de pines que el módulo E3 mostrado en la figura 5.31. Se tienen dos módulos con la misma configuración de pines para corroborar la veracidad de los datos, es decir para verificar un fallo en el caso de que se mantenga una desigualdad de comparación entre dos puntos y

también para dar énfasis a la seguridad de funcionamiento, manteniendo el sistema con redundancia doble.

A continuación la conexión de los pines de los módulos de salida digital se presenta en las figura 5.32. La conexión de los pines del módulo de salida analógica (S3) se presenta en la figura 5.33.

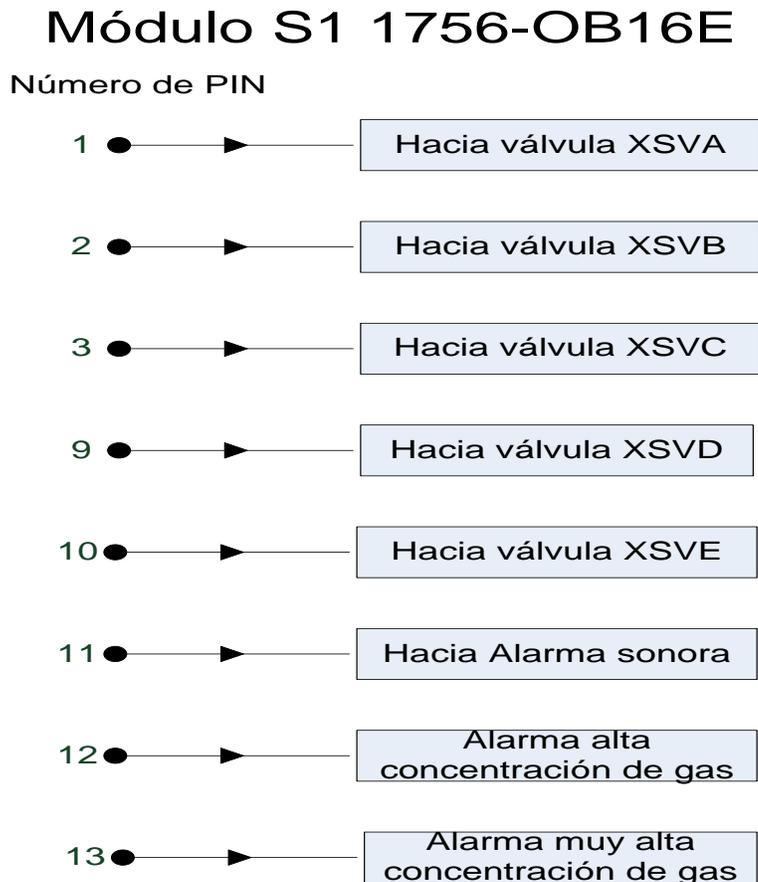


Figura 5.32 Pines utilizados del módulo de salida S1

El módulo de salida digital S1, es el encargado de enviar la señal de activación a todas las válvulas de diluvio. Como se puede observar en la figura anterior, también se tomó en cuenta los dos fusibles para la asignación de pines. Además este módulo tiene como salida la señal que va activar la alarma sonora, alarma por alta concentración de gas y la alarma por muy alta concentración de gas.

El segundo módulo de salida digital (S2), tiene la misma configuración de pines que el módulo S1 mostrado en la figura 5.32. Se tienen dos módulos con la misma configuración de pines para corroborar la veracidad de los datos, es decir para verificar un fallo en el caso de que se mantenga una desigualdad de comparación entre dos puntos y mantener un sistema redundante de grado dos.

A continuación en la figura 5.33 se muestra la conexión de pines para el módulo de salida analógica, donde se van a enviar los datos provenientes de los ocho sensores.

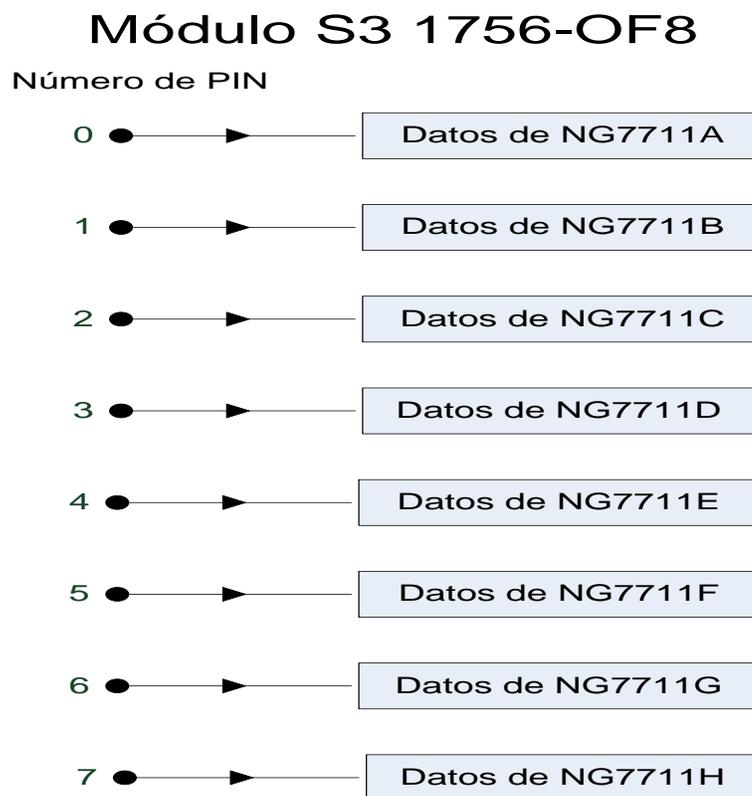


Figura 5.33 Pines utilizados del módulo de salida S3

ControlLogix tiene módulos de comunicación que cumplen con las necesidades de conexión que requiere el sistema. Para la comunicación del controlador con la computadora situada en el cuarto de control de refinería y cuarto de control de GLP se utilizó el módulo MVI56E, el cual es un módulo de comunicación del cliente mejorada. Estos módulos se utilizan para realizar conexiones de computadora a

controlador o de controlador a controlador. En la figura 5.34 se muestra una imagen de estos módulos. La comunicación que se establece con el cuarto de control de GLP y el controlador se realiza a través de una conexión Ethernet/IP. Para establecer la comunicación entre el controlador con sus módulos y con los instrumentos utilizados para la supervisión y manejo de estados se requiere de una conexión Modbus.



Figura 5.34 Módulos de comunicación ControlLogix

Los módulos de comunicación controlLogix pueden alcanzar temperaturas de operación de 0°C a 60°C, soportando temperaturas de almacenamiento de -40°C hasta 85°C. Rango de humedad de 5% a 95 % no condensable.

Estos módulos de comunicación están certificados por la Asociación de Estándares Canadiense (CSA, por su sigla en inglés) para operar en áreas de clase uno, división 2 de áreas peligrosas y clase uno, división dos, grupo A, B, C, D para áreas no peligrosas, lo cual es requisito para este sistema.

5.2.6 Indicadores visuales y sonoros

Como se indicó anteriormente se va tener instaladas alarmas sonoras y alarmas visuales para alertar a los operadores cuando exista situación de emergencia. Se recomienda que la marca de estos dispositivos anunciadores de alarma sea Cooper MEDC, ya que esta es una empresa líder mundial en este tipo de dispositivos en áreas de alto riesgo.

En el campo (en la zona alrededor de la esfera):

Como indicador visual se tiene dos semáforos de estado para áreas clasificadas, uno localizado en la parte superior y el otro en la parte inferior de la esfera YT-7711. Estos semáforos son del modelo SL15 con luces xenón de color roja, amarilla y verde. En la siguiente figura se muestra el modelo descrito anteriormente.



Figura 5.35 Semáforo de estado marca Cooper Medc, modelo SL15

Este semáforo cumple con los siguientes requerimientos:

- Diseñado para operar en área clasificada:
 - Clase 1, división 1 & 2, grupos C & D
 - clase 1, zona 1 y zona 2.
- Certificado para operar en temperaturas de -55°C a +70°C.
- Diseñado para operar en zonas con alto grado de corrosión.
- Varias tasas de flash para las luces xenón.
- Disponibilidad de color de lentes verdes, amarillos y rojos.
- Opera con 24, 48V d.c., 110,120, 230, 240 V a.c..
- Frecuencia de tensión: 50 Hz, 60 Hz.
- Tasa de flash: 60, 80 fpm.
- Caja tipo Nema 4x & 6.

Como se señaló anteriormente el indicador sonoro alrededor de la zona de la esfera es una sirena, capaz de alertar a los operadores cercanos al área por medio de un sonido fuerte, característico de advertencia de emergencia. En la siguiente figura se muestra la sirena modelo DB3 igualmente de Cooper MEDC, seleccionada para instalar en el área:



Figura 5.36 Sirena modelo DB3, Cooper MEDC, situada en campo

Esta sirena cumple con las siguientes requerimientos:

- Calificada para operar en área clasificada:
 - Clase I, Div. 2, Grupo A, B, C & D.
 - Clase II, Div. 2, Grupo F & G.
 - Clase 1, Zona 1 & 2.
- Certificado NEMA 4x & 6
- Certificado SIL 1
- Temperatura que soporta para operar: -55°C a +70°C
- Configurable para alcanzar hasta los 108dB a una distancia de 3.05 metros
- Diseñado capaz de soportar sitios con alto grado de corrosión.
- Más de tres tonos para seleccionar, este modelo posee 27 distintos tonos.
- Error de ± 10 dB, este modelo tiene ± 3 dB.
- Alimentación de 24V dc – 380mA, este modelo tiene más opciones de alimentación.

En cuarto control de operadores

Debido a que el cuarto de control está ubicado dentro de un edificio, se opta por que la indicación sonora y visible provenga de un mismo instrumento. Se desea que este dispositivo cumpla con las siguientes características:

- Notificación audible/visual con bocina y flash sincronizado.
- La bocina debe ser electrónica.
- El flash debe ser de luz xenón estroboscópica.
- La carcasa debe ser de un material termoplástico retardante al efecto de las llamas, fuerte y resistente a altos impactos.
- Dos únicos cables de conexión.
- La bocina es controlada de manera separada a la luz estroboscópica.
- La bocina debe permanecer activada hasta que se silencie manualmente, mientras que la luz estroboscópica debe permanecer encendida hasta que se reinicialice el dispositivo.
- Capaz de brindar una frecuencia de destello de alrededor de 1Hz.
- Brindar un sonido mayor a 6 dBA con conexión de 24 VDC.
- Intensidad de luz xenón estroboscópica de 75 candelas con conexión 24 VDC.
- Capaz de operar a temperatura desde los 0°C a 50°C.
- Rango de humedad del 10% al 93% no condensable.

Explorando el mercado se encontró un dispositivo marca Simplex que cumple con todas las características establecidas anteriormente. El aparato es el modelo 4906-9128, el cual es para instalar en el techo con carcasa de color rojo y las letras fire en color blanco como el mostrado en la siguiente figura.



Figura 5.37 Indicador visual y sonoro dentro del cuarto de control de GLP

5.2.7 Lanzas de agua

Se van a instalar 4 lanzas de agua, ubicadas aproximadamente una en cada esquina fuera del dique alrededor de la esfera YT-7711. Se define por medida de seguridad que las lanzas se encuentren en estado de normalmente abierto. Las lanzas cuentan en su parte superior con monitores que son los encargados de darle presión y dirección al flujo de agua. Los monitores mencionados anteriormente tienen los siguientes tags: M-05, M-06, M-07 y M-08. Dos de estos monitores van a estar direccionadas siempre a la esfera, de manera que, una vez que fluya agua a través de estos se logre cubrir la mayor parte de la esfera con agua.

Los requisitos para la compra de estos monitores de agua son los siguientes:

- De apertura y cierre manual.
- Construidos con un material resistente a la corrosión.
- Rotación horizontal de 360°.
- Giro vertical entre -40° y +80°.
- Adecuado para operar con agua.
- Monitores ANSI clase 150.
- Diseñada para operar en áreas peligrosas.
- Alcance una distancia de disparo de 20m a 100psi con 5° de ángulo de elevación.
- Presión mínima de operación de 40 psi.

Buscando en el mercado existente se encontró el modelo CM-2000B de la empresa Chemguard. Este modelo cumple con los requisitos establecidos anteriormente y se ha comprobado su buen funcionamiento, porque es utilizado tanto en las instalaciones de RECOPE como en instalaciones de otras refinerías. En la siguiente figura se muestra una de las lanzas de agua utilizada en RECOPE con el monitor marca Chemguard.



Figura 5.38 Lanza de agua utilizada en las instalaciones de RECOPE

De la figura anterior se puede notar que la lanza de agua se encuentra en estado de normalmente abierta y disparará agua una vez que la respectiva válvula de diluvio abra paso al flujo de agua en la tubería. Cabe mencionar que la lanza de agua es operada por funcionarios calificados. En la siguiente figura se muestra el monitor de la lanza de agua:



Figura 5.39 Monitor marca Chemguard

En la siguiente tabla se muestra una lista de las señales de hardware que recibe el controlador para indicar si las válvulas de diluvio se encuentran abiertas o cerradas.

Tabla 5.4 Lista de señales de hardware de abierto y cerrado de válvula de diluvio que recibe el controlador para el sistema contra incendio

Nombre del TAG	Descripción	Origen	Destino	Tensión
ZSC-7711A	Interruptor posición cerrada	ZSC-7711A	Controlador fuego y gas	24 Vcc
ZSO-7711A	Interruptor posición abierta	ZSO-7711A	Controlador fuego y gas	24 Vcc
SV-7711A	Abre válvula sistema contra incendio	Controlador fuego y gas	SV-7711A	24 Vcc
ZSC-7711B	Interruptor posición cerrada	ZSC-7711B	Controlador fuego y gas	24 Vcc
ZSO-7711B	Interruptor posición abierta	ZSO-7711B	Controlador fuego y gas	24 Vcc
SV-7711B	Abre válvula sistema contra incendio	Controlador fuego y gas	SV-7711B	24 Vcc
ZSC-7711C	Interruptor posición cerrada	ZSC-7711C	Controlador fuego y gas	24 Vcc
ZSO-7711C	Interruptor posición abierta	ZSO-7711C	Controlador fuego y gas	24 Vcc
SV-7711C	Abre válvula sistema contra incendio	Controlador fuego y gas	SV-7711C	24 Vcc
ZSC-7711D	Interruptor posición cerrada	ZSC-7711D	Controlador fuego y gas	24 Vcc
ZSO-7711D	Interruptor posición abierta	ZSO-7711D	Controlador fuego y gas	24 Vcc
SV-7711D	Abre válvula sistema contra incendio	Controlador fuego y gas	SV-7711D	24 Vcc
ZSC-7711E	Interruptor posición cerrada	ZSC-7711E	Controlador fuego y gas	24 Vcc
ZSO-7711E	Interruptor posición abierta	ZSO-7711E	Controlador fuego y gas	24 Vcc
SV-7711E	Abre válvula sistema contra incendio	Controlador fuego y gas	SV-7711E	24 Vcc

En la siguiente tabla se muestra una lista de las señales de hardware que recibe el controlador de los sensores de llama.

Tabla 5.5 Lista de señales de hardware que recibe el controlador de los sensores de llama

Nombre del tag	Descripción	Origen	Destino	Tensión
BE-7711A	Detector fuego parte superior YT-7711	BE-7711A	Controlador fuego y gas	24 Vcc
BE-7711B	Detector fuego parte superior YT-7711	BE-7711B	Controlador fuego y gas	24 Vcc
BE-7711C	Detector fuego parte inferior YT-7711	BE-7711C	Controlador fuego y gas	24 Vcc
BE-7711D	Detector fuego parte inferior YT-7711	BE-7711D	Controlador fuego y gas	24 Vcc

En la siguiente tabla se muestra una lista de las señales de hardware que recibe el controlador de los sensores de gas.

Tabla 5.6 Lista de señales de hardware que recibe el controlador de los sensores de gas

Nombre del tag	Descripción	Origen	Destino	Tensión
NG-7711A	Detecta gas parte superior YT-7711	NG-7711A	Controlador fuego y gas	24 Vcc
NG-7711B	Detecta gas parte superior YT-7711	NG-7711B	Controlador fuego y gas	24 Vcc
NG-7711C	Detecta gas parte superior YT-7711	NG-7711C	Controlador fuego y gas	24 Vcc
NG-7711D	Detecta gas parte superior YT-7711	NG-7711D	Controlador fuego y gas	24 Vcc
NG-7711E	Detecta gas parte inferior YT-7711	NG-7711E	Controlador fuego y gas	24 Vcc
NG-7711F	Detecta gas parte inferior YT-7711	NG-7711F	Controlador fuego y gas	24 Vcc

NG-7711G	Detecta gas parte inferior YT-7711	NG-7711G	Controlador fuego y gas	24 Vcc
NG-7711H	Detecta gas parte inferior YT-7711	NG-7711H	Controlador fuego y gas	24 Vcc

En la siguiente tabla se muestra una lista de las señales de hardware que comunica a los semáforos y estaciones de emergencia con el controlador de fuego y gas.

Tabla 5.7 Lista de señales de hardware de los semáforos y estaciones de emergencia con el controlador.

Nombre del tag	Descripción	Origen	Destino	Tensión
HS-7711F	Activa alarma sonora y apertura de XSV-7711 A/B/C/D/E	HS-7711F	Controlador fuego y gas	24 Vcc
HS-7711G	Activa alarma sonora y apertura de XSV-7711 A/B/C/D/E	HS-7711G	Controlador fuego y gas	24 Vcc
SEM-7711A	Semáforo amarillo parpadeante, alarmas generales	Controlador fuego y gas	SEM-7711A	24 Vcc
SEM-7711B	Semáforo rojo parpadeante, condición de emergencia	Controlador fuego y gas	SEM-7711B	24 Vcc
SEM-7711C	Semáforo verde, no hay situación de emergencia	Controlador fuego y gas	SEM-7711C	24 Vcc

La lista de señales presentadas anteriormente necesita un medio por el cual transportarse, es por esta razón que a continuación se presenta la lista de cables utilizados para llevar a cabo la comunicación. Debido a su ventaja de ser más limpio, organizado y de requerir menos conectores se prefiere el multicable. También se prefiere este tipo de cable por las características similares que presentan las señales si se dividen en grupos, por ejemplo grupos con el mismo origen y destino.

Tabla 5.8 Multicable MC-DI-003 utilizado para las señales de abierto y cerrado de las válvulas de diluvio

Nombre del tag	Multicable	Par	Composición
C-ZSC7711A	MC-DI-003	P1	1x2x1,5mm ²
C-ZSO-7711A	MC-DI-003	P2	1x2x1,5mm ²
C-SV-7711A	MC-DI-003	P3	1x2x1,5mm ²
C-ZSC7711B	MC-DI-003	P4	1x2x1,5mm ²
C-ZSO-7711B	MC-DI-003	P5	1x2x1,5mm ²
C-SV-7711B	MC-DI-003	P6	1x2x1,5mm ²
C-ZSC7711C	MC-DI-003	P7	1x2x1,5mm ²
C-ZSO-7711C	MC-DI-003	P8	1x2x1,5mm ²
C-SV-7711C	MC-DI-003	P9	1x2x1,5mm ²

Tabla 5.9 Multicable MC-DI-004 utilizado para las señales de abierto, cerrado de las válvulas de diluvio, estación de emergencia y semáforo

Nombre del tag	Multicable	Par	Composición
C-ZSO-7711D	MC-DI-004	P1	1x2x1,5mm ²
C-ZSO-7711D	MC-DI-004	P2	1x2x1,5mm ²
C-SV-7711D	MC-DI-004	P3	1x2x1,5mm ²
C-ZSO-7711E	MC-DI-004	P4	1x2x1,5mm ²
C-ZSO-7711E	MC-DI-004	P5	1x2x1,5mm ²
C-SV-7711E	MC-DI-004	P6	1x2x1,5mm ²
C-HS-7711F	MC-DI-004	P7	1x2x1,5mm ²
C-HS-7711G	MC-DI-004	P8	1x2x1,5mm ²
C-SEM-7711A	MC-DI-004	P9	1x2x1,5mm ²
C-SEM-7711B	MC-DI-004	P10	1x2x1,5mm ²
C-SEM-7711D	MC-DI-004	P11	1x2x1,5mm ²

Tabla 5.10 Multicable MC-AI-004 utilizado para las señales de los detectores de llama

Nombre del tag	Multicable	Par	Composición
C-BE-7711A	MC-AI-004	P1	1x3x1,5mm ²
C-BE-7711B	MC-AI-004	P2	1x3x1,5mm ²
C-BE-7711C	MC-AI-004	P3	1x3x1,5mm ²
C-BE-7711D	MC-AI-004	P4	1x3x1,5mm ²

Cabe señalar de la tabla anterior, que debido a la señal de auto diagnóstico de los detectores de llama se requiere de una tercera señal a parte de la de alimentación y tierra. Es por esta razón que la composición requiere que sean tres cables en vez de dos.

Tabla 5.11 Multicable MC-AI-003 utilizado para las señales de los detectores de gas

Nombre del tag	Multicable	Par	Composición
C-NG-7711A	MC-AI-003	P1	1x3x1,5mm ²
C-NG-7711B	MC-AI-003	P2	1x3x1,5mm ²
C-NG-7711C	MC-AI-003	P3	1x3x1,5mm ²
C-NG-7711D	MC-AI-003	P4	1x3x1,5mm ²
C-NG-7711E	MC-AI-003	P5	1x3x1,5mm ²
C-NG-7711F	MC-AI-003	P6	1x3x1,5mm ²
C-NG-7711G	MC-AI-003	P7	1x3x1,5mm ²
C-NG-7711H	MC-AI-003	P8	1x3x1,5mm ²

Al igual que para los detectores de llama, los detectores de gas requieren de un multicable con una composición de tres cables, uno para alimentación, tierra y auto diagnóstico.

A continuación se presenta una tabla con el resumen de los multicables utilizados para el sistema contra incendio.

Tabla 5.12 Lista de tubos de canalización eléctrica para cables de instrumentación

Multicable	Diámetro nominal	Formación	Utilización	Comentarios
MC-DI-004	26,2	12x2x1,5	Señales digitales	1 par libre
MC-DI-003	26,2	12x2x1,5	Señales digitales	3 par libres
MC-AI-004	29,1	12x3x1,5	Señales analógicas	8 par libres
MC-AI-003	29,1	12x3x1,5	Señales analógicas	4 par libres

Como medida de seguridad todo canal de cables en la refinería debe ser transportado por medio de una canaleta. Los multicables MC-DI-004 y MC-DI-003 vienen en la canaleta denominada TC-DI-001. Esta canaleta contiene otros cables que no forman parte de la extensión de este proyecto, por esta razón no se describe su funcionalidad.

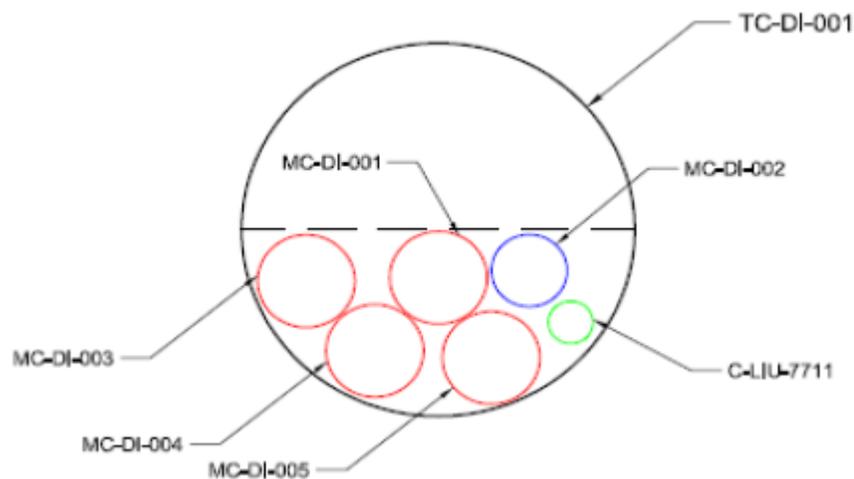


Figura 5.40 Tubo canalización eléctrica TC-DI-001 para cables

Debido a que la canaleta TC-DI-001 posee más de dos conductores, es necesario que el área de todos los cables no abarque un área mayor del 40 % del área disponible dentro de la canaleta, según lo especificado en el código eléctrico nacional de la NFPA. Es por esto que a continuación se realizan los cálculos de área para los multicables requeridos para este proyecto.

Con un diámetro de canaleta interno nominal de 105.5 mm

$$A_{C-DI} = \frac{\pi * d^2}{4} = \frac{\pi * (105.5)^2}{4} = 8741.68 \text{mm}^2 \quad (5.17)$$

Dónde:

A_{C-DI} = Área de la canaleta TC-DI-001

d = diámetro interno nominal

Para el área MC-DI-003 ($A_{MC-DI-003}$):

$$A_{MC-DI-003} = \frac{\pi * d^2}{4} = \frac{\pi * (26.2)^2}{4} = 539.13 \text{mm}^2 \quad (5.18)$$

Debido a que el diámetro interno es el mismo para el multicable MC-DI-004, se obtiene el mismo resultado para el cálculo de área $A_{MC-DI-004}$.

$$A_{MC-DI-004} = 539.13 \text{mm}^2 \quad (5.19)$$

La suma de las áreas $A_{MC-DI-003}$ y $A_{MC-DI-004}$ debe ser menor al 40% del área A_{C-DI}

$$A_{MC-DI-Total} = A_{MC-DI-003} + A_{MC-DI-004}$$

$$A_{MC-DI-Total} = 539.13 + 539.13 = 1078.26 \text{mm}^2 \quad (5.20)$$

El 40% del A_{C-DI}

$$A_{C-DI-40\%} = A_{C-DI} * 0.4$$

$$A_{C-DI-40\%} = 8741.68 * 0.4$$

$$A_{C-DI-40\%} = 3496.67 \quad (5.21)$$

Se puede notar que $A_{MC-DI-Total}$ es mucho menor a $A_{C-DI-40\%}$, por lo que incluso se puede incluir más cables dentro del tubo de canalización eléctrica. Se puede concluir que el tubo de canalización eléctrica TC-DI-001 está bien diseñado para los cables que va contener, cumpliendo con lo establecido en el código eléctrico nacional de la NFPA .

Los multicables MC-AI-004 y MC-AI-003 vienen en la canaleta denominada TC-AI-001. Esta canaleta contiene otros cables que no forman parte de la extensión de este proyecto, por esta razón no se describe su funcionalidad.

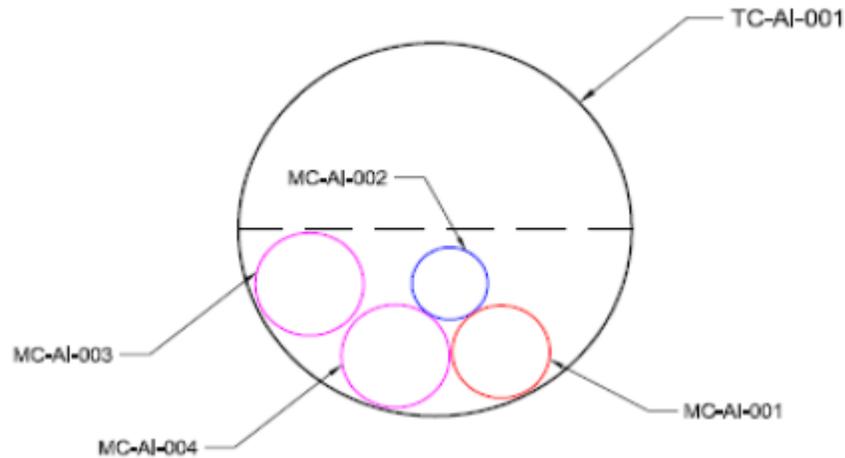


Figura 5.41 Tubo canalización eléctrica TC-DI-001 para cables

Se procede a ejercer un cálculo parecido al realizado anteriormente, para determinar que el área de todos los cables no abarque un área mayor del 40 % del área disponible dentro de la canaleta, según código eléctrico nacional de la NFPA.

Con un diámetro de canaleta interno nominal de 105.5 mm

$$A_{C-AI} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (105.5)^2}{4} = 8741.68 \text{mm}^2 \quad (5.22)$$

Dónde:

A_{C-AI} = Área de la canaleta TC-AI-001

d = diámetro interno nominal

Para el área MC-AI-003 ($A_{MC-AI-003}$):

$$A_{MC-AI-003} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (29.1)^2}{4} = 665.08 \text{mm}^2 \quad (5.23)$$

Debido a que el diámetro interno es el mismo para el multicable MC-AI-004, se obtiene el mismo resultado para el cálculo de área $A_{MC-AI-004}$.

$$A_{MC-AI-004} = 665.08\text{mm}^2 \quad (5.24)$$

La suma de las áreas $A_{MC-AI-003}$ y $A_{MC-AI-004}$ debe ser menor al 40% del área A_{C-AI}

$$A_{MC-AI-Total} = A_{MC-AI-003} + A_{MC-AI-004}$$

$$A_{MC-AI-Total} = 665.08 + 665.08 = 1330.16\text{mm}^2 \quad (5.25)$$

El 40% del A_{C-AI}

$$A_{C-AI-40\%} = A_{C-AI} * 0.4$$

$$A_{C-AI-40\%} = 8741.68 * 0.4$$

$$A_{C-AI-40\%} = 3496.69 \quad (5.26)$$

Se puede notar que $A_{MC-AI-Total}$ es mucho menor a $A_{C-AI-40\%}$, por lo que incluso se puede incluir más cables dentro del tubo de canalización eléctrica. Se puede concluir que el tubo de canalización eléctrica TC-AI-001 está bien diseñado para los cables que va contener, según lo establecido en el código eléctrico nacional de la NFPA.

5.3 Descripción del software

Los software utilizados para la programación del controlador son de la familia Rockwell Automation y se describen a continuación.

Se utilizó RSLinx Classic que es el encargado de establecer la conexión del software con el hardware. Se utiliza para muchas aplicaciones de Rockwell Software empresa encargada de su desarrollo, además se utiliza para hacer conexiones HMI provenientes de terceros.

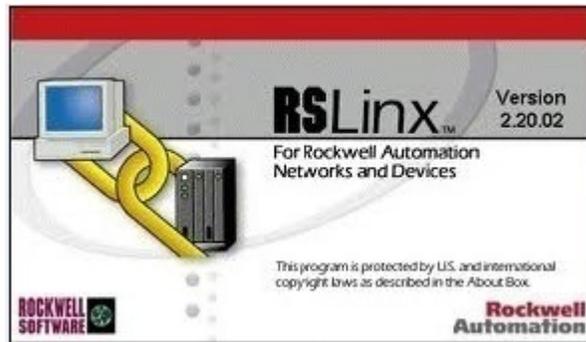


Figura 5.42 Programa RSLinx Classic

Otro de los programas empleados es el RSLogix 5000, el cual se utiliza para programar las funciones que va ejercer el controlador.

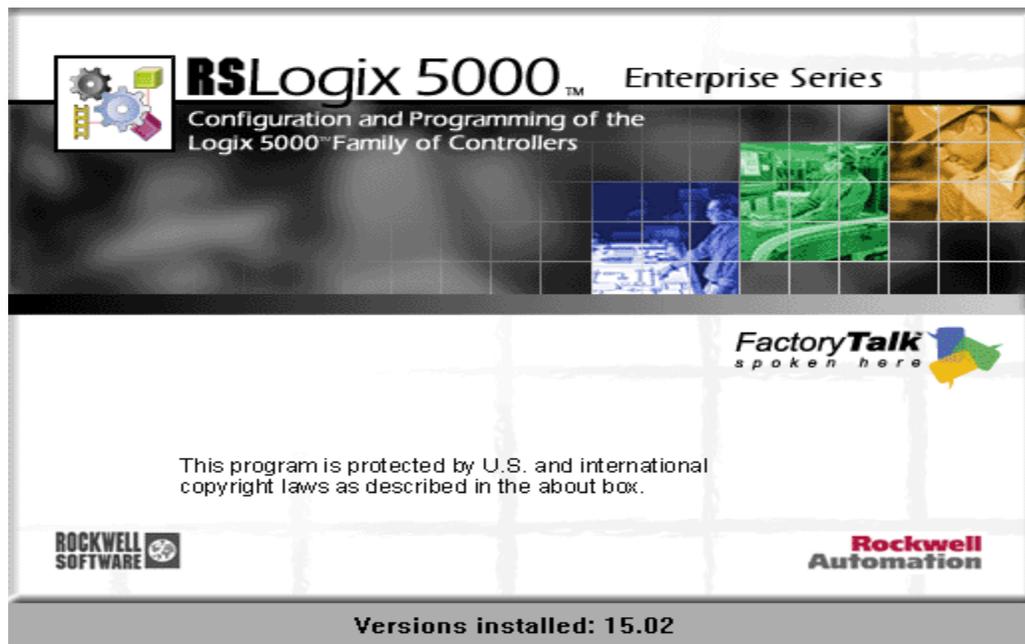


Figura 5.43 Programa RSLogix 5000

El diseño de la estructura de programación se realizó marcando bloques con funciones específicas. Un bloque para entradas físicas, otro bloque para entradas de comunicación, un bloque para procesos, otro bloque para el sistema HMI, un bloque para la activación de alarmas de equipos, uno para salidas físicas y un último para salidas de comunicación. La figura 5.44 muestra la manera en que se conectan todos estos bloques entre sí.

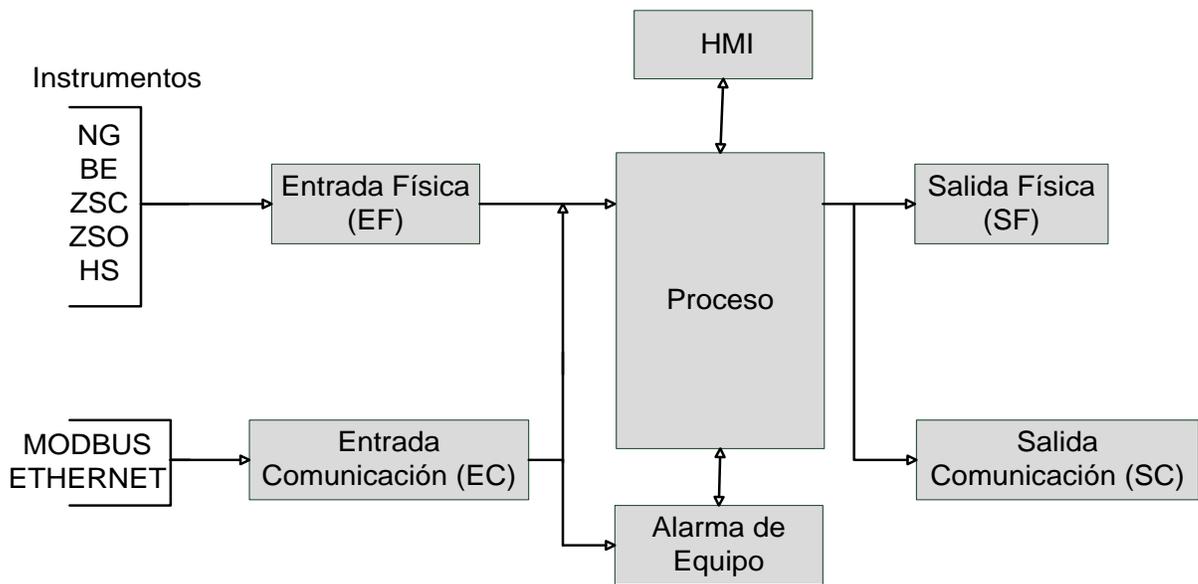


Figura 5.44 Esquema de estructura de programación del controlador para el sistema contra incendio

De la figura anterior se puede observar que las entradas físicas son todas las entradas que van a llegar al controlador proveniente de los distintos instrumentos que contiene el sistema contra incendio, como lo son: detectores de gas, detectores de llama, indicadores de posición cerrada, indicadores de posición abierta y estaciones manuales de emergencia que se representan con las letras HS. Las entradas de comunicación son todas aquellas, que como su nombre lo indica, son señales que entran al controlador para poder comunicar los equipos entre sí. Por ejemplo se utiliza comunicación tipo MODBUS para que todos los módulos del controlador se puedan comunicar entre sí.

De igual tipo se tiene la comunicación Ethernet, utilizada para comunicar el controlador con el sistema SCADA y el panel de control de llama y gas. Los bloques de salidas físicas y de comunicación cumplen la misma función que los dos bloques de entrada explicados anteriormente, solo con la diferencia que como su nombre lo indica, son salidas del controlador.

Ambos tipos de entrada tanto la física como la de comunicación pueden ser de tipo analógicas o digital. Cuando se trabaja con una entrada física es necesario hacer referencia al número de rack (en caso de que haya más de un controlador), al número de ranura donde se ubica el módulo de entrada digital o analógico y por último el número de entrada al cual va ingresar la señal, este último es el número de pin del módulo de entrada. Para las entradas de comunicación se tiene que hacer referencia al equipo por medio del TAG que se le asignó.

El bloque de alarma de equipo se encarga de activar las alarmas del tipo sonora y visual, ubicadas en el campo y en los distintos cuartos de control. El bloque de HMI es utilizado para mantener en todo momento de manera visual lo que está sucediendo con los distintos equipos e instrumentos del sistema contra incendio. Esta supervisión es de tiempo real debido a que está conectado directamente con el controlador, entonces cualquier cambio que se realice, se visualiza de forma casi inmediata, gracias al sistema HMI. Por último el bloque de proceso es el encargado de realizar todas las órdenes de accionar o desactivar los distintos elementos que envuelven al sistema contra incendio.

Este tipo de programación en bloque se utiliza para llevar un orden en la programación del sistema contra incendio. Esto beneficia al diseñador a la hora de estructurar la programación, debido a que se puede ubicar con facilidad los elementos con los cuales está trabajando y no pierde o mezcla las funciones de un bloque con otro. También se optó por elaborar esta estructura de programación porque una vez implementado el sistema contra incendio, se es más fácil ubicar fallas por errores que pueden surgir, con esto se reduce el tiempo de paro, el cual para este tipo de aplicación, en específico, es sumamente importante debido a que la esfera no puede entrar en funcionamiento si el sistema de fuego y gas no se encuentra en óptimas condiciones. Igualmente se agilizan las labores de mantenimiento, reduciendo costos al mantener una estructura de este tipo. También una vez implementado el sistema es más fácil de tratar para una persona ajena a la elaboración del diseño de control del sistema de fuego y gas al tener todo ordenado

en bloques de este tipo, por supuesto es necesario que esta persona cuente con algún grado de conocimiento en programación.

El programa RSView32 Works es utilizado para crear la interfaz hombre máquina y para hacer simulaciones en tiempo real de campo.



Figura 5.45 Programa RSView32 Works

A continuación en la figura 5.46 y 5.47 se muestra el diagrama de flujo de proceso del sistema de fuego y gas para la esfera YT-7711.

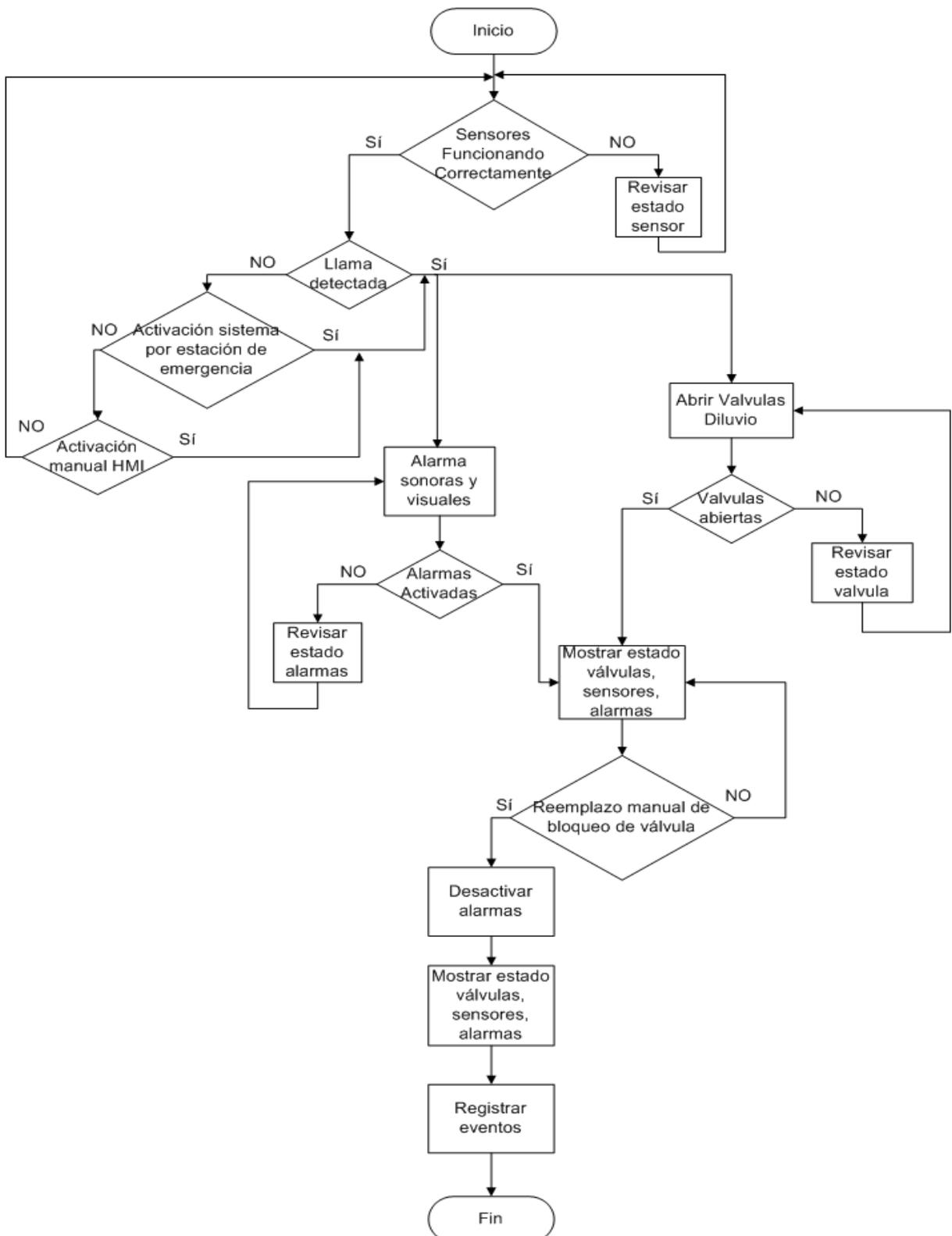


Figura 5.46 Diagrama de flujo de para detección de llama

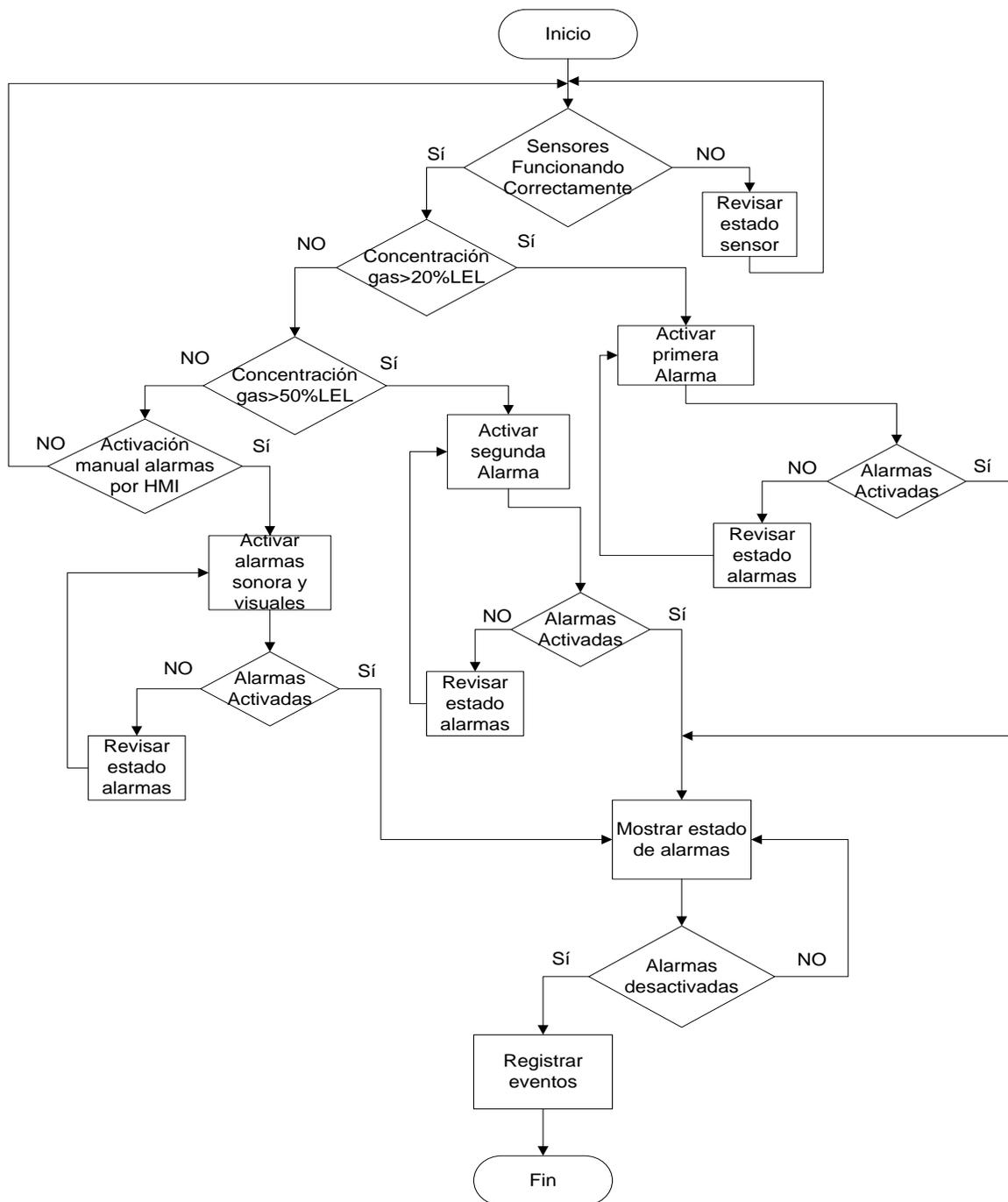


Figura 5.47 Diagrama de flujo de proceso para altas concentraciones de gas

No solo los equipos e instrumentos deben tener un alto grado de seguridad. De nada sirve que estos elementos sean seguros si la programación no es robusta ni segura. Para implementar una programación segura se procedió a realizar métodos

de detección de fallo y concurrencia con las señales con las cuales se están trabajando. [8]

Para las entradas físicas se implementó una lógica que compara los valores de entrada o de estados, para determinar si hay concurrencia. Por ejemplo, un detector manda señal de entrada a dos módulos distintos del controlador, como se muestra en la siguiente figura.

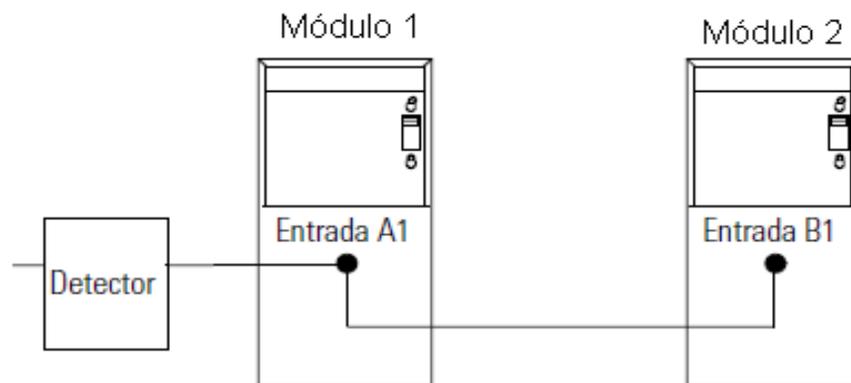


Figura 5.48 Cableado de los módulos de entrada controllogix para aplicaciones con alto grado de seguridad

Entonces el controlador va tomar acción si y solo si estas dos entradas de los distintos módulos son iguales. Esta lógica de programación segura se muestra en la figura a continuación.



Figura 5.49 Lógica de programación segura para determinar concurrencia en los datos de entrada

El programa desarrollado va contener reglones para notificar un fallo en el caso de que se mantenga una desigualdad de comparación entre dos puntos.

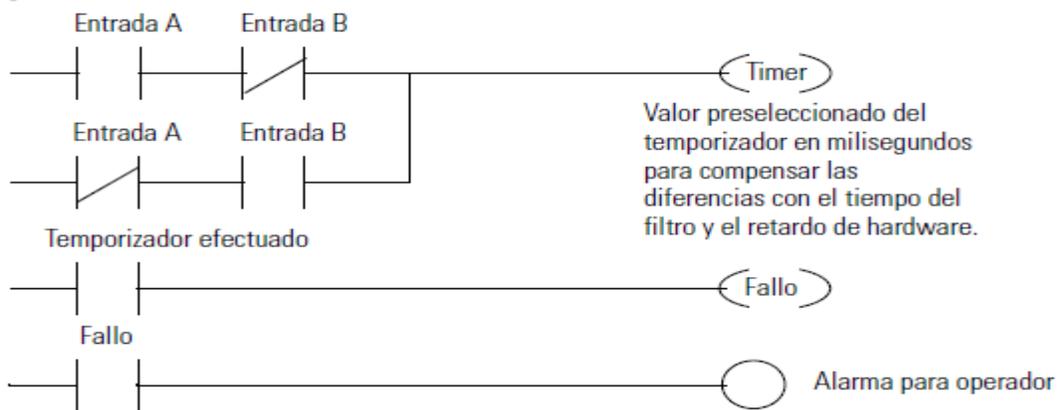


Figura 5.50 Lógica de programación para notificar un fallo en caso de mantener desigualdad entre dos puntos.

La lógica de programación de la figura 5.50 funciona de la siguiente manera. Se tienen dos entradas, entrada A y entrada B, que deben ser iguales y provienen de dos distintos módulos. Cuando se mantiene una desigualdad entre estos dos puntos se activa un temporizador. Cuando el temporizador alcanza el valor programado por el diseñador se activa una señal de fallo que va accionar una alarma para notificar al operador de un fallo en la comparación de dos datos que deben ser iguales.

En la siguiente tabla se muestra una lista de las señales de software que recibe el controlador para indicar si las válvulas de diluvio se encuentran abiertas o cerradas.

Tabla 5.13 Lista de señales de software de abierto y cerrado de válvula de diluvio que recibe el controlador para el sistema contra incendio

Nombre del TAG	Función
ZIC-7711A	Indicación cerrada de la válvula diluvio XSV-7711A
ZIC-7711B	Indicación cerrada de la válvula diluvio XSV-7711B
ZIC-7711C	Indicación cerrada de la válvula diluvio XSV-7711C
ZIC-7711D	Indicación cerrada de la válvula diluvio XSV-7711D
ZIC-7711E	Indicación cerrada de la válvula diluvio XSV-7711E
ZIO-7711A	Indicación abierto de la válvula diluvio XSV-7711A
ZIO-7711B	Indicación abierto de la válvula diluvio XSV-7711B
ZIO-7711C	Indicación abierto de la válvula diluvio XSV-7711C
ZIO-7711D	Indicación abierto de la válvula diluvio XSV-7711D
ZIO-7711E	Indicación abierto de la válvula diluvio XSV-7711E

En la siguiente tabla se muestra una lista de las señales de software que recibe el controlador de los sensores de llama.

Tabla 5.14 Lista de señales de software que recibe el controlador de los sensores de llama

Nombre del TAG	Función
BE-7711A	Alarma presencia de fuego, parte superior de la esfera
BE-7711B	Alarma presencia de fuego, parte superior de la esfera
BE-7711C	Alarma presencia de fuego, parte inferior de la esfera
BE-7711D	Alarma presencia de fuego, parte inferior de la esfera

En la siguiente tabla se muestra una lista de las señales de software que recibe el controlador de los sensores de gas.

Tabla 5.15 Lista de señales de software que recibe el controlador de los sensores de gas

Nombre del TAG	Función
NAH-7711A	Alarma alta concentración de gas, parte superior de la esfera.
NAHH-7711A	Alarma muy alta concentración de gas, parte superior de la esfera.
NAH-7711B	Alarma alta concentración de gas, parte superior de la esfera.
NAHH-7711B	Alarma muy alta concentración de gas, parte superior de la esfera.
NAH-7711C	Alarma alta concentración de gas, parte superior de la esfera.
NAHH-7711C	Alarma muy alta concentración de gas, parte superior de la esfera.
NAH-7711D	Alarma alta concentración de gas, parte superior de la esfera.
NAHH-7711D	Alarma muy alta concentración de gas, parte superior de la esfera.
NAH-7711E	Alarma alta concentración de gas, parte inferior de la esfera.
NAHH-7711E	Alarma muy alta concentración de gas, parte inferior de la esfera.
NAH-7711F	Alarma alta concentración de gas, parte inferior de la esfera.
NAHH-7711F	Alarma muy alta concentración de gas, parte inferior de la esfera.
NAH-7711G	Alarma alta concentración de gas, parte inferior de la esfera.
NAHH-7711G	Alarma muy alta concentración de gas, parte inferior de la esfera.
NAH-7711H	Alarma alta concentración de gas, parte inferior de la esfera.
NAHH-7711H	Alarma muy alta concentración de gas, parte inferior de la esfera.

En la siguiente tabla se muestra una lista de las señales de software que envía el controlador a los semáforos.

Tabla 5.16 Lista de señales de software que envía el controlador a los semáforos

Nombre del TAG	FUNCIÓN
SAM-7711A	Semáforo amarillo parpadeante, alarmas generales
SAM-7711B	Semáforo rojo parpadeante, condición de emergencia
SAM-7711C	Semáforo verde, no hay situación de emergencia

Capítulo 6: Análisis de resultados

En este capítulo se presenta los resultados obtenidos del sistema contra incendio. Para verificar el correcto funcionamiento del sistema se plantearon varios escenarios que fueron simulados lo más real posible, acorde con las características presentadas por los equipos del sistema contra incendio. También se presenta un análisis de los resultados obtenidos, presentando los alcances y limitaciones que presenta la solución implementada.

6.1 Resultados

A continuación se presenta una serie de tablas, donde se especifica los resultados de las pruebas realizadas, por medio de simulación del sistema contra incendio diseñado en el presente proyecto.

La siguiente tabla de verificación muestra los resultados de funcionamiento correcto de los detectores de llama.

Tabla 6.1 Verificación de funcionamiento adecuado de los sensores de llama

Detector	Autodiagnóstico	Detección llama	Señal de entrada	Señal de salida
BE-7711A	√	√	√	√
BE-7711B	√	√	√	√
BE-7711C	√	√	√	√
BE-7711D	√	√	√	√
Combinación BE´s	√	√	√	√
Comentarios: Se asignó a los sensores de llama un tiempo de respuesta menor a 5 segundos.				

La siguiente tabla muestra los resultados de funcionamiento correcto de los detectores de gas.

Tabla 6.2 Verificación de funcionamiento adecuado de los sensores de gas

Detector	Autodiagnóstico	Detección gas al 20%	Detección gas al 50%	Señal de entrada	Señal de salida
NG-7711A	√	√	√	√	√
NG-7711B	√	√	√	√	√
NG-7711C	√	√	√	√	√
NG-7711D	√	√	√	√	√
NG-7711E	√	√	√	√	√
NG-7711F	√	√	√	√	√
NG-7711G	√	√	√	√	√
NG-7711H	√	√	√	√	√
Combinación de NG's	√	√	√	√	√
Comentarios: Se asignó a los sensores de gas un tiempo de respuesta menor a 5 segundos.					

La siguiente tabla muestra los resultados de funcionamiento correcto de las válvulas de diluvio.

Tabla 6.3 Verificación de funcionamiento adecuado de las válvulas de diluvio

Válvula diluvio	ZSC	ZSO	Visualización abierto/cerrado	Señal estado error	Señal entrada	Señal salida
XSV-7711A	√	√	√	√	√	√
XSV-7711B	√	√	√	√	√	√
XSV-7711C	√	√	√	√	√	√
XSV-7711D	√	√	√	√	√	√
XSV-7711E	√	√	√	√	√	√
Combinación de XSV's	√	√	√	√	√	√
Comentarios: Se probaron todas las posibles combinaciones de orden en que se pueden activar y desactivar las válvulas de diluvio.						

La siguiente tabla muestra los resultados de funcionamiento correcto de las alarmas sonoras y visuales.

Tabla 6.4 Verificación funcionamiento señales de alarma en las distintas áreas de refinería

Alarmas	Cuarto control refinería	Cuarto control GLP	Campo
Sonora	√	√	√
Visual	√	√	√
Comentarios:			

La siguiente tabla muestra los resultados de funcionamiento correcto de la indicación visual de la interfaz hombre-máquina.

Tabla 6.5 Verificación de la indicación visual de la interfaz hombre-máquina

HMI	Rojo	Verde	Amarillo	Amarillo parpadeante
Tubería	√	√	NA	NA
Detectores	√	√	√	√
Válvulas diluvio	√	√	√	√
Mensaje Alerta por llama	√	√	√	√
Mensaje alerta por alta concentración de gas	√	√	√	√
Mensaje alerta por muy alta concentración de gas	√	√	√	√
Comentarios: El despliegue de la interfaz es muy similar a la utilizada en otros sistemas de RECOPE. NA: No aplica				

En la siguiente figura se muestra el resultado de la ventana de histórico de alarmas y eventos.

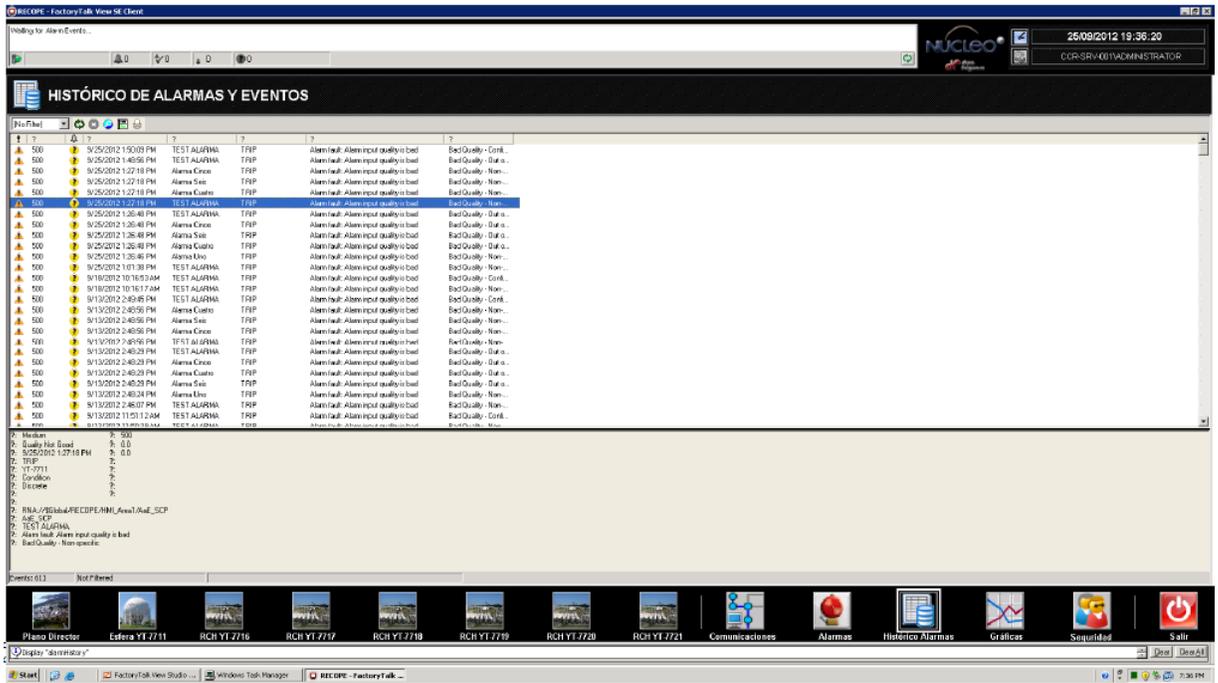


Figura 6.1 Histórico de alarmas y eventos

Las siguientes imágenes son para mostrar la interfaz final y el resultado de la simulación realizada para comprobar que el sistema funciona correctamente.

Primeramente se tiene en la figura 6.2.a la imagen de la esfera indicando que todos los sensores de llama se encuentran en buen estado y no hay situación de emergencia. En la figura 6.2.b se muestra como uno de los sensores ha detectado llama y este lo indica cambiando a color rojo y con un enunciado parpadeante para captar la atención del operador señalando que se ha detectado llama. En la figura 6.2.c indica como aparece en la interfaz cuando se tiene un error de datos, esto se obtiene con la señal de Auto diagnóstico que tiene cada uno de los sensores.

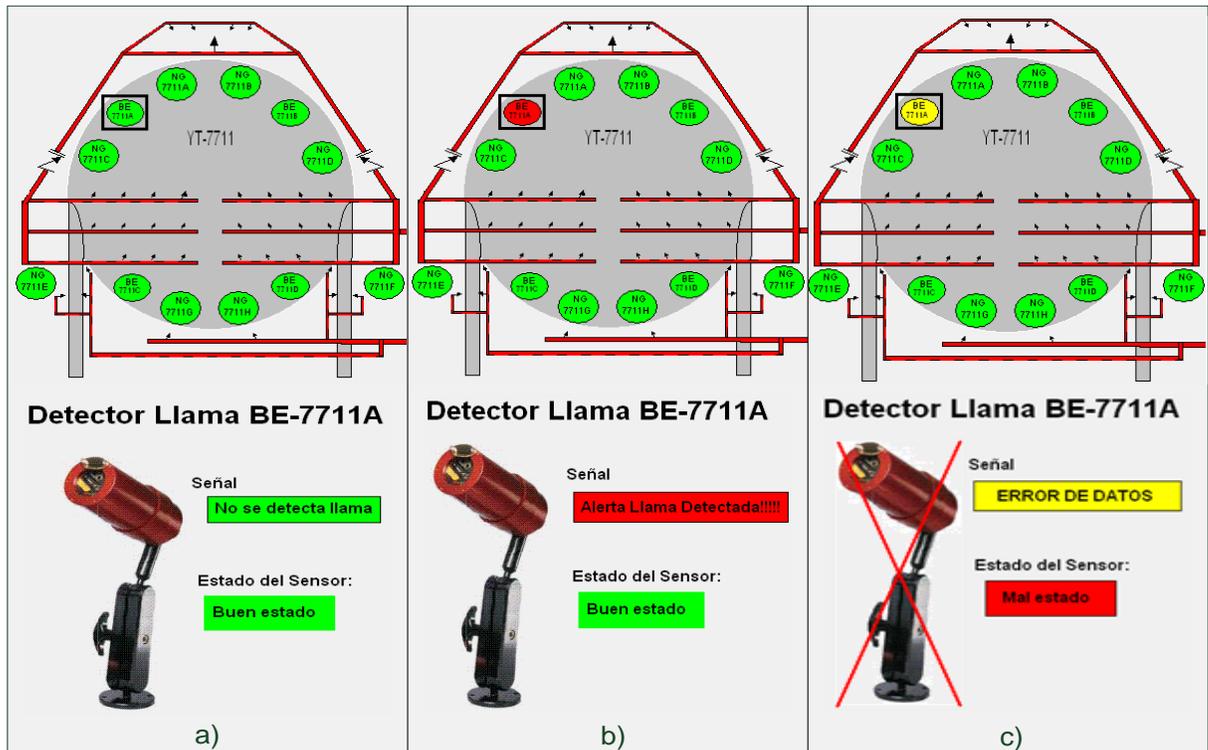


Figura 6.2 Resultado de la simulación con los sensores de llama

En la figura 6.3 se muestra el resultado obtenido de la simulación realizando distintas combinaciones de detección con los sensores de llama. En la figura 6.3.a se muestra que el sistema no tiene problemas cuando más de un sensor detecta llama. En la figura 6.3.b se ilustra que si más de un detector recibe señal de error este lo indica con color y con rótulos para que el operador se dé cuenta del estado de cada sensor.

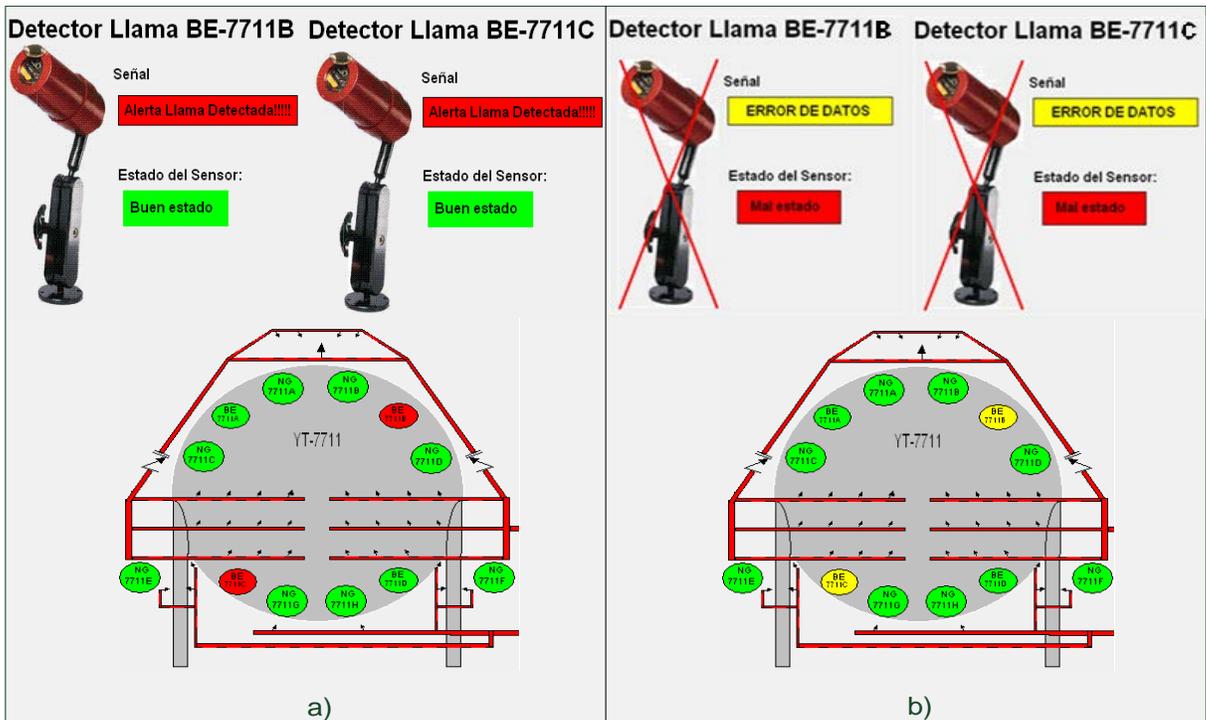


Figura 6.3 Resultado simulación para combinación de distintos sensores de llama

En la figura 6.4 se muestra el resultado obtenido de la simulación de funcionamiento de los sensores de gas. En la figura 6.4.a se muestra el detector en buen funcionamiento, la figura 6.4.b el sensor cuando detecta alta concentración de gas y por último la figura 6.4.c muestra cuando el detector recibe señal de mal estado en el Auto diagnóstico.

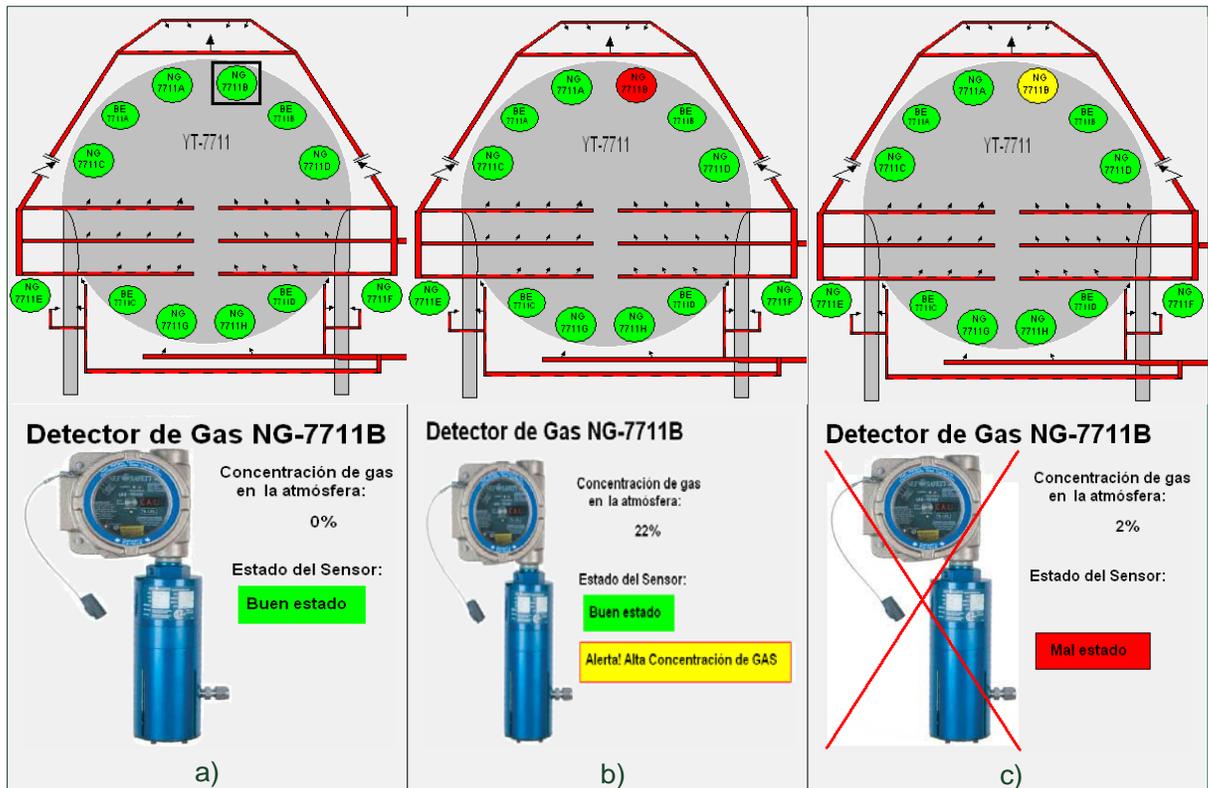


Figura 6.4 Resultado de la simulación para los sensores de gas

En la figura 6.5 se muestra el resultado de la simulación cuando se tiene más de un sensor dando señal de alarma o de error. En la figura 6.5.a se muestra el sensor NG-7711A dando señal de alta concentración de gas y el sensor NG-7711H dando muy alta concentración de gas. En la figura 6.5.b se muestra una situación donde los sensores NG-7711A y NG7711H reciben señal de error del Auto diagnóstico.

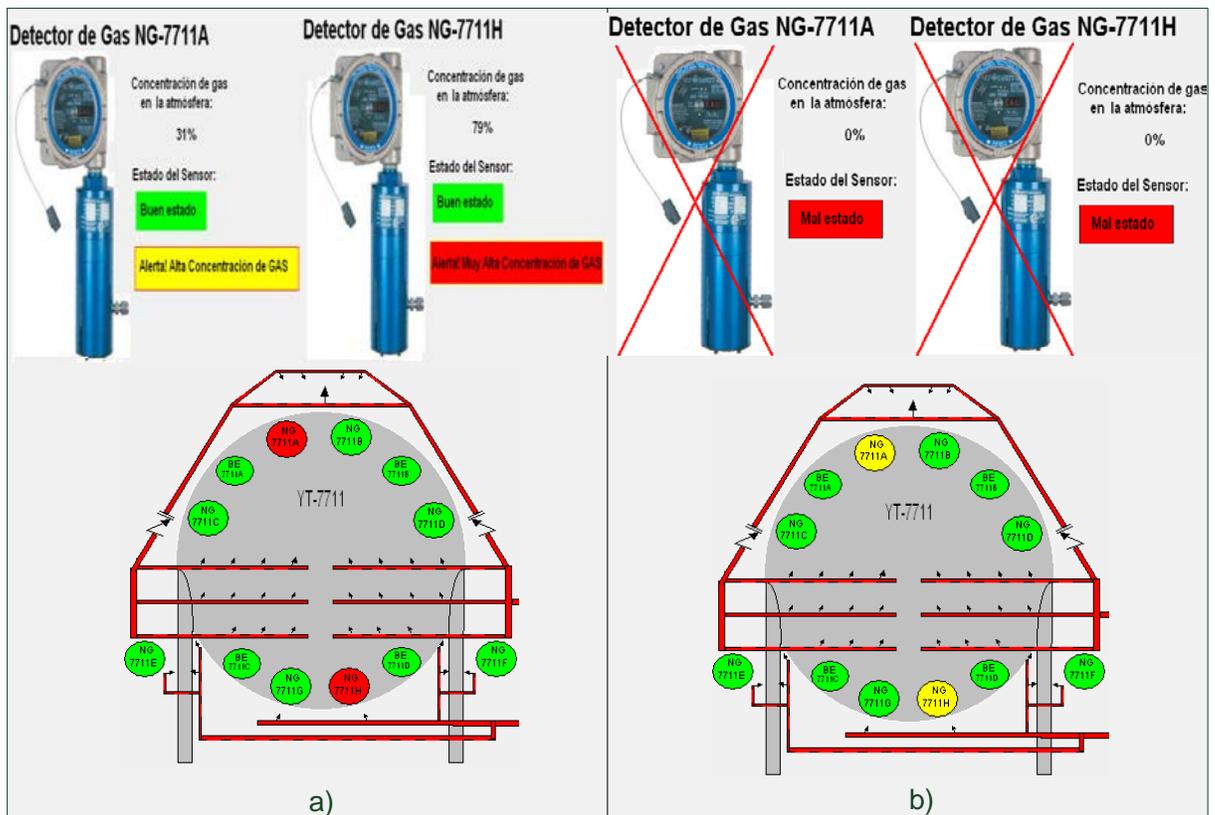


Figura 6.5 Resultado de la simulación con los sensores de gas con distintas combinación de ellos

En la figura 6.6 se muestra el resultado final de la interfaz de donde se va controlar de manera remota el sistema contra incendio. En esta misma imagen se muestra por simulación, el estado de las válvulas en posición cerrada, indicado en color rojo y una válvula de color amarillo indicando error de apertura, esto último significa que los interruptores de posición de la válvula señalan que esta no se encuentra ni completamente abierta ni completamente cerrada, o sea esta en un estado de error.

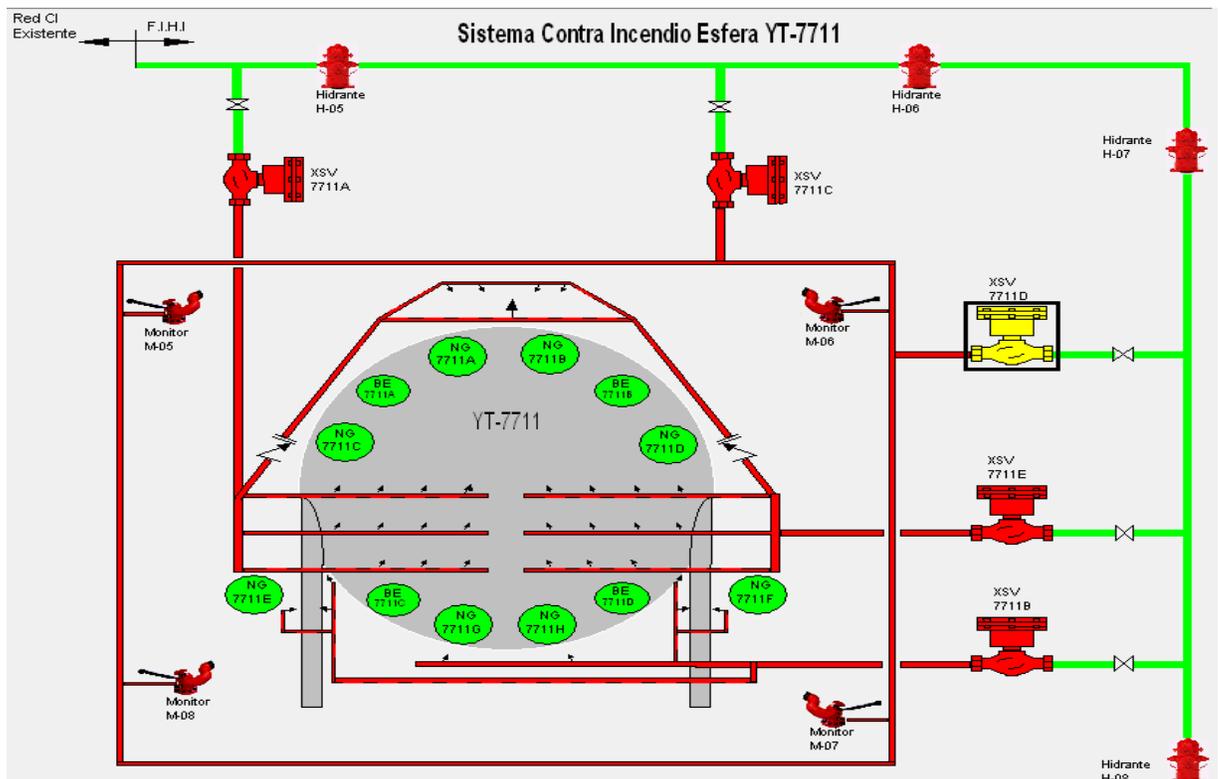


Figura 6.6 Resultado de la simulación de cerrado y error para las válvulas de diluvio

En la figura 6.7 se muestra el resultado de la simulación para las válvulas de diluvio. Donde 4 se encuentran abiertas y se indican de color verde y una de color rojo indica que se encuentra cerrada. También se puede observar que las tuberías de las respectivas válvulas abiertas, cambian a color verde con líneas pequeñas de color rojo, mientras que la tubería con las válvulas cerrada se mantiene de color rojo.

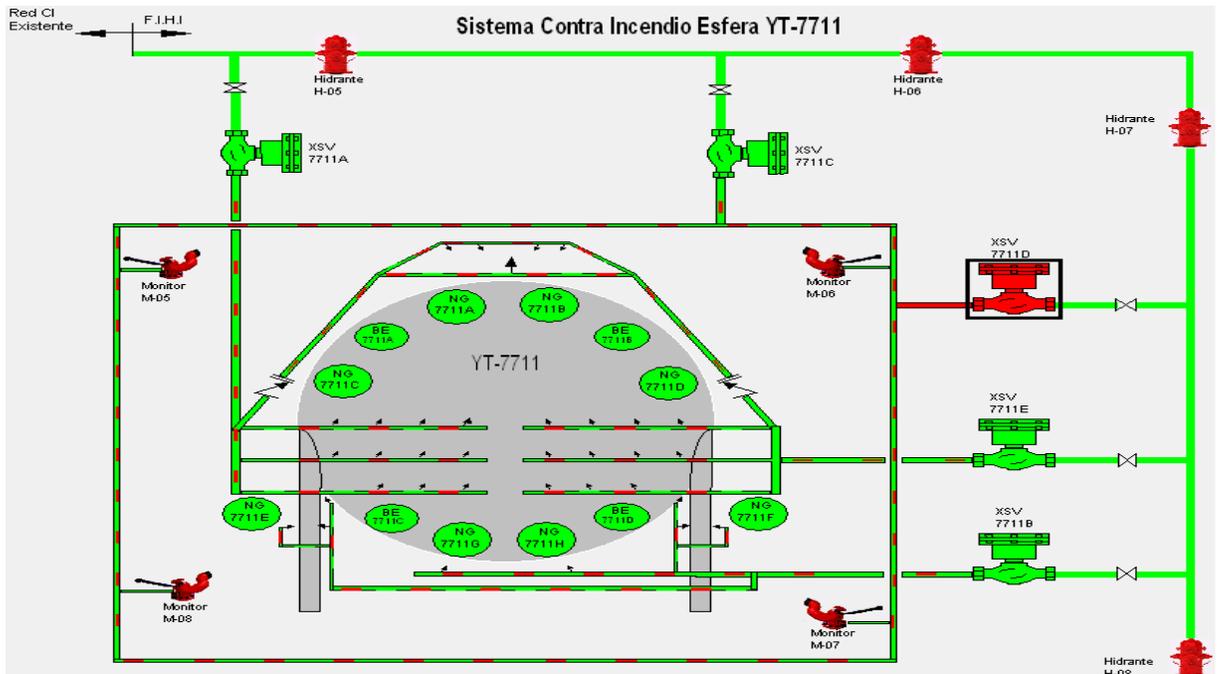


Figura 6.7 Resultado de la simulación para las válvulas de diluvio en estado abiertas y cerradas

En la figura 6.8 se muestra el resultado de la simulación de los indicadores de alarmas cuando el sistema no se encuentra en estado de emergencia, figura 6.8.a y en la figura 6.8.b cuando el sistema dá señal de alarma, porque se detectó llama.



Figura 6.8 Resultado de la simulación indicadores de la activación y no activación de alarmas

6.2 Análisis

Se procedió a realizar varias listas de verificación, esto con el fin de facilitar la rápida comprensión y verificación de cumplimiento de los objetivos propuestos para el buen desarrollo del sistema contra incendio. Estas listas de verificación se muestran en el apartado anterior de resultados.

En la tabla 6.1 se muestra el cumplimiento de los sensores de llama para distintos procesos de control. Primero se debe mencionar que se verificó cada uno de los sensores en forma individual y después todas las distintas posibles combinaciones de estos, esto con el fin de confirmar que en caso de activación de más de un sensor, cualquiera que sea, el sistema va responder adecuadamente.

Como parte de las entradas físicas de la programación, se enviaron y recibieron señales de los sensores al controlador para notar su respuesta. Por medio de simulación se verificó que los sensores reciben e interpretan correctamente la señal de auto diagnóstico, el resultado fue el deseado. Luego se procedió a verificar si el sensor manda señal indicando que se ha detectado llama y si se activa el sistema. El resultado para este punto anterior fue el querido sin importar la combinación de los detectores de llama. Para fines prácticos y hacer lo más real posible la simulación se asignó un tiempo de respuesta menor a 5 segundos a cada sensor de llama, según como se pide en las especificaciones de este tipo de detector. El controlador solo va tomar acción referente a los sensores de llama si recibe 24Vcc en sus respectivos pines.

En la tabla 6.2 se muestra el cumplimiento de los sensores de gas con distintos procesos de control. Primero se debe mencionar que se verificó cada uno de los sensores en forma individual y después todas las distintas posibles combinaciones de estos, esto con el fin de confirmar que en caso de activación de más de un sensor, cualquiera que sea, el sistema va responder adecuadamente.

Como parte de las entradas físicas de la programación, se enviaron y recibieron señales de los sensores al controlador para notar su respuesta. Por medio de simulación se verificó que los sensores reciben e interpretan correctamente la señal de auto diagnóstico. Luego se procedió a verificar si el sensor manda señal indicando la concentración de gas en la atmósfera y si el sistema se activa cuando dos o más sensores mandan señal de un 20% del LEL y 50% del LEL. El resultado para este punto anterior fue el querido sin importar la combinación de los detectores de gas. Para fines prácticos y hacer lo más real posible la simulación se asignó un tiempo de respuesta menor a 5 segundos a cada sensor de gas, según como se pide en las especificaciones de este tipo de detector. El controlador solo va tomar acción referente a los sensores de gas si recibe 24Vcc en sus respectivos pines. En la señalización del nivel de concentración de gas se incluyó un margen de error de un poco menos del 3% de la escala total, esto debido a que los sensores son instrumentos físicos que por diversas razones no van a ser 100% precisos.

En la tabla 6.3 se muestra el cumplimiento de las válvulas de diluvio con distintos procesos de control. Primero se debe mencionar que se verificó cada uno de las válvulas de diluvio en forma individual y después todas las distintas posibles combinaciones de estas, esto con el fin de confirmar que en caso de apertura y/o cierre de más de una válvula, cualquiera que sea, el sistema va responder adecuadamente.

Como parte de las entradas físicas de la programación, se enviaron señales de los interruptores de posicionamiento (ZSC y ZSO) al controlador para notar su respuesta. Por medio de simulación se verificó que el controlador recibe e interpreta correctamente la señal enviada por los interruptores de abierto y cerrado de cada una de las válvulas. Luego se procedió a verificar si el estado indicado de abierto o cerrado para cada una de las válvulas de diluvio es realmente el adecuado, es decir que no haya ningún error, por ejemplo que los interruptores envíen señal de apertura de válvula y en realidad se encuentre cerrada. Para indicar algún problema con las válvulas de diluvio se tiene la señal de estado de error, la cual también se verificó su

funcionamiento adecuado para todas las válvulas y distintas combinaciones de estas. La señal de error se activó cuando tanto el interruptor de abierto como el interruptor de cerrado de una misma válvula le envían al controlador señal de activos, estos dos estados no pueden ser posibles en un mismo tiempo, igualmente pasa si ninguno de los interruptores no envían señal de activación.

Se verificó el funcionamiento adecuado de las válvulas de diluvio al enviar un pulso eléctrico, se revisa si realmente reciben los 24 Vcc necesarios para su activación. Se simularon varios posibles escenarios para comprobar el adecuado funcionamiento de estas válvulas. Escenarios como que una o varias válvulas de diluvio estén activadas mientras otras ya se encuentran manualmente cerradas y el sistema contra incendio sea capaz de entrar a operar correctamente, también fue fundamental crear varios escenarios para verificar que se represente adecuadamente el orden de cierre manual de las válvulas a pesar de que este sea aleatorio, entre otros.

Las válvulas de diluvio solo van a tomar acción referente a su apertura si reciben 24 Vcc en su entrada de solenoide, por lo tanto se verificó que el controlador en realidad envía esa tensión requerida al pin de salida deseado para activar la solenoide.

En la tabla 6.4 se muestra la lista de verificación del funcionamiento de las señales de alarma en las distintas áreas de refinería, cómo lo son el cuarto de control, cuarto de GLP y campo. Las pruebas consisten en revisar si el controlador efectivamente envía por medio de sus respectivos pines una tensión de 24 Vcc a los dispositivos que emiten alarma sonora y visual. Una vez confirmado que verdaderamente se tiene la tensión adecuada, es necesario debido a la filosofía de control seguro verificar si los dispositivos de alarma en realidad se activaron, esto se hace colocando un relé después de cada uno de los dispositivos de alarma y una vez activados los dispositivos estos envían señal a los relé y estos a su vez envían señal al controlador. En la simulación, el controlador recibió con éxito esta señal de confirmación por parte del relé.

La tabla 6.5 es una lista de verificación del correcto funcionamiento del HMI. Al igual se crearon varios escenarios contemplando todas las posibles rutas que puedan aparecer a la hora de implementar el sistema. Se comprobó si el estado de las tuberías presentadas en la interfaz que maneja el operador se muestra con los colores adecuados. Se pudo visualizar el color rojo para indicar que las tuberías están cerradas y el verde cuando había flujo de agua a través de ella. Para los detectores de llama y gas se representó de forma correcta los respectivos colores. Rojo para indicar que los sensores han detectado llama o alta concentración de gas, verde para indicar que se encuentran en buen funcionamiento, amarillo y amarillo parpadeante para indicar que hay error de datos y sensor en mal estado respectivamente.

Para la indicación visual de la interfaz HMI se revisaron uno por uno los mensajes textuales de alerta que muestra el sistema. Si existe una condición de alerta por detección de fuego o alta concentración de gas, en todas las pantallas del sistema se debe mostrar un mensaje parpadeante notificando al operador el tipo de emergencia que está ocurriendo. También hay mensajes textuales notificando error de datos, algún dispositivo en mal estado, entre otros, los cuales todos se les revisó su buen funcionamiento para asegurar que el sistema se encuentra en óptimas condiciones.

El despliegue de la interfaz se da de forma muy similar a la actualmente utilizada en RECOPE con códigos de colores, pantallas emergentes y visualización de datos muy parecidos a los sistemas que se encuentran funcionando.

Dentro de los resultados se tiene la opción de que el operador pueda acceder a una ventana donde aparezca el histórico de alarmas y eventos, seleccionando con anticipación el rango de fecha que se desea ver. Se da la opción de poder imprimir este histórico para poder llevar un registro de alarmas y eventos. Cada alarma y evento tiene su fecha y hora de acontecimiento para llevar un mejor registro. El resultado obtenido de este histórico se muestra en la figura 6.1.

En el capítulo de resultado se mostraron imágenes de lo obtenido mediante la simulación. De la figura 6.2 a la 6.8 se muestran algunos de los escenarios creados para comprobar el correcto funcionamiento del sistema. Cabe destacar que son muchos los posibles escenarios que se pueden presentar, por lo tanto, por la gran cantidad no se pueden mostrar todos los resultados en este documento para cada uno de los escenarios, pero en general se puede decir que los resultados de la simulación fue exitosa y el funcionamiento del sistema contra incendio fue el esperado.

La solución desarrollado siempre ha tenido en mente no solo el funcionamiento en la esfera YT-7711, sino que también la implementación para futuras esferas que se van a construir en el mismo plantel de RECOPE. Esto debido a que todo tanque que contenga sustancia inflamable debe contar con un sistema contra incendio para crear un ambiente de mayor seguridad y disminuir la probabilidad de que aparezcan situaciones de mayor riesgo.

Cabe señalar que con el surgimiento de nuevas y mejores tecnologías el sistema contra incendio desarrollado en este proyecto puede llegar a mejorarse.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se incluye las principales conclusiones, sean beneficios o consecuencias obtenidas como producto de la solución del problema. También se mencionan los alcances y limitaciones que presenta el sistema contra incendio desarrollado. Al igual se incluye una lista de recomendaciones o mejoras que pueden sugerirse para ser consideradas en la ejecución de trabajos posteriores basados o proyectos que requieren este mismo sistema.

7.1 Conclusiones

- El sistema cumple con las normas NFPA 72 y API2510 referente a situaciones de alto riesgo contra incendio.
- Se comprobó el funcionamiento del sistema contra incendio basado en simulaciones.
- Se cumplió con los parámetros definidos por RECOPE, sobre las especificaciones y requerimientos de diseño del sistema contra incendio.
- Se realizó un esquema de control que cumpla con los requerimientos del sistema contra incendio.
- Elevadas ganancias propias de los elementos de control causan problemas de oscilaciones indeseadas y consecuente inestabilidad de los sistema en su respuesta dinámica, para disminuir estas oscilaciones se incluyó una ganancia proporcional menor a la unidad.
- La utilización de un controlador lógico programable representó una solución eficiente para el control automático del sistema contra incendio, esto debido a su capacidad de manejo de múltiples señales, el cual abarca hasta 30 módulos locales para el manejo de señales analógica y/o digitales.
- Se confeccionó hojas de especificaciones técnicas con requerimientos mínimos que deben tener los sensores y alarmas del sistema.
- Desarrollo de la interfaz hombre-máquina con los mismos estándares que tienen otros sistemas similares en RECOPE.

- El sistema SCADA representó la manera más sencilla de monitorizar y controlar el equipo y el proceso contra fuego y gas, tomando en cuenta la gran cantidad de equipo a manejar en dicho proceso.
- Se confeccionó una lista de lineamientos y conclusiones que permitan la no objeción de los planos entregados por el contratista.
- El sistema contra incendio desarrollado en este proyecto se puede implementar para futuras esferas de RECOPE.

7.2 Recomendaciones

- Una vez instalados los instrumentos en campo, se recomienda realizar una inspección visual una vez por semana de presiones, fugas y principales componentes de los equipos.
- Realizar una prueba cada tres meses que incluya prueba de alarmas, limpieza de filtro de las válvulas de diluvio y prueba de los principales componentes.
- Ejercer una prueba una vez por año, que incluya prueba de activación del sistema contra incendio y pruebas similares a las realizadas cada tres meses.
- Todas las pruebas deben realizarse conforme a lo detallado en los manuales de instalación y operación correspondientes al sistema.
- A futuro se puede implementar un sistema de enfriamiento, compuesto de cuatro sensores de temperatura distribuidos en la parte superior de la esfera, que activen el riego de agua en el anillo superior y diluvio central de la esfera cuando esta alcanza 38°C o más y se cierre cuando alcanza los 36°C.
- Para una representación más amigable de los eventos y alarmas con el operador, se puede incorporar una opción de visualizar el sumario de alarmas y eventos de manera gráfica, en una pantalla parecida a la mostrada a continuación:

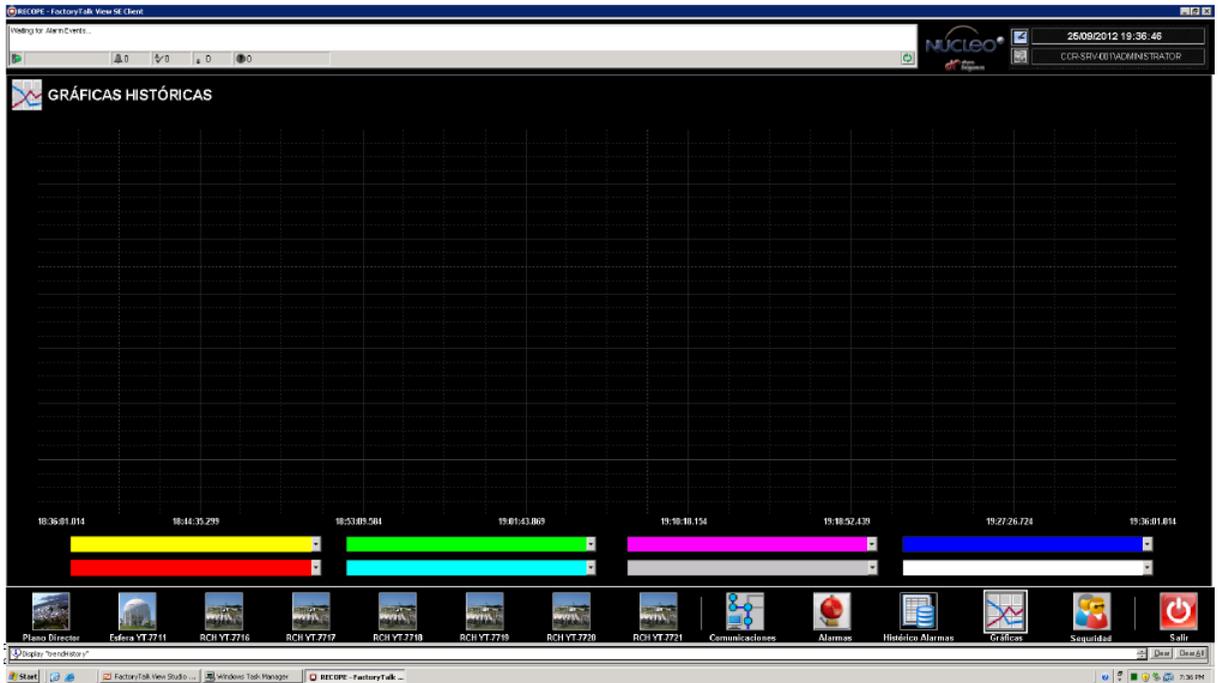


Figura 7.1 Gráficas históricas

- En la ventana anterior se puede seleccionar el día y el evento deseado para que se muestre de manera gráfica.

Bibliografía

- [1]Allen Bradley. (mayo de 2011). *Ethernet/IP Network Configuration User Manual*. Recuperado el setiembre de 2012, de http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/enet-um001_-en-p.pdf
- [2]Allen-Bradley. (1998). *Módulos de E/S analógicas ControlLogix*. EE.UU.
- [3]Allen-Bradley. (2001). *Módulos de E/S digitales ControlLogix*. EE.UU.
- [4]Allen-Bradley. (setiembre de 2012). *Optimize productivity with RSLogix 5000 design and configuration software*. Obtenido de http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/pp/9324-pp001_-en-p.pdf
- [5]Allen-Bradley. (noviembre de 2012). *Rockwell Automation*. Obtenido de <http://www.ab.com/en/epub/catalogs/12762/2181376/2416247/1239760/1551240/RSView32.html>
- [6]Allen-Bradley. (octubre de 2012). *Rockwell Automation*. Obtenido de <http://www.rockwellautomation.com/rockwellsoftware/design/rslogix5000/>
- [7]Allen-Bradley. (noviembre de 2012). *Rockwell Automation*. Obtenido de <http://www.rockwellautomation.com/rockwellsoftware/design/rslinx/>
- [8]Allen-Bradley. (2002). *Uso de ControlLogix en aplicaciones SIL2, Manual de referencia de seguridad*. EE.UU.
- [9]American Petroleum Institute. (agosto de 2012). *API*. Obtenido de www.api.org
- [10]American Petroleum Institute. (2005). *Fire-Protection Considerations for the Design and Operation of Liquefied Petroleum GAS (LPG) Storage Facilities (API 2510)*. Washington, DC: API Publishing Services.
- [11]Bohórquez Ingeniería LTDA. (2005). *Ingeniería de Proceso, Filosofía de Control del Sistema de GLP*. Ingeniería Sistema GLP - RECOPE.
- [12]Bohórquez Ingeniería LTDA. (2005). *Instrumentación and Control, Especificación General de Detección de Llamas y Gas*. Ingeniería Sistema GLP - RECOPE.
- [13]Chemguard. (s.f.). *Single way monitors*. Recuperado el noviembre de 2012, de <http://www.chemguard.com/fire-suppression/catalog/Equipment/manual-monitors/cm-1250b-3.aspx>
- [14]Cooper MEdC. (febrero de 2012). *Luces y semáforos*. Recuperado el noviembre de 2012, de <http://www.crouse-hinds.com/uploads/pdfs/products/families/Luces%20y%20Semaforos.pdf>
- [15]Cooper MEDC. (febrero de 2012). *Sirenas*. Recuperado el noviembre de 2012, de <http://www.crouse-hinds.com/uploads/pdfs/products/families/Sirenas.pdf>
- [16]Emerson Process Management. (setiembre de 2012). *Net Safety Monitoring*. Obtenido de <http://www2.emersonprocess.com/en-US/brands/rosemountanalytical/netsafety/Pages/index.aspx>
- [17]Escuela de ingeniería electrónica. (agosto de 2012). *Guía para la presentación del informe final*. Obtenido de <http://www.ie.itcr.ac.cr/fnavarro/Pg%20-%20I%202013/>
- [18]García, O. (2005). *Respuesta inicial a incidentes con materiales peligrosos*. Santo Domingo, D.N.

- [19]Inbal Valves. (octubre de 2012). Obtenido de http://www.inbalvalves.com/espanol/valve_design.htm
- [20]Institution of Chemical Engineers. (2007). *LNG Fire Protection and Emergency Response*. Recuperado el setiembre de 2012, de www.knovel.com
- [21]Instituto de Normas Técnica de Costa Rica. (octubre de 2012). *INTECO*. Obtenido de www.inteco.or.cr
- [22]International Electrotechnical Commission. (setiembre de 2012). *IEC*. Obtenido de www.iec.ch
- [23]Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de Control Automático*. México: Prentice Hall Hispanoamericana S.A.
- [24]National Fire Protection Association. (2010). *National Fire Alarm and Signaling Code Handbook (NFPA72)*. Quincy, Massachusetts: Quebecor World/Taunton.
- [25]National Fire Protection Association. (agosto de 2012). *NFPA*. Obtenido de www.nfpa.org
- [26]Net Safety Monitoring Inc. (7 de diciembre de 2009). *Hart communication with flame detectors*. Recuperado el octubre de 2012, de http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Analytical%20Documents/NSM_Manual_MAN-0119_FLAME_DETECTORS.pdf
- [27]Net Safety Monitoring Inc. (julio de 2008). *Millennium infrared combustible gas detector user manual*. Recuperado el octubre de 2012, de http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Analytical%20Documents/NSM_Manual_MAN-0059_MLP-A-SIR100_MLP-AR-SIR100_MLP-AD-SIR100.pdf
- [28]Net Safety Monitoring Inc. (2010). *Product Catalog for Flame Detection & Combustible Gas Detection*. Canada.
- [29]Net Safety Monitoring Inc. (agosto de 2012). *SIR100 infrared LEL gas detector product data sheet*. Recuperado el octubre de 2012, de http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Analytical%20Documents/NSM_PDS_BCR-0024-00-012_Millennium_SIR100_Gas_Detector.pdf
- [30]Net Safety Monitoring Inc. (noviembre de 2012). *Ultraviolet and infrared flame detector product data sheet*. Recuperado el noviembre de 2012, de http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Analytical%20Documents/NSM_PDS_BCR-0005-00-017_UV_IRS_Flame_Detector.pdf
- [31]Net Safety Monitoring Inc. (7 de noviembre de 2008). *Ultraviolet/Infrared flame detector user manual*. Recuperado el noviembre de 2012, de http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Analytical%20Documents/NSM_Manual_MAN-0015_UV-IRS-A.pdf
- [32]Overblog. (2009). Recuperado el noviembre de 2012, de <http://prevencion.overblog.com/article-28526780.html>
- [33]PLCopen. (setiembre de 2012). *IEC 61161-3: un recurso de programación estandar*. Obtenido de www.plcopen.org
- [34]Refinadora Costarricense de Petróleo S. A. (2010). *Tomo II - Alcance del Trabajo y Condiciones Técnicas Generales*. San José, Costa Rica.

- [35]Refinadora Costarricense de Petróleo S.A. (2010). *Tomo III - Anexo No 12: Alcance de Ingeniería de Detalle*. San José, Costa Rica.
- [36]Simplex. (agosto de 2012). *Manual stations data sheet*. Recuperado el octubre de 2012, de http://xtra.simplexnet.com/a_e/FA/2099-0009.pdf
- [37]Simplex. (setiembre de 2009). *True alert multi-candela notification appliances* . Recuperado el octubre de 2012, de http://xtra.simplexnet.com/a_e/FA/4906-0002.pdf
- [38]Smith, C. A. (1991). *Control automático de procesos*. Mexico: Noriega Editores.
- [39]Vega, M. G. (2004). *Normas de presentación de los informes de prácticas de especialidad, tesis, seminarios y otros de ITCR en formato digital*. Biblioteca José Figueres Ferrer, Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Apéndices

A.1 Glosario, abreviaturas y simbología

A: Amperios, unidad de medida de corriente

Accidente ambiental: Evento inesperado e indeseable que afecta, directa o indirectamente, la salud y la seguridad de la población o causa impactos agudos al medio ambiente.

Accidente laboral: Es el que sucede al trabajador durante su jornada laboral o bien en el trayecto al trabajo o desde el trabajo a su casa.

Actuador: Dispositivo que realiza una acción física al aplicarle una señal eléctrica.

Allen Bradley: Marca de dispositivos electrónicos entre ellos controladores.

ASCII: Código Estándar Estadounidense para el Intercambio de Información, según sus siglas en inglés. Es un código de caracteres basado en el alfabeto latino.

Automatización: Un sistema donde se transfieren las tareas realizadas habitualmente por operadores humanos a un conjunto de elementos tecnológicos.

Chapa: Lámina de metal.

Chasis: Panel de conexiones eléctricas en el que se conecta un controlador y sus módulos.

DF1: Protocolo de comunicación con paquetes de información de controlador.

DH+: Data Highway Plus, bus para comunicación utilizado por Allen Bradley

DH485: Data Highway, bus para comunicación utilizado por Allen Bradley.

Diagrama de escalera: Lenguaje de programación que utiliza contactos y bobinas como elementos principales para establecer una lógica de control.

Escalabilidad: Característica de un equipo o proyecto para admitir cambios, actualizaciones y mejoras.

EtherNet: Protocolo de comunicaciones a nivel eléctrico.

Golpe de ariete: Choque violento que se produce sobre las paredes de un conducto forzado, cuando el movimiento líquido es modificado bruscamente.

Hardware: Componentes físicos o materiales, generalmente de un sistema electrónico.

mA: Miliamperios, milésima parte de un amperio.

MPa: Mega Pascal, millonésima parte de un Pascal.

Multicable: Es un tipo de cable eléctrico para uso pesado. La construcción básica consiste en un haz de conductores individuales rodeados por una camisa exterior única. Su ventaja es una instalación más ordenada y con menos conectores.

NEMA: Índice de protección estandarizado por la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos de los Estados Unidos.

Riesgo laboral: Representa la magnitud del daño que un factor de riesgo puede producir sobre los empleados, a causa o con ocasión del trabajo, con consecuencias negativas en su salud. Estos riesgos si no son tratados y erradicados de la faena existe la probabilidad de que se produzca lo que se define como accidente y enfermedades laborales.

RS-232: Estándar para la comunicación serie de dispositivos electrónicos.

RSLogix5000: Software para la programación en escalera de Allen Bradley.

SCADA: Sistema de control de supervisión y adquisición de datos, cuyo objetivo principal es monitorizar, controlar y alarmar de forma inmediata al plante desde un propio puesto de trabajo.

Software: Conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas para ejecutar ciertas tareas en una computadora.

V: Voltios, medida de diferencia de tensión.

VAC: Voltios en corriente alterna.

VDC: Voltios en corriente directa.

A.2 Información sobre la empresa

La Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE) es una institución de Costa Rica fundado en 1961 que se encarga de la importación, refinación y distribución de combustible y asfalto en el país a mayoreo. En 1963 inició la construcción de su planta refinadora ubicada en Moín, Limón.

MISIÓN

“Abastecer los combustibles requeridos por el país, mediante la administración del monopolio del Estado de la importación, refinación y distribución al mayoreo de combustibles, asfalto y naftas; para promover el desarrollo del país.”

VISIÓN

“Ser un pilar de la competitividad de Costa Rica.”

Actualmente RECOPE cuenta con 8 planteles, los cuales se listan a continuación:

- Plantel Refinería: Moín Limón
- Plantel Siquirres, Limón: Estación de Bombeo
- Plantel El Alto: en Ochomogo, Cartago
- Oficinas centrales: en San José, Costa Rica
- Plantel Aeropuerto: Aeropuerto Internacional Juan Santa María, Alajuela
- Plantel La Garita: en Alajuela
- Plantel Barranca: en Puntarenas

El proyecto se realizó en el plantel de Limón, Moín en el departamento de Dirección de Ingeniería y Ejecución de Proyectos, a través de la oficina del Proyecto SAGAS.

Por segundo año consecutivo RECOPE fue calificada como la mayor empresa de la región centroamericana por la Revista América Economía, dentro del ranking de las mejores empresas de América Latina publicado en su edición especial de julio 2010.

Anexos

A.1 Uso de recursos

La tabla A.1 muestra un listado de los recursos que son necesarios para el confort y el desarrollo de la solución. Además los dispositivos y software que son fundamentales para realizar la configuración, conexión y pruebas de cada equipo en la implementación del proyecto.

Tabla A.1. Lista de recursos necesarios para el proyecto

Lista de recursos	Cantidad
Mano de obra	
Remuneración económica al estudiante	37.5 horas/semana
Servicios básicos	
Electricidad	8 horas/día
Agua	8 horas/día
Internet	8 horas/día
Equipo	
Computadora	2
Silla y escritorio	1
Controlador certificado por normas internacionales	1
Detector de llama	4
Detector de gas licuado de petróleo	8
RSView	1
RSLogix	1
RSLinx	1
RSLogixEmulate 5000	1

A.2 Presupuesto

La tabla A.2 muestra una lista de los recursos del proyecto, para la cual se contempla tanto los recursos que posee RECOPE, así como los que será necesario suplir para el desarrollo del sistema de fuego y gas para la esfera YT-7711.

Tabla A.2. Presupuesto necesario para la realización del proyecto

Cantidad	Descripción de recursos	Costo/unidad (colones)	Disponibilidad (%)
2	Computadora	300000	100
1	Silla y escritorio	70000	100
2	Controlador certificado por normas internacionales	1000000	
4	Detector de llama	2500000 ^[5]	
8	Detector de gas licuado de petróleo	2500000 ^[5]	
---	Otros Equipos (Válvulas, lanzas, estaciones de alarmas, etc.)	150000000	100
1	Remuneración económica al contratista	100000000	100
1	Remuneración económica al estudiante	1100000	100
1	Acceso a Internet	65000	100
1	Servicio de electricidad	160000	100
1	Servicio de agua	80000	100
	Total (colones)	284075000	