

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



**Diseño de las etapas de medición, comunicación y control del sistema F&G para
almacenamiento de LPG de RECOPE, Moín**

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

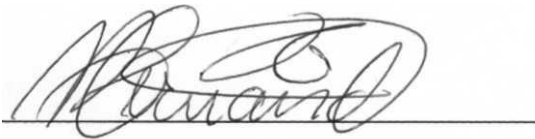
Wagner Corrales Taylor

Cartago, Agosto de 2010

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. Néstor Hernández
Profesor lector



Ing. Eduardo Interiano
Profesor lector



Ing. Marvin Hernández Cisneros
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, 27 de Agosto 2010

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, Agosto 2010

Wagner Corrales Taylor
Wagner Enrique Corrales Taylor

Céd: 7-0169-0513

Resumen

La Refinería Costarricense de Petróleo S.A., es la empresa de Costa Rica por excelencia encargada del suministro de hidrocarburos en todo el territorio del país. Uno de los productos energéticos que se encarga de distribuir es el gas licuado de petróleo.

Actualmente, en el plantel de Moín en Limón, se cuenta con tres esferas y para el almacenamiento de LPG las cuales son utilizadas para ventas. Estas esferas, en promedio, tienen una capacidad de 22 mil barriles de producto disponible; sin embargo, se tienen planes de expansión para contar con un mayor número de esferas, las cuales, debido a la naturaleza del producto, deben mantenerse bajo ciertas condiciones especiales que permitan un ambiente seguro mientras es almacenado en el plantel.

Por esta razón que se requiere diseñar un sistema de medición y control para estas condiciones en cada esfera, que cumpla con ciertas normativas referentes a este tipo de actividad (entre ellas NFPA, IEC, API). En la actualidad, se cuenta con un sistema de medición y control basado en un PLC5, detectores y actuadores; sin embargo, varios elementos y subetapas deben rediseñarse para obtener los beneficios de contar con un sistema que cumpla con los estándares básicos de vigilancia. Es necesario, por ende, utilizar los principios de detección adecuados; tecnología de controladores PESC avalado por el IEC-61508; una red MODBUS RTU Maestro/Esclavo que permita tener alcance remoto de condiciones más específicas en el campo; y en conjunto con el diseño de un enlace inalámbrico punto a punto con el fin de lograr visualización remota de los datos, que utilice la técnica FHSS para hacer al enlace versátil ante interferencias.

Palabras clave: sistemas de control F&G, protocolo comunicación MODBUS, controladores electrónicos programables de seguridad, configuración fail-safe.¹

¹ La descripción de los términos de esta página se presenta en las secciones de marco teórico y glosario.

Summary

The Refinería Costarricense de Petróleo S.A. is the company of Costa Rica for excellence in charge of supplying hydrocarbons in the whole territory. One of the energy products that it distributes is the liquefied petroleum gas.

Currently, at the plant of Moin in Limon, there are three spheres for the storage of LPG which is used for delivering to the whole country. These spheres, on average, have a capacity of 22 thousand barrels of product available for sale; however, expansion plans are to have a greater number of spheres, which, due to the nature of the product, should be kept under certain special conditions that allow safety while it is stored at the plant.

It is for this reason that is required to design a measurement and control system prototype for these conditions in each sphere, to comply with certain regulations regarding this type of activity (including NFPA, IEC, API). Currently, it has a measuring and control system based on a PLC5, sensors and actuators; however, several components and sub-stages have to be redesigned to obtain the benefits of having a system that meets basic standards of monitoring. It is necessary, therefore; to use the adequate principles of detection, technology drivers PESC endorsed by the IEC-61508, the network design MODBUS RTU Master / Slave to allow remote reaches to have more specific conditions in the field, in conjunction with the design of a point to point wireless link to achieve remote viewing of data, that uses the FHSS technique to make the link Interference versatile.

Keywords: F&G Control Systems, MODBUS communication protocol, electronic programmable safety controllers, configuration fail-safe.

Dedicatoria

A mi madre por su amor y apoyo incondicional día con día, por quien agradeceré eternamente a Dios por ponerla en mi vida

Agradecimiento

A Dios por todas sus bendiciones y permite llegar hasta este punto.

A mi familia que ha sido un gran respaldo siempre.

A mis amigos por los momentos compartidos y la ayuda brindada.

Al personal de Instrumentos y Proceso en RECOPE por la ayuda brindada durante el proyecto

ÍNDICE GENERAL

Capítulo I: Introducción	1
1.1 Entorno del proyecto y definición del problema existente	1
1.2 Enfoque de la Solución	4
Capítulo II: Meta y objetivos	6
2.1 Meta	6
2.2 Objetivo General	6
2.3 Objetivos Específicos	6
Capítulo III: Marco teórico	7
3.1 Descripción del sistema a controlar	7
3.2 Antecedentes Bibliográficos	10
3.3 Descripción de los principales conceptos de seguridad, químicos, físicos y electrónicos relacionados con la solución del problema	11
3.3.1 Clasificación de áreas	11
3.3.2 Sistemas con nivel de seguridad intrínseca	13
3.3.3 Principios de detección de gas	15
3.3.4 Principios de detección de fuego	16
3.3.5 Comunicación de datos serial RS-485	18
3.3.6 Protocolo Modbus	19
3.3.7 Controladores Lógicos Programables	21
3.3.8 Relé electromagnético	22
3.3.9 Válvulas solenoides	24
3.3.10 Enlaces de radio frecuencia	25
Capítulo IV: Procedimiento metodológico	29
4.1 Reconocimiento y definición del problema	29
4.2 Obtención y análisis de información	30
4.3 Evaluación de alternativas y síntesis de una solución	30

Capítulo V: Descripción detallada del planteamiento de la solución..... 31

5.1	Descripción del sistema	31
5.1.1	Datos	33
5.1.2	Arquitectura del sistema	33
5.1.3	Detecciones del sistema.....	34
5.1.4	Reporte de eventos en el campo	34
5.1.5	Respuesta del sistema	34
5.2	Selección de dispositivos principales para solución	35
5.2.1	Selección detectores de gas y llama	35
5.2.2	Selección del Controlador Programable de Seguridad.....	36
5.2.3	Selección del radio módem.....	37
5.3	Descripción del hardware.....	38
5.3.1	Medición de campo	38
5.3.2	Control del sistema F&G	42
5.3.3	Radio Módem	45
5.3.4	Comunicaciones	48
5.3.5	Arquitectura de respuesta	52
5.4	Descripción del software	64
5.4.1	Lógica General.....	64
5.4.2	Lógica Control de Monitorización.....	66
5.4.3	Comunicación Modbus	70
5.4.4	Software Logix5000 y RadioLinx ControlScape FH	79

Capítulo VI: Análisis de resultados..... 81

6.1	Resultados	81
6.1.1	Instalación detectores en el campo	81
6.1.2	Comportamiento del sistema	88
6.1.3	Rentabilidad del proyecto.....	90
6.2	Análisis.....	92

Capítulo VII: Conclusiones y recomendaciones	96
7.1 Conclusiones.....	96
7.2 Recomendaciones	97
Bibliografía	98
Apéndices	100
A.1 Glosario, abreviaturas y simbología	100
B.1 Determinación cualitativa SIL	103
B.2 Equipo permitido por clasificación Clase I, División.....	104
B.3 Esquema de registros.....	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.	Capas de protección de planta.....	2
Figura 1.2.	Diagrama de primer nivel de la solución seleccionada	5
Figura 3.1.	Etapas de prevención y mitigación del sistema F&G.....	8
Figura 3.2.	Diagrama de bloques del sistema F&G en general	9
Figura 3.3.	Esquema óptico de un detector de gas infrarrojo de General Monitors	16
Figura 3.4.	Respuesta espectral de los detectores UV/IR de General Monitors.....	17
Figura 3.5.	Conexión típica de nodos utilizada para la comunicación RS 485	19
Figura 3.6.	Tipos de codificación de los mensajes Modbus	20
Figura 3.7	Diagrama de un relé	23
Figura 3.8	Válvula solenoide directa de dos vías	24
Figura 3.9	Elementos de un enlace inalámbrico	26
Figura 3.10	Representación de las zonas Fresnel.....	28
Figura 5.1	Diagrama general del proyecto	32
Figura 5.2.	Naturaleza de los datos procesados	33
Figura 5.3	Detector de gas modelo IR-400 adherido a caja de unión de General Monitors.....	39
Figura 5.4	Detector de llama modelo FL3100H de General Monitors.....	40
Figura 5.5	Diagrama general con módulos de etapas de lectura, control y comunicación propuesto	42
Figura 5.6	Radio RLX-IFH9S de Prosoft Inc. seleccionado para la aplicación	46
Figura 5.7	Conexión del DB-9 en el radio y el dispositivo al que se conecta	46
Figura 5.8	Antena direccional usada en ambos puntos del enlace.....	48
Figura 5.9	Módulo MVI56-MCM de Prosoft utilizado para la comunicación Modbus.....	49
Figura 5.10	Estado de los jumpers para las interfaces de comunicación a utilizar.....	49
Figura 5.11	Conexión de cables al puerto de aplicación para RS-485	50
Figura 5.12	Conexión detectores de gas al cuarto de control.....	50
Figura 5.13	Conexión detectores de llama al cuarto de control	51
Figura 5.14	Conexión de las fuentes alimentación desde la toma del transformador de aislamiento	53

Figura 5.15	Prueba de luces piloto del rack local e indicación estado de alimentación principal.....	54
Figura 5.16	Conexiones de selección de modo y activación de actuadores	58
Figura 5.17	Bobinas alimentadas por el controlador para detección automática	59
Figura 5.18	Conexiones para módulos de salidas y entradas digitales	60
Figura 5.19	Conexión detectores en módulos entradas analógicas	63
Figura 5.20	Esquema de la lógica general sintetizada del sistema	64
Figura 5.21	Diagrama del programa principal de detección.....	66
Figura 5.22	Diagrama del programa principal de detección (2)	67
Figura 5.23	Algoritmo programa inicial Modbus	70
Figura 5.24	Secuencia configuración Modbus para FL3100.....	72
Figura 5.25	Algoritmo del display de fallas para FL3100	73
Figura 5.26	Ambiente programación Logix5000	79
Figura 5.27	Pantalla de configuración radio maestro del programa RadioLinx ControlScape FH.....	80
Figura 6.1.	Alcance vertical del FL3100 en la parte inferior de la esfera con sensibilidad 100%	83
Figura 6.2	Alcance horizontal del FL3100 en la parte inferior de la esfera con sensibilidad 100%.....	83
Figura 6.3	Alcance vertical del FL3100 en la parte superior de la esfera con sensibilidad 50%	85
Figura 6.4.	Alcance horizontal del FL3100 en la parte superior de la esfera con sensibilidad 50%.....	85
Figura 6.5	Configuración 4 detectores en zona inferior de la esfera	87
Figura 6.6	Probabilidad de falla en demanda del sistema	88
Figura 6.7	Comportamiento de precios por producto.....	91
Figura B.1.1	Método cualitativo para la determinación del SIL.....	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Cantidad de fallas permitidas por año según cada grado SIL	14
Tabla 3.2	Funciones básicas y códigos de operación utilizados del protocolo Modbus	21
Tabla 5.1	Valores y significado de la señal analógica para detectores IR-400	39
Tabla 5.2	Distancias confiables del detector FL3100 con sensibilidad 100% para la aplicación	41
Tabla 5.3	Distancias confiables del detector FL3100 con sensibilidad 50% para la aplicación	41
Tabla 5.4	Determinación de la posibilidad de realizar el enlace según potencia de salida, ganancias y pérdidas	47
Tabla 5.5	Descripción relés de seguridad.....	61
Tabla 6.1	Dimensiones de las zonas por detectar propias de las esferas de almacenamiento.....	81
Tabla 6.2	Parámetros utilizados en instalaciones anteriores para detección en las esferas	82
Tabla 6.3	Resumen de las ubicaciones para detectores FL3100 de campo según las condiciones de la zona y dispositivos de almacenamiento	86
Tabla 6.4	Superficies por cubrir de cada detector de gas en las zonas superior e inferior.....	87
Tabla 6.5	Eventos más importantes del sistema F&G diseñado	89
Tabla 6.6	Precios estimados algunos elementos importantes del proyecto.....	90
Tabla 6.7	Ventas de barriles de LPG en RECOPE para el año 2009	91
Tabla B.3.1	Descripción de los valores y registros principales que utiliza el programa.....	106

Capítulo I: Introducción

En el capítulo actual se da información acerca de la empresa, el problema que se presenta, su entorno y la necesidad de darle solución, además se describe la técnica utilizada para obtener esta solución.

1.1 Entorno del proyecto y definición del problema existente

La Refinería Costarricense de Petróleo (RECOPE de aquí en adelante) fue fundada como sociedad anónima en el año 1961, con su fundación se inician las labores para la adquisición de los permisos respectivos los cuales fueron conseguidos en el año 1963, donde se establece a RECOPE como la primera industria nacional dedicada a la refinación y producción de productos derivados del petróleo. Es en ese año que inicia la construcción de la refinería en Moín, Limón, finalizándose en el año 1967. En sus inicios RECOPE solo contaba con un 15% de participación de capital por parte del gobierno estatal, sin embargo en 1974 pasa a manos del Estado completamente, evolucionando hasta tener la gran infraestructura que posee en todo el país actualmente, con planteles de distribución en lugares como: La Garita, Puntarenas, Barranca y Alajuela.

La visión de RECOPE es “Ser la empresa líder nacional y regional en el mercado de los combustibles, con productos y servicios relacionados, mediante la gestión creativa e innovadora de los recursos humanos y tecnológicos, para potenciar la competitividad del país de manera ambientalmente sostenible, agregando valor a la sociedad costarricense y a sus clientes”², por lo que debe contar con un grado elevado de eficiencia su actividad para alcanzar siempre los estándares de calidad y seguridad.

² Referencia: <http://www.recope.go.cr/>

El área de refinería ubicada en Moín constituye el complejo de producción industrial de RECOPE, donde se ubica la planta procesadora de hidrocarburos, los tanques de almacenamiento de crudos y producto limpio³. Uno de los productos que RECOPE produce y maneja para comercialización es el LPG, es precisamente dentro de este plantel donde se ubican los dispositivos de almacenamiento de gas LPG, área central del proyecto y que no puede escapar a la visión de la empresa, por lo que ya se tienen planes de expansión para seguir cumpliendo las necesidades que tiene el país en cuanto a suministro de LPG. En la actualidad se cuenta con varios dispositivos de almacenamiento de LPG en el plantel, los principales son las llamadas esferas de LPG en las que se logra almacenar entre 18 mil y 25 mil barriles que se encuentran disponibles para comercialización, sin embargo existe un proyecto para ampliar esta área y lograr alcanzar casi 3 veces la cantidad que se tiene hoy día mediante la adición de un mayor número de esferas.

A nivel general, las plantas poseen una composición completa y estructurada para llevar a cabo la protección de las actividades que realizan, (figura 1.1). En nuestro caso se pretende colaborar con esta estructura de prevención, aportando el diseño de la fase control mediante el SIS que permita la acción de parada de emergencia y respuesta ante emergencia.

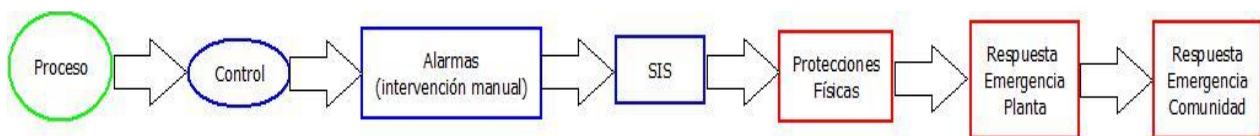


Figura 1.1. Capas de protección de planta

³ Referencia: <http://www.recope.go.cr/>

Con el fin de verificar que se mantengan las condiciones establecidas como seguras deben realizarse mediciones constantemente en los dispositivos de almacenamiento, para descartar condiciones no deseadas, entre ellas: fuego, fugas de gas, etc. En caso de presentarse alguno de los peligros potenciales considerados, se deben dar los avisos y la respuesta debida, todo esto cumpliendo con las recomendaciones además de las exigencias de las prácticas recomendadas y normativas, respectivamente. Con el sistema actual de las esferas de almacenamiento es posible realizar lectura y control; sin embargo, este sistema no cumple con los nuevos estándares ni presenta una estructura que lo haga óptimo para su actividad, además de tener algunas limitantes que se mejoraron mediante el diseño prototipo del sistema de F&G. Algunas de las limitantes del sistema actual son: falta de conocimiento del estado de dispositivos, falta de acciones ante fallas, comunicaciones limitadas, debilidad para cumplir ciertas normas, fallos temporales en la comunicación, entre otras.

Al resolver el problema se logra la posibilidad de contar con un sistema adecuado para responder ante situaciones indeseadas en la nueva zona de almacenamiento de LPG en la refinería, lo que ayuda a mantener la protección del personal que trabaja en el plantel. Otros logros que se alcanzan son: reducción de los montos periódicos que se deben cancelar a las instituciones correspondientes por concepto de seguros de la zona de LPG, conocimiento de la confiabilidad en las señales generadas en campo, definición de los períodos de mantenimiento al sistema que ayude a evitar su vulnerabilidad, mejorar la protección y seguridad de la zona al utilizarse equipo orientado a funciones de seguridad para este tipo de aplicaciones, reducir la posibilidad de fallas, etc.

1.2 Enfoque de la Solución

La selección de la solución se efectuó de la mano de los nuevos estándares, y tomando como base algunos equipos presentes en la empresa para hacerlos converger con el equipo nuevo elegido y el diseño realizado. Esta solución incluye el establecimiento de los elementos de adquisición de datos necesarios; la unidad encargada del control y dar avisos; los elementos encargados de cumplir con la función de seguridad necesaria para el control de las válvulas de diluvio y corte; entre otras.

Para seleccionar la mejor solución al problema se tomaron en cuenta algunos requerimientos de la empresa, los cuales son listados a continuación:

- Realizar un estudio de los estándares y normas de seguridad utilizados en la refinería para cumplir con lo recomendado y exigido para zonas de trabajo en atmósferas peligrosas.
- Selección del equipo por utilizar tomando como base el tipo de actividad en la que se emplearán. Elegir siempre que sea posible equipo de fabricantes utilizados con regularidad en la empresa, por ejemplo, productos fabricados por: Detcon, General Monitors, Rockwell Automation, entre otros.
- Establecer la posibilidad de crear un sistema con un nivel de intrínseco de seguridad óptimo.
- Establecer comunicación con los detectores principales del sistema, que permita el conocimiento de las variables necesarias relacionadas con su estado actual.
- Incluir las funciones de control y alarmas del sistema en el diseño.
- Elegir la comunicación entre el cuarto de LPG y el de operadores de control en “Offside” que permita esquivar los contratiempos provocados por los múltiples trabajos que se realizan constantemente en refinería.

En general, la solución seleccionada consta de un conjunto de insumos tales como: detectores de gas y llama basados en el principio de detección UV e IR, transmisores de temperatura, presión y de nivel, utilizados con anterioridad en la empresa, de las marcas Honeywell y ENRAF NONIUS, todos ellos encargados de capturar los datos en el campo. Cada detector tendrá su comunicación de señal analógica 4-20 mA, además los detectores de llama y gas deben ser colocados de forma adecuada y para el acceso a sus datos más específicos será necesario utilizar una red MODBUS.

Por otro lado se establece una comunicación que traslade los datos hacia el cuarto de operadores a través del aire, utilizando un enlace inalámbrico punto a punto con la técnica del espectro ensanchado, entre otras características, para hacer que se tenga mayor disponibilidad en el enlace cuando se requiera. El encargado de la ejecución de los algoritmos y administración de las tareas necesarias en el sistema F&G es el controlador electrónico programable de seguridad seleccionado para ello. En la figura 1.2 se aprecia el diagrama de bloques de alto nivel del sistema. Sus elementos se detallan en el capítulo 5.

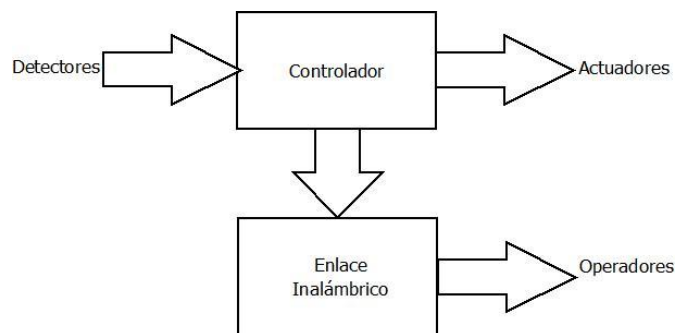


Figura 1.2. Diagrama de primer nivel de la solución seleccionada

Capítulo II: Meta y objetivos

2.1 Meta

Diseñar una herramienta para realizar la lectura, procesamiento y control de datos de campo con el fin de establecer una plataforma destinada a la prevención de accidentes en el área de almacenamiento de gas LPG.

2.2 Objetivo General

Diseñar las etapas de lectura, comunicación, detección de eventos y control del sistema F&G prototipo del área de almacenamiento de LPG de RECOPE en Moín.

2.3 Objetivos Específicos

- Diseñar la etapa de medición de parámetros y variables en el dispositivo de almacenamiento.
- Diseñar la etapa de comunicación para los detectores principales del sistema, que permita el acceso remoto a información de su estado y establecer un esquema de registro de datos de la información obtenida en el campo por los dispositivos seleccionados.
- Diseñar los sistemas de detección y control según el grado de seguridad intrínseca (SIL) de acuerdo a la actividad realizada y el circuito de visualización de estado mediante luces piloto locales, el modo de operación del sistema y la comunicación de los actuadores con el módulo de control.

Capítulo III: Marco teórico

En esta sección se detallan algunos de los fundamentos teóricos utilizados para lograr una solución óptima al problema presentado, estos van desde aspectos de seguridad, físicos, químicos, matemáticos así como inherentes a la ingeniería electrónica.

3.1 Descripción del sistema a controlar

El plantel en general, y por ende las esferas con las que cuenta actualmente el área de almacenamiento de LPG en Moín (YT-7710 y YT-771) poseen un sistema contra incendio por medio de agua de enfriamiento tomada del río Moín; este sistema hace uso de válvulas de diluvio que fungen como los actuadores ante una emergencia calificada.

Estas válvulas son activadas mediante solenoides que poseen conexión mediante cables y su control se da mediante una señal digital que haga que el solenoide libere la presión en la línea y de esta forma lograr la activación de las válvulas de diluvio. En síntesis cada esfera referencia contiene como salidas del sistema contra incendio válvulas de diluvio para los anillos que cubren la esfera, uno inferior y uno superior, en las columnas y en las lanzas de agua. Además, cada esfera cuenta con sus propias válvulas para conexión o aislamiento de emergencia del gas, tanto la tubería de extracción para ventas y llenado de la esfera para almacenamiento, estas tuberías de gas con un diámetro aproximado de 14 pulgadas.

En la figura 3.1 se muestra el diagrama básico de protección que se utiliza desde que se inicia el proceso de protección pasando por varias etapas activas y pasivas hasta que sea necesario dar respuesta de emergencia; en este caso la herramienta del sistema F&G aporta todas las etapas de protección a excepción de las válvulas de alivio y la utilización de la fosa (etapa pasiva).

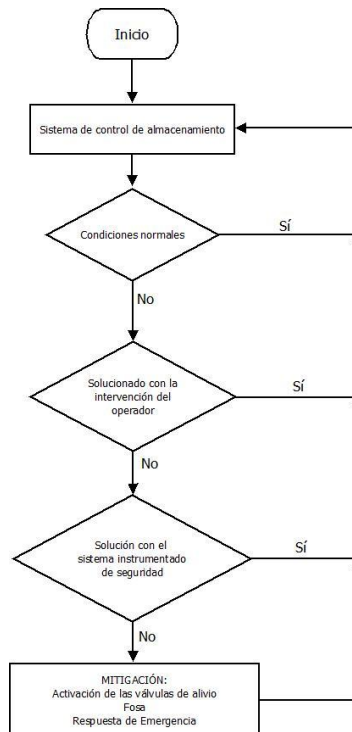


Figura 3.1. Etapas de prevención y mitigación del sistema F&G

El proyecto desarrollado será insertado en el sistema de protección con que cuenta la empresa actualmente, esto quiere decir que las etapas de lectura de datos, lógica de operación, control, respuesta y comunicación serán utilizados con las etapas de respaldo de energía, visualización de los datos y el sistema de actuadores del SCI de RECOPE del sistema de vigilancia del plantel. En la figura 3.2 se aprecia un diagrama de bloques con lo mencionado anteriormente, en donde las etapas de los detectores, pre-actuadores, controlador y enlace inalámbrico serán las que se rediseñen.

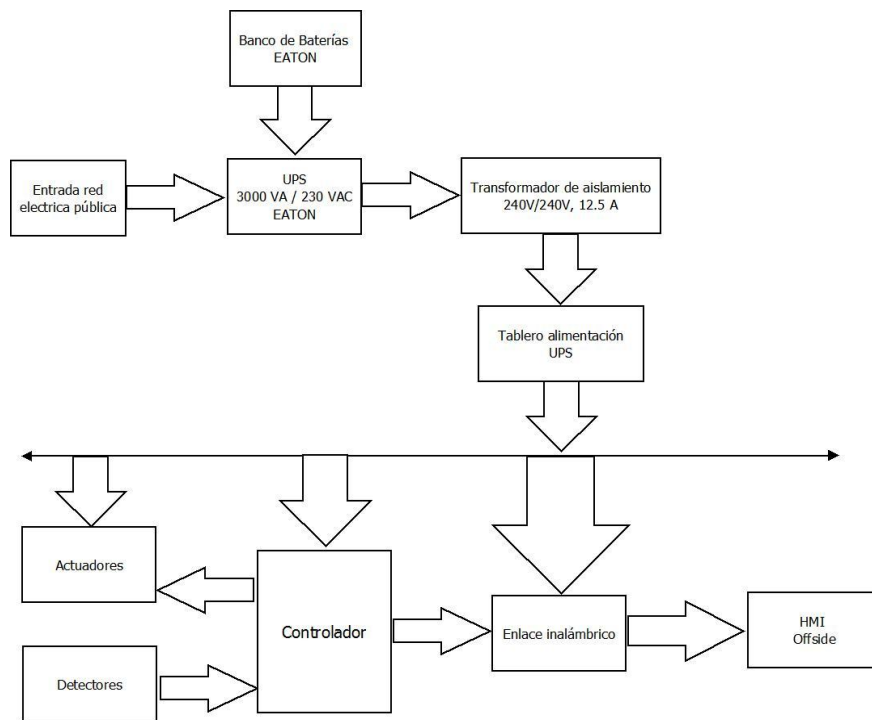


Figura 3.2. Diagrama de bloques del sistema F&G en general

El respaldo de energía del sistema se hace mediante un banco de baterías y una UPS la cual será la encargada de evitar fluctuaciones en la red eléctrica que dañen el equipo y de dar la alimentación a los circuitos en el cuarto de LPG, esto mediante la utilización de un transformador de aislamiento con derivación central de 240V en el primario y 240V en el secundario con 12.5 A.

Tal y como se aprecia en el diagrama se diseñó un enlace inalámbrico de tipo punto a punto; éste fue necesario establecerlo entre el “cuarto de LPG” y el “cuarto de operadores de Offside” donde se realiza la vigilancia remota por parte del personal de la información que se genera en las esferas. En él se tendrá la HMI, en este caso una pantalla táctil Panel View Plus 1000 de la familia Allen Bradley, el radio módem y su antena respectiva.

3.2 Antecedentes Bibliográficos

La información necesaria para desarrollar una solución viable al problema que se planteó en un principio fue obtenida con la ayuda de diversas fuentes de información entre las que se destacan:

- Normas y Estándares: son la base del diseño de la solución, uno de los requerimientos iniciales con los cuales surgió el proyecto, al tenerse varias restricciones en cuanto a uso de equipo y diseño.
- Ayuda por parte del asesor y personeros en la empresa: para adquirir una noción más amplia de los requerimientos, forma de operación de la planta y equipo con el que se cuenta en la empresa. Además manuales, diagramas eléctricos, contactos telefónicos, etc.
- Internet: Investigación del tipo de tecnología que fue opción para utilizarse durante el proceso de búsqueda hasta la elección que se detalla más adelante en el documento, conceptos teóricos de seguridad, químicos y mecánicos relacionados al proceso que se pretende controlar.
- Software y catálogos de diferentes fabricantes: Se utilizó tanto para el proceso de selección del que finalmente fue elegido como el equipo apto para resolver el problema de la empresa, así como para conocer formas de programación y funcionamiento de sus equipos.

3.3 Descripción de los principales conceptos de seguridad, químicos, físicos y electrónicos relacionados con la solución del problema

3.3.1 Clasificación de áreas [3] [4]

Mediante la utilización de la práctica recomendada NFPA 497 y el estudio de la IFSC para RECOPE, se realizó la clasificación de áreas peligrosas en el plantel. Además, se obtienen de ambos los siguientes detalles relacionados con el proyecto, considerados como los más importantes.

En general existen dos tipos de clasificaciones para los materiales combustibles, los Clase I, División y los Clase I, Zona. Los materiales combustibles Clase I División, se dividen en los grupos A, B, C y D. El propano (principal componente del LPG) es un material típico Clase I, Grupo D. En resumen el gas licuado de petróleo se clasifica como Clase I, División Grupo D. tipo I. Clase I Zona Grupo IIA. Temperatura de autoignición 405°C.

Un área Clase I, División I es un lugar en el cual una avería o funcionamiento defectuoso de los equipos o procesos podrían liberar concentraciones aptas para ignición de gases o vapores inflamables y podría causar fallas en los equipos eléctricos de tal manera que sean la causa directa de fuente de ignición. O cuando en esta se tiene presente, de forma común, una mezcla inflamable bajo condiciones normales.

Por otro lado se tiene que un área Clase I, División 2 es un lugar en el cual líquidos volátiles inflamables o gases inflamables son manejados, procesados o usados, pero en el que los líquidos, vapores o gases se encuentran normalmente confinados dentro de recipientes cerrados o sistemas cerrados de los que pueden escapar sólo en caso de rotura accidental o avería de los contenedores o sistemas, en caso de funcionamiento anormal del equipo. O un área en la cual la presencia de atmósfera inflamable es muy baja y, cuando tiene lugar, la duración de la misma es muy pequeña. En general va ligada a incidentes en la planta que obligarían a llevar a cabo acciones correctivas, lo que limita el tiempo de su permanencia.

En cuanto a las áreas donde se desarrolló el proyecto se tienen las siguientes zonas clasificadas.

- Clase I, División I: válvulas de entrada y salida de las esferas, con un radio de 2 m y la fosa que se utiliza como método de protección contra fugas, en las esferas y salchichas.
- Clase I, División II: Vista superior de la esfera, con un radio de 30 m. Zona extendida a lo largo de donde se encuentra instalada la esfera (centro de la esfera), con una longitud de 30 m a cada lado.

Cabe destacar como aspecto importante que el cuarto de control o “cuarto de las esferas” no se considera como un área clasificada; sin embargo, es importante usar, siempre que sea posible, equipo con alguna clasificación como medio de precaución. La lista de equipos permitidos por la clasificación de áreas a tomar en cuenta en este proyecto se muestra en los anexos.

3.3.2 Sistemas con nivel de seguridad intrínseca [5]

En todo proceso industrial se dan situaciones de peligro latente capaces de derivar en acontecimientos peligrosos de distinta magnitud. Un riesgo es la probabilidad de que dicho acontecimiento peligroso resulte en un accidente o incidente con daños y/o lesiones de diversa magnitud.

Algunas herramientas para evaluar las actividades de un proceso son los HAZOP y los HAZAN.⁴ Los HAZOP son utilizados para determinar las consecuencias de todas las posibles desviaciones de las condiciones operativas previstas como normales de un proceso. Los HAZAN analizan los peligros, para evaluarlos y finalmente cuantificarlos. Una vez identificados los peligros capaces de provocar un acontecimiento riesgoso, evaluados en su probabilidad de ocurrencia y en su potencial de causar daño (lesiones, muertes, destrucción y otras consecuencias), queda definido el nivel de riesgo global. El nivel de riesgo global posee 3 diferentes niveles y un cuarto considerado como especial.

A la par del riesgo global está el SIL, en otras palabras, el requerimiento mínimo de nivel de integridad segura exigible al sistema y/o plataformas de protección, para reducir los riesgos al apropiado nivel de seguridad. Los niveles del SIL van del 1 al 4, siendo 1 el mínimo y 4 el mayor (ver Tabla 3.1), por lo que un nivel de integridad de seguridad grado 2 permite menos fallos que uno nivel 1, en un período de tiempo fijado.

⁴ Ver glosario para los términos HAZOP y HAZAN.

Tabla 3.1 Cantidad de fallas permitidas por año según cada grado SIL

SIL	PFD
4	0.0001 a 0.00001
3	0.001 a 0.0001
2	0.01 a 0.001
1	0.1 a 0.01

Un SIS es considerada como la capa automática de protección compuesta por detectores, procesadores lógicos y elementos finales de control con el fin de llevar a un estado seguro ante condiciones anormales del proceso, en busca de la protección de personas, medio ambiente, equipo y producción.

El IEC 61508 “Functional Safety of Electrical/ Electronic/ Programmable Electronic Safety Related Systems” es una norma internacional que toma en cuenta: estándares internacionales, nacionales, Normas ANSI, NFPA, etc.; su establecimiento se dio con la idea de lograr seguridad y confiabilidad en sistemas eléctricos, electrónicos y electrónicos programables. Uno de los aspectos importantes en este caso es la exigencia de este estándar en cuanto, al uso de equipos electrónicos programables de diseño especial conocidos como PESC los cuales deben estar rigurosamente aprobados por alguno de los Institutos Internacionales de Aplicación (TÜVTechnischer Überwachungs-Verein y/o FM Global-Factory Mutual Global) como aptos para su aplicación en la protección de procesos con un nivel específico SIL requerido, quedando casi expresamente prohibido por la norma el uso del PLC para aplicaciones de cualquier nivel de seguridad intrínseca.

3.3.3 Principios de detección de gas [6]

Un detector de gas es, por su operación, un monitor químico que se basa fundamentalmente en la toma de una muestra de partículas que produce un cambio físico o químico en un material sensible, que mediante una circuitos de interfase, provoca una señal eléctrica que constituye la respuesta del detector.

Por las características que presentan tanto los detectores como las condiciones del área de almacenamiento de gas LPG de la refinería se consideraron los catalíticos y los infrarrojos como opciones en tecnología. Sin embargo, la selección final se declinó por infrarrojos entre otras razones por su inmunidad a envenenamientos y ser una buena alternativa para aplicaciones donde el detector debe ser continuamente expuesto a altas concentraciones de gas o donde es esperable que las concentraciones del gas excedan el rango combustible.

Los detectores infrarrojos pueden ser puntuales o de camino abierto, y se basan en la absorción de radiación infrarroja a ciertas longitudes de onda mientras pasan a través de un volumen de gas. Si un volumen de gas pasa entre la fuente y el detector, la cantidad de luz en la longitud de onda activa que cae sobre el detector se reduce, mientras que la cantidad de luz en la longitud de onda de referencia se mantiene. La concentración de gas se determina debido a la diferencia relativa entre las dos señales. En la figura 3.3 se muestra un diagrama de este principio de operación.

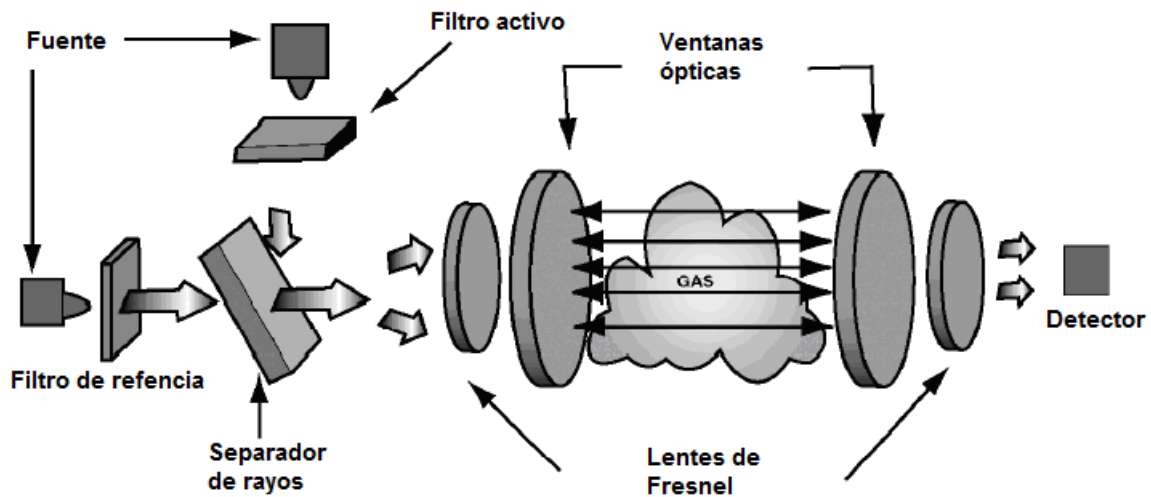


Figura 3.3. Esquema óptico de un detector de gas infrarrojo de General Monitors [6]⁵

Existe una longitud fija entre la fuente IR y el detector IR. Típicamente las longitudes son de unos pocos metros y el gas se asume como uniforme a lo largo de esta longitud. Al fijar la longitud del camino, el detector de gas infrarrojo puntual puede dar una medición directa de la concentración del gas en el porcentaje del LEL.

3.3.4 Principios de detección de fuego [7]

Las llamas poseen características inconfundibles que las diferencian entre sí aunque todas sean al final fuego, estas diferencias no son tan sencillas de definir, pero son precisamente estas diferencias las fundamentales para distinguir entre una llama y un fenómeno engañosamente parecido a la llama como lo son: superficies reflectantes, rayos de sol reflejados de forma intermitente, objetos relucientes, etc.

⁵ Los elementos marcados con [6] ha sido tomadas de: Hoja de especificaciones "Infrared point detector for hydrocarbon gas application", IR400, General Monitors, ver bibliografía.

Los seleccionados para la aplicación que se tiene son: los detectores de radiaciones, estos detectan precisamente las radiaciones IR o UV que acompañan a las llamas. Están compuestos por filtros ópticos, célula captadora y equipo electrónico. Al limitar los elementos perturbadores mediante filtros, reduciendo la sensibilidad de la célula captora y utilizando algoritmos retardadores de la alarma se evitan las falsas alarmas ante radiaciones de corta duración.

Tal como se muestra en la figura 3.4, el detector discrimina radiaciones UV/IR para realizar la detección de llama. Para ello emplea un fototubo sensible a radiación UV en combinación con un detector IR para realizar la detección más efectiva. Cuando la radiación de la llama llegue al cátodo de la placa en el tubo detector de UV, los electrones son expulsados del cátodo de la placa y acelerados hacia el ánodo cargado positivamente del tubo, con moléculas de un gas ionizable del cual esta lleno el tubo. De esta forma se emiten más electrones y se produce un estado de avalancha. Esta corriente momentánea (pulso) se repite a un ritmo proporcional a la intensidad de la radiación UV.

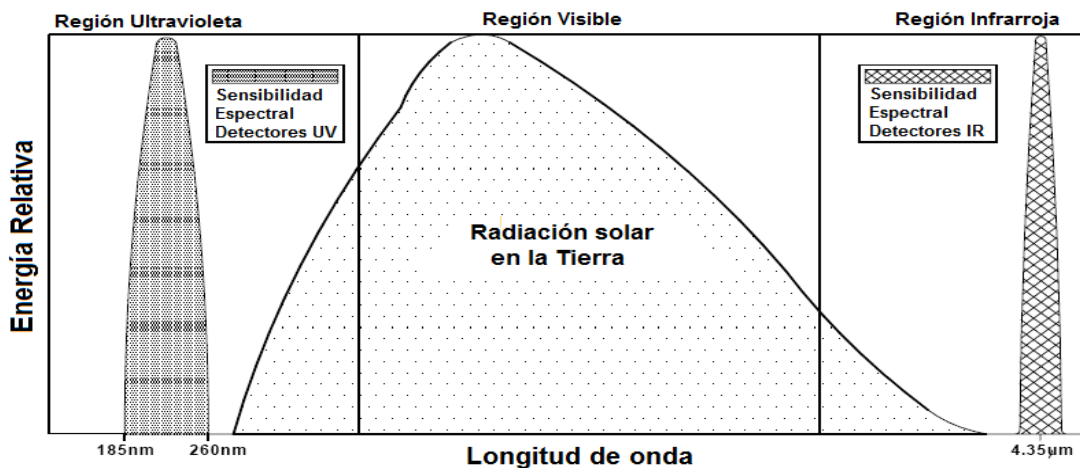


Figura 3.4. Respuesta espectral de los detectores UV/IR de General Monitors[7]⁶

⁶ Los elementos marcados con [7] han sido tomados de: Hoja de especificaciones "UV/IR and UV only Flame Detectors", FL3100, General Monitors, ver bibliografía.

Por su parte, el detector de infrarrojos responde a los cambios en la intensidad de la radiación IR detectando longitudes de onda específica de las llamas, éste es ayudado por un circuito de parpadeo con el cual se omite la activación de alarmas por fuentes constantes de infrarrojos como lo son por ejemplo cuerpo calientes, luz solar, arcos de soldadura, etc. Únicamente cuando cuando se presenten ambas condiciones (IR y UV) de forma correcta al mismo tiempo, se dará la activación de la alarma por presencia de llama.

3.3.5 Comunicación de datos serial RS-485 [8]

Constituye una mejora a la comunicación serial RS-422, entre otras cosas al permitir pasar de 10 dispositivos conectados a 32. Sirve para establecer comunicaciones seriales multipunto, half-duplex entre dispositivos. Estas comunicaciones poseen mayor inmunidad al ruido y mayor capacidad de distancia en cuanto a longitud de sus cables en comparación con la comunicación RS-232.

Utiliza únicamente dos cables para transportar la señal de comunicación que son representadas como RXD/TXD+ y RXD/TXD-, factor que hace que el ruido interfiera menos en la información al tener ambos cables la misma proporción de interferencia y realizarse una comparación entre las señales que viajan a través de ellos.

Para lograr la conexión de hasta 32 dispositivos se utilizan los llamados nodos mediante la conexión tipo “daisy chain”, como se muestra en la figura 3.5

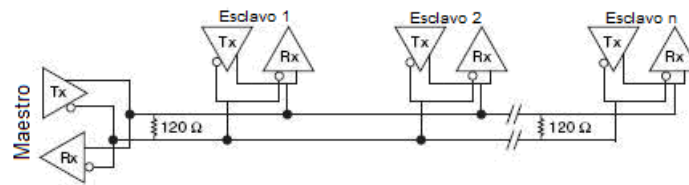


Figura 3.5. Conexión típica de nodos utilizada para la comunicación RS 485 ⁷

Tal como se muestra en la figura el par de cables utilizados en este tipo de comunicación serial utiliza una resistencia de 120 Ω entre ambos. Puede destacarse además que esta comunicación se caracteriza por ser asíncrona lo cual hace que no se requiera la transmisión de elementos de sincronía dentro de la información.

3.3.6 Protocolo Modbus [9]

Modbus es un protocolo de comunicación industrial ampliamente utilizado principalmente por ser de uso libre y tener sus publicaciones abiertas a cualquiera que desee utilizarlo. Puede utilizar diferentes interfaces de comunicación entre las que se encuentran: RS-232, RS-422, RS-485, fibra óptica, etc. Logra velocidades de transmisión que van desde los 75 baudios a 19,2 kbaudios con una distancia entre las estaciones que conforman la red de hasta 1200 metros sin repetidores.

Su lógica de funcionamiento establece que en esta comunicación sólo un dispositivo puede iniciar la comunicación (estación central), mientras que el o los esclavos responderán mediante el envío de los datos solicitados por el maestro, o bien, mediante la realización de la orden que el maestro les indique.

⁷ Tomado de: <http://digital.ni.com>

La orden del maestro a los esclavos puede darse utilizando los siguientes dos tipos de mensajes:

- Difundidos: el maestro da la indicación a todos los esclavos en la red sin que estos le envíen de vuelta una respuesta.
- Punto a punto: el maestro se comunica directamente con un esclavo de la red y este le responde.

Además, existen dos modos de transmisión en este protocolo (figura 3.6), como lo son:

- Modo ASCII: Se caracteriza por que la trama inicia con ":" (dos puntos), cada carácter ocupa 1 byte. Emplea la LRC para la detección de errores.
- Modo RTU o binario: Es una secuencia de unos y ceros en paquetes binarios de 8 bits. Usa para detectar errores la CRC, en esta técnica el mensaje es considerado como un número binario continuo (sin incluir los bits de inicio, parada ni paridad) y se realizan iteraciones sobre el contenido del mensaje. La información por tanto son 2 bytes, y el cálculo se realiza tanto en el transmisor como el receptor, se realiza una comparación para corroborar que la información sea correcta, en caso contrario se tendrá un error.

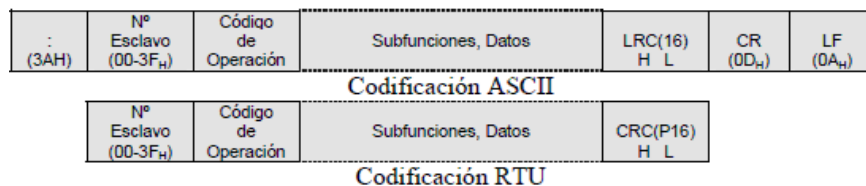


Figura 3.6. Tipos de codificación de los mensajes Modbus [9]⁸

⁸ Los elementos marcados con [9] han sido tomados de: Protocolo Modbus, Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Tecnología Electrónica, ver bibliografía.

El código de operación en la comunicación Modbus tiene un byte de extensión, y se encuentran separados en códigos de función y códigos de excepción. Durante el desarrollo del proyecto se utilizó la codificación RTU y únicamente los códigos de función 03 H y 06 H de lectura y escritura de palabras, respectivamente. En la siguiente tabla se muestran algunas funciones básicas del protocolo y sus códigos de operación.

Tabla 3.2 Funciones básicas y códigos de operación utilizados del protocolo Modbus [9]

Función	Código	Tarea
0	00 _H	Control de estaciones esclavas
1	01 _H	Lectura de n bits de salida o internos
2	02 _H	Lectura de n bits de entradas
3	03 _H	Lectura de n palabras de salidas o internos
4	04 _H	Lectura de n palabras de entradas
5	05 _H	Escritura de un bit
6	06 _H	Escritura de una palabra

3.3.7 Controladores Lógicos Programables [10]

Un controlador programable es un dispositivo compuesto en su estructura básica por una unidad central de procesamiento y unidades de entradas y salidas. Son utilizados para llevar a cabo la lógica, controlar máquinas y/o procesos a través de algoritmos almacenados en su interior mediante un programa. El control del cual se encargan estos dispositivos, se logra a través de realimentaciones eléctricas desde sus elementos de entrada y salida.

Las funciones de sus elementos de manera general son:

- CPU: es el encargado de procesar los datos de acuerdo a una lógica preestablecida y ejercer control sobre el flujo de información. Para esto el CPU cuenta con elementos internos como lo son: el sistema procesador, sistema de memoria y la fuente de poder.
- Unidades de E/S: su función general principal es el ser la interfaz entre las señales que se generan en el exterior (en el campo) y el CPU, así como la conversión de las señales que produce el CPU para ser aplicadas en el campo. Las unidades de E/S son la herramienta principal para realizar las lecturas que necesita el programa del CPU, así como para el envío de las señales que retorne el CPU como respuesta a las lecturas según su lógica programada.

Los PESC son la alternativa de controlador lógico programable para aplicaciones SIL, por poseer una arquitectura más robusta que le den una mayor disponibilidad y un menor PFD.

3.3.8 Relé electromagnético [11]

Un relé electromagnético puede definirse como un interruptor que es gobernado por un circuito eléctrico, que utiliza una bobina y un electroimán para realizar las funciones de cierre y/o apertura de el (los) contacto(s), y que vuelve a su estado de reposo cuando la fuerza de mando deja de actuar sobre él. En estos dispositivos, se pueden manejar varios contactos a la vez con la misma bobina, incluso con combinaciones de reposo abiertas o cerradas. (ver figura 3.7)

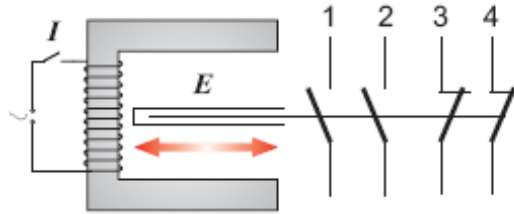


Figura 3.7 Diagrama de un relé⁹

Se compone de una bobina de alambre de cobre enrollado en un soporte de metal o núcleo magnético, éste será el circuito de control al cual se le inyectará la tensión, de forma que a través de la bobina pasará una corriente generadora de un campo magnético que provocará el efecto de atracción a los brazos de los contactos con que cuenta el relé. El núcleo magnético se compone de chapas laminadas y aisladas entre sí para el caso de operación en corriente alterna, o de acero macizo en caso de trabajar con corriente directa.

Se puede realizar una analogía entre un circuito eléctrico y un circuito magnético, las siguientes ecuaciones describen esa analogía.

$$F = \mathfrak{R} \cdot \Phi \quad (3.3.1)$$

$$V = R \cdot I \quad (3.3.2)$$

Donde:

F: fuerza magnetomotriz, [Amperios-vuelta]

\mathfrak{R} : reluctancia, [Amperios-vuelta por Weber]

Φ : flujo magnético, [Weber]

V: tensión, [V]

R: resistencia, [Ω]

I: corriente, [A]

⁹ Tomado de: Revista Vivatac Academina

3.3.9 Válvulas solenoides [12]

Son un tipo de válvula que se controla por la variación de la corriente que circula a través de un solenoide, el cual se ubica arrollado en un émbolo, en forma de bobina, dentro de la válvula. Al circular esta corriente por el solenoide, producirá la atracción del émbolo móvil gracias a la formación de un campo magnético.

En términos generales, estas válvulas al ser afectadas por la fuerza del campo magnético operan de manera totalmente cerrada o totalmente abierta. Una vez que se remueve el efecto del campo magnético que actúa sobre ellas, el émbolo vuelve a su estado de reposo ya sea por efecto de la gravedad, un resorte que algunas poseen o por la presión del fluido que se controla. En la figura 3.8 se muestra un esquema de este tipo de válvula.

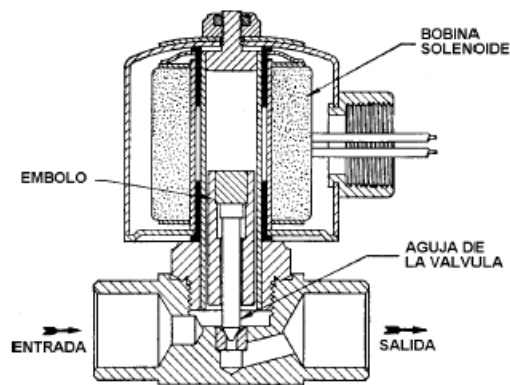


Figura 3.8 Válvula solenoide directa de dos vías [12]¹⁰

¹⁰ Los elementos marcados con [12] han sido tomados de: Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile, ver bibliografía.

La fuerza de origen magnético constituye el principio de operación de toda válvula solenoide y su origen se explica con la ley de Ámpere.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = i_{abrazada} \quad (3.3.3)$$

Donde:

H: intensidad del campo magnético producido por la corriente [Amperios-vuelta por metro].

d \vec{l} : elemento diferencial a lo largo de la trayectoria de integración [m]

i: corriente [A]

3.3.10 Enlaces de radio frecuencia [13]

Para un enlace de radio frecuencia se deben considerar las variables que pueden provocar pérdidas de potencia significativas, estas pérdidas se miden en decibeles (dB). En las comunicaciones inalámbricas existen pérdidas en el espacio libre, representadas muchas veces como “L”, la ecuación 3.3.4 muestra sus cálculos.

$$L = 32.4 + 20\log(D) + 20\log(f) \text{ [dB]} \quad (3.3.4)$$

Donde:

L: pérdidas en el aire.

D: distancia entre las dos estaciones, [Km].

f: frecuencia de operación del enlace, [GHz].

Los principales elementos de un enlace inalámbrico son: transmisor y receptor con sus respectivas antenas, conectores, guías de onda y cables. En la figura 3.9 se muestran elementos de un enlace inalámbrico.

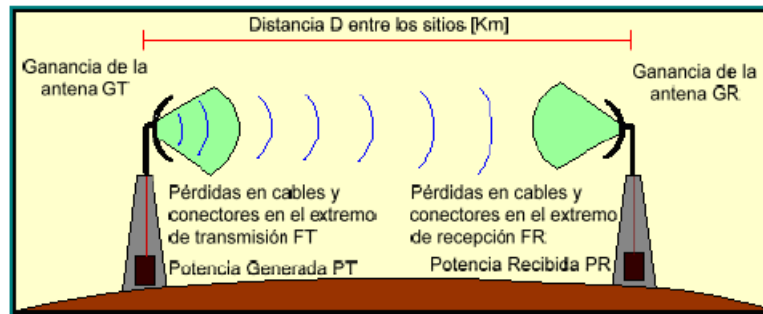


Figura 3.9 Elementos de un enlace inalámbrico [13]¹¹

Para calcular la potencia recibida se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_R = P_T + G_T + G_R - F_T - F_R - L \text{ [dBm]} \quad (3.3.5)$$

Donde:

PR: potencia de recepción [dBm]

PT: potencia de transmisión [dBm]

GT: ganancia antena de transmisión [dB]

GR: ganancia antena de recepción [dB]

FT: pérdidas en cables y conectores para la transmisión [dB]

FR: pérdidas en cables y conectores para la recepción [dB]

¹¹ Los elementos marcados con [13] han sido tomados de: Montenegro Solís, Fabián Ricardo. Tesis de Licenciatura, Cartago 2006, ver bibliografía.

Para evitar errores en los cálculos debido al índice de refracción, se utiliza el concepto de radio efectivo de la Tierra. Utilizando un factor de conversión k se define que tan grande es el radio hipotético de la Tierra respecto al radio real de la Tierra. [13].

Esta relación se expresa en la siguiente ecuación.

$$k = \frac{R}{a} \quad (3.3.6)$$

Donde:

R : es el radio hipotético de la Tierra (Km)

a : es el radio real de la Tierra (Km)

En Costa Rica se utiliza el valor de $k = 4/3$. La distancia máxima entre antenas se calcula de acuerdo a la ecuación 3.3.7.

$$d_T = 4.12(\sqrt{h_1 + h_2}) \quad (3.3.7)$$

Donde:

d_T : distancia máxima entre las antenas [Km]

h_1 : altura antena transmisión [m]

h_2 : altura antena recepción [m]

Se conoce como zonas de Fresnel a cada una de las áreas definidas por un radio que se produce debido al efecto de dispersión de las ondas, en el plano virtual perpendicular a la ruta entre el transmisor y el receptor (figura 3.10).

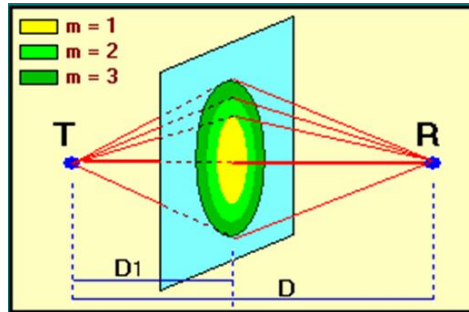


Figura 3.10 Representación de las zonas Fresnel [13]

Los radios de las zonas de Fresnel se calculan utilizando la ecuación 3.3.8.

$$r_m = \sqrt{m * \lambda * \frac{D_1(D - D_1)}{D}} \quad (3.3.8)$$

Donde:

$m = 1, 2, 3, \dots$

D: distancia entre el transmisor y el receptor [Km]

D1: distancia del transmisor al plano [Km]

λ : longitud de onda [m]

Las pérdidas por difracción se dan cuando existen obstáculos entre los puntos T y R, ver figura 3.10. En caso que no se tengan obstáculos entre ambos puntos la potencia se recibirá mediante una condición de espacio libre. Por otro lado, si la ruta entre lo puntos de la figura 3.10 está libre de obstrucciones u obstáculos dentro de alrededor del 67% del primer radio de zona Fresnel, las pérdidas por difracción en el receptor pueden ser ignoradas y considerarse como una ruta de espacio libre.

Capítulo IV: Procedimiento metodológico

En el presente capítulo se describen los procedimientos que fueron utilizados para llegar a la solución del problema inicial.

4.1 Reconocimiento y definición del problema

Con el fin de resolver el problema planteado se realizaron reuniones con los asesores tanto de la empresa como de la universidad, pues se tuvieron que redefinir en varios aspectos los requerimientos que se habían planteado al inicio, por situaciones económicas, entre otras.

Se realizaron además visitas a campo, entrevistas y comunicación con trabajadores que tienen algún tipo de relación con el área de almacenamiento de LPG. Como el personal taller de instrumentación de la empresa, para conocer más a fondo el problema, su estado y necesidad de solución.

Se accedió al criterio y recomendaciones de los señores Hernán Henry M., encargado del Departamento de Proceso de Refinación, y el Ing. Gabriel Castro Caballero, del Departamento de Salud, Ambiente y Seguridad. Algunos temas tratados con ellos son: la forma de operación y condiciones especiales del proceso en la refinería y el área específica de almacenamiento LPG, el sistema contra incendios existente, entre otros.

4.2 Obtención y análisis de información

Se realizó una búsqueda constante de contactos dentro de la empresa en Limón, por la gran cantidad de departamentos involucrados en el problema que se planteó en un inicio, cada uno de ellos con su respectivo aporte en cuanto a información. Se visitó un par de veces el plantel en El Alto de Ochozaco, para reuniones de orientación con los ingenieros de ese plantel como lo son Ing. Marcelo Flores Calderón y el Ing. Dennis Sánchez Fallas. Se utilizó Internet como la fuente principal de acceso a información; al igual que algunos libros; tesis e información de fabricantes, como complemento para los conocimientos necesarios.

4.3 Evaluación de alternativas y síntesis de una solución

Se verificó que se cumpliera con las normas básicas sugeridas en la empresa, se consultó constantemente con el asesor del proyecto Ing. Pablo Gutiérrez P. cuando se realizó algún tipo de selección o diseño que colaborara con la solución del problema. Algunos de los requerimientos tomados en cuenta fueron: la utilización de equipo certificado, en algunos casos equipo de fabricantes con las que la empresa y sus empleados están familiarizados o se posee una estructura formada para estos equipos, escalabilidad, etc.

La investigación para el diseño requerido fue realizada desde cero, por lo que fue necesario llevar a cabo un estudio de: las diferentes tecnologías de detección, ubicación, sistemas de seguridad con probabilidades de falla aceptables grado SIL2, configuraciones básicas, protocolos necesarios para las comunicaciones, equipo a seleccionar, disponibilidad para la empresa según el fabricante del dispositivo, etc. Una vez conocido y tomado en cuenta lo anterior, se procedió a diseñar más profundamente las diferentes etapas planteadas.

Capítulo V: Descripción detallada del planteamiento de la solución

El capítulo que se presenta a continuación se refiere a la descripción más detallada de las etapas diseñadas con el fin de dar solución al problema que se presentó al inicio del proyecto. Se muestran aquí: diagramas de bloques, diagramas de flujo, características de hardware y características de software.

5.1 Descripción del sistema

El plantel de Moín, cuenta con un área de almacenamiento de LPG en la cual existen previstas para conexiones vía cable hasta un cuarto de control llamado “cuarto LPG”, es en este lugar donde radica: la unidad lógica de control, los pre-actuadores, el equipo para enlace de radio, racks locales y sistema de respaldo de energía.

La figura 5.1 muestra los componentes principales que contempla el proyecto, entre las que se destacan:

- Esfera de almacenamiento: Con un radio aproximado de 10 m y una capacidad promedio de almacenamiento de 22 mil barriles de producto representa el elemento central por vigilar. Los elementos que se encuentran alrededor de cada esfera se consideran ubicados “en el campo”.
- Detectores: Constituyen el medio de adquisición de los datos en el campo, los cuales serán utilizados para realizar el control del proceso.
- Tubería de agua contra incendios: Instalada en RECOPE como parte del sistema contra incendios interno. Su fuente es el río Moín, ubicado en el interior de las instalaciones del plantel.

- Actuadores: Son los elementos encargados de activarse para dar respuesta, en caso de ser necesario. Se tienen: válvulas de diluvio, válvulas de corte, solenoides.
- Unidad de control: Representa el cerebro del proceso que se desea controlar, a esta ingresan las lecturas necesarias y envía las señales correspondientes de acuerdo a sus algoritmos internos. Mediante su utilización en conjunto con los detectores se logró tener el registro de los eventos principales que se den durante la vigilancia.
- Radio Módem: Es el encargado de transportar los datos necesarios para que sean conocidos remotamente en la estación de vigilancia de “Offside”.
- Cuarto de operadores de “Offside”: Es la localidad donde se tendrá la HMI del proceso. Aquí se podrá conocer el estado del sistema mediante la visualización por pantallas y tener además acceso a algunas funciones dependiendo del perfil de usuario.

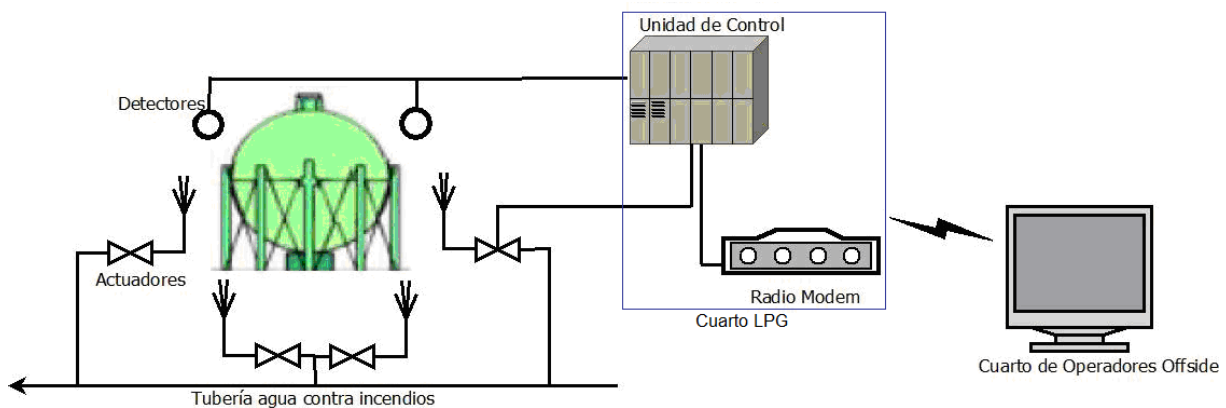


Figura 5.1 Diagrama general del proyecto

5.1.1 Datos

El sistema diseñado requiere del conocimiento de los siguientes datos: presión, nivel, temperatura, gas, llama. En la figura 5.2 se presenta un esquema de los datos en el sistema.

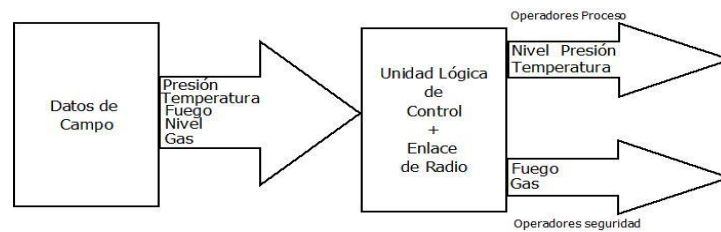


Figura 5.2. Naturaleza de los datos procesados

El sistema por ende debe ser capaz de recolectar estos datos desde el campo, almacenarlos en la unidad lógica de control y enviarlos mediante el enlace inalámbrico al cuarto donde serán visualizados.

5.1.2 Arquitectura del sistema

El sistema es capaz de responder tanto manual como automáticamente, mediante el uso de válvulas, relés, contactos, selectores, etc. Los mandos en los actuadores tienen una alternativa manual para el caso en que la alimentación del sistema en modo de operación automática falle; esto es necesario según la especificación, para aplicaciones SIL2 que utilicen controladores electrónicos programables de seguridad.

En caso que se presente alguna actividad anormal en el controlador, las salidas correspondientes pasan a modo seguro, que en nuestro caso es mantener las salidas como se encontraban antes de que se diera dicha situación.

5.1.3 Detecciones del sistema

El sistema detecta fallas de módulos y detectores principales en el campo (gas y llama). Además brinda advertencias de campo por: temperatura, gas o llama. Las alarmas por gas se presentan en caso de que exista una lectura de concentración de gas mayor o igual a 60%LEL en al menos dos detectores (como se estipula en la norma de la API 2510A). En el caso de la detección de presencia de llama, la alarma se presenta por la activación de alguno de los tres detectores para ese fin en la configuración de la esfera.

5.1.4 Reporte de eventos en el campo

Algunas características importantes del modo de operación de los detectores de gas y llama son accesadas para establecer la confiabilidad de sus alarmas y advertencias, así como para establecer rutinas de mantenimiento o realizar algún cambio en la configuración de los detectores. En el sistema, por lo tanto, se dispone de una red de comunicación Modbus que hace posible tener acceso a esa información especial.

5.1.5 Respuesta del sistema

El sistema reporta todas las lecturas realizadas en el campo, e informa mediante alarmas cualquier anomalía que se tenga. Las acciones correctivas del sistema serán: corte de gas en caso de darse una alarma por detección de gas y activación de las válvulas de diluvio del sistema contra incendio en el caso que se notifique por parte de los detectores respectivos.

5.2 Selección de dispositivos principales para solución

La selección del equipo, junto con el diseño que resolviera el problema inicial fue el siguiente paso. Las selecciones más importantes se detallan a continuación:

5.2.1 Selección detectores de gas y llama

Los aspectos que se consideraron, en orden de importancia, para otorgarle mayor posibilidad de elección a cada detector de gas son:

- 1- Operación a prueba de fallas.
- 2- Inmunidad a envenenamientos.
- 3- Grado SIL.
- 4- Capacidad de comunicación Modbus.
- 5- Certificaciones de UL y/o FM áreas clasificadas.
- 6- Adaptabilidad a la estructura básica con la que se cuenta en la empresa.

El primer y segundo de los aspectos anteriormente presentados pesaron mayormente en la determinación de los detectores tipo infrarrojos como la mejor opción, puesto que, en estos al no haber contacto directo de los sensores con el gas, permite que el envejecimiento sea menor en comparación con los catalíticos. Si bien cada uno de estos dos tipos de sensores tienen sus pros y sus contras, en un sistema de seguridad es necesario conocer el estado del sensor y que su operación correcta sea duradera el máximo tiempo posible, por lo que resulta importante en estas aplicaciones ampliar su vida útil, siendo el modelo IR-400 de General Monitors la opción compatible con estos requerimientos. El tercer aspecto fue importante para cumplir con la IEC-61508.

Además, el cuarto aspecto se utilizó debido a la necesidad de conocer ciertos parámetros de los sensores en el momento que se soliciten, parámetros que se obtienen utilizando la comunicación Modbus.

De igual forma para los detectores de llama, se determinó que la serie de detectores FL3100 son la mejor opción para utilizar, entre otras razones por:

- 1- Contar con certificaciones que respalden su confiabilidad. En conjunto con la inmunidad a falsas alarmas por el tipo de tecnología que utiliza para la determinación de presencia de llama.
- 2- Su nivel de seguridad intrínseco, SIL2-3.
- 3- Ser utilizados con anterioridad en la empresa y no haber presentado constantes fallas ni falsas alarmas durante su operación. Aunque no se tienen registros concretos de la operación de estos detectores, los trabajadores de la empresa con varios años de experiencia y que trabajan de manera constante con estos dispositivos en el plantel, así lo indicaron.
- 4- Poseer la característica de verificar automáticamente su estado cada minuto, tener un amplio campo de visión y ser compatibles con Modbus.

5.2.2 Selección del Controlador Programable de Seguridad

El controlador seleccionado para realizar las funciones lógicas de control que requiere el sistema, así como para controlar el sistema contra incendios que se tiene, es el ControlLogix de la familia Allen Bradley.

Los aspectos destacados para la selección de este tipo de controlador, según el estudio realizado, son:

- 1- Estar aprobado por el Instituto Internacional de Aplicación TÜV, norma IEC 61508, como PESC válido para aplicaciones SIL 2. El PLC-5 con que se cuenta en la empresa no cumple con los requerimientos de esta normativa, por lo que no es apto para aplicaciones de esta naturaleza según los estándares que esta normativa busca.
- 2- Contar con módulos compatibles, con capacidad de realizar las tareas necesarias del sistema (adquisición, procesamiento, control, comunicación, entre otras).
- 3- Su arquitectura es robusta para la detección de fallas.
- 4- Características de seguridad útiles para el tipo de aplicación. Soporta configuraciones especiales para elevar el grado de seguridad.
- 5- Ser Allen Bradley una marca conocida y utilizada por RECOPE en sus equipos. La empresa cuenta con una estructura basada en estos equipos (licencias, equipamiento, personal capacitado para trabajar con equipos de esta marca, etc.).

5.2.3 Selección del radio módem

La selección del radio módem se realizó tomando como base sus características, las cuales se adecuan a las condiciones inherentes al proyecto (por ejemplo: un ambiente propenso a interferencias). Entre sus características se pueden mencionar:

- 1- Uso de la técnica FHSS para la transmisión y recepción de datos, con capacidad de hasta 32 canales.
- 2- Capacidad de pruebas de diagnóstico locales y remotas, visualización de la fuerza de la señal.

- 3- Soporte del protocolo DF1 de Allen Bradley.
- 4- Certificado para áreas clasificadas Clase I, División 2.

5.3 Descripción del hardware

En este apartado se presenta una descripción detallada de los dispositivos y módulos físicos principales utilizados para llevar a cabo la solución del problema. La presentación se hará realizando la subdivisión en: medición, controlador, radio módem, comunicaciones y arquitectura de respuesta.

5.3.1 Medición de campo

Las mediciones de campo fueron realizadas a través de los detectores que se describen a continuación.

En la figura 5.3 se muestra el detector de gas modelo IR-400 de General Monitors, el cual fue elegido para realizar la detección de fugas de gas en el campo. Este detector utiliza el principio de detección por infrarrojos.

Ventajas: Operación “fail-to-safe”; apto para zonas Clase I, Div. 1 & 2, Grupos B, C & D; encerramiento NEMA 4X/IP66; indica obstrucción de sus elementos ópticos; apto para SIL2; utilizado en refinerías y procesos con LPG/LNG. Con su opción de “Dual MODBUS communications link” se pueden conectar hasta 8 detectores de manera sencilla a un multidetector modelo IR4000M. Tiene capacidad de: realizar pruebas, efectuar calibraciones, reportar fallas, dar alarmas, etc. Sus dos tipos de comunicación son la analógica 4-20mA y Modbus.

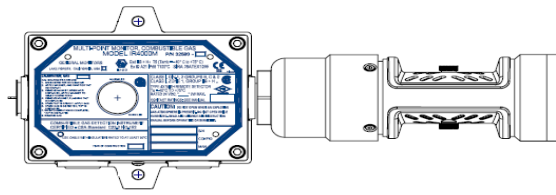


Figura 5.3 Detector de gas modelo IR-400 adherido a caja de unión de General Monitors [6]

Utilizan una caja de unión para realizar sus lecturas en el campo, las cuales pueden ser individuales utilizando el IR-4000S o con lecturas en conjunto de hasta 8 detectores con el IR-4000M. Con éste último se puede acceder a una serie de menús de lectura, configuración y calibración, mediante un switch magnético para operar en el campo. A través de su señal analógica se pueden conocer algunos de sus estados o reportes de campo, en la tabla 5.1 se muestran estos valores y sus significados.

Tabla 5.1 Valores y significado de la señal analógica para detectores IR-400 [6]

Nivel de corriente (mA)	Significado
0	Modo inicial y falla crítica (sin HART)
1.5	Modo cero, calibración y revisión de gas
2	Falla no crítica
4-20	0-100% LEL
20.1 – 21.7	Fuera de rango

Los detectores de llama seleccionados fueron los del modelo FL3100H de General Monitors (figura 5.4), los cuales, utilizan un principio de detección de radiación UV/IR. Entre sus ventajas se destacan: encerramiento NEMA4X/IP66, posee puerto RS-485 para Modbus, apto para actividades SIL 3, cuenta con lámpara para pruebas, monitorea el camino óptico cada minuto, es usado en almacenamiento de gas LPG y refinerías, etc. Certificado para ser utilizado en zonas clasificadas como: Clase I, Div. 1 y 2, Grupos B, C & D.



Figura 5.4 Detector de llama modelo FL3100H de General Monitors [7]

Mediante su señal analógica se pueden conocer algunos de sus estados o reportes de campo, en su hoja de especificaciones pueden consultarse sus niveles y significados.

Basándose en el criterio de la API Publ 2510A, en su apartado 5.5.4, fue importante determinar para los detectores de fuego que al utilizar una sensibilidad de 100%, se tienen algunos campos de visión según diferentes ángulos (reportados en las hojas del fabricante). Se aprecia que la curva respectiva al ángulo $\pm 60^\circ$ no es constante hasta alcanzar los 15,24 m (50 pies), por lo que se hace referencia a $\pm 45^\circ$ como el parámetro de seguridad con el grado de certeza necesario en una aplicación como la del proyecto. Bajo este ángulo de visión ($\pm 45^\circ$) se realizaron las observaciones y cálculos necesarios, utilizando algunas ecuaciones matemáticas y relaciones trigonométricas, y en conjunto con el reporte del fabricante se obtuvieron los datos de la tabla 5.2. Los apartados de distancia perpendicular y lateral máxima fueron calculados en conjunto para cada orientación.

Tabla 5.2 Distancias confiables del detector FL3100 con sensibilidad 100% para la aplicación

Orientación	Distancia máxima directa (m)	Distancia Perpendicular Máxima-Eje Y (m)	Distancia Lateral Máxima-Eje X (m)	Relación de Ganancia (m)
Horizontal ($\pm 45^\circ$)	15.2	10.8	10.8	$g = 2d$
Vertical ($\pm 45^\circ$)	15.2	10.8	10.8	$g = 2d$

De las curvas de sensibilidad y los campos de visión de los detectores FL3100H, se puede observar que la sensibilidad horizontal de 50% no se mantiene dentro de un rango confiable conocido sin antes llegar a los 0° , por lo que se utilizó el ángulo de apertura mínimo no nulo, así se realizaron cálculos para $\pm 15^\circ$. Mientras que verticalmente este ángulo es de $\pm 30^\circ$. La tabla 5.3 resume estos casos, donde los apartados de distancia perpendicular y lateral máxima fueron calculados en conjunto para cada orientación.

Tabla 5.3 Distancias confiables del detector FL3100 con sensibilidad 50% para la aplicación

Orientación	Distancia máxima directa (m)	Distancia Perpendicular Máxima-Eje Y (m)	Distancia Lateral Máxima-Eje X (m)	Relación de Ganancia (m)
Horizontal ($\pm 15^\circ$)	4.6	4.4	1.2	$g = 0.27d$
Vertical ($\pm 30^\circ$)	7.6	3.8	6.6	$g = 0.577d$

5.3.2 Control del sistema F&G

En la Figura 5.5, se presenta un diagrama general de las etapas del sistema F&G diseñado, con los elementos a utilizarse, basada en la configuración “fail safe” de una aplicación SIL2 que utiliza ControlLogix como PESC.

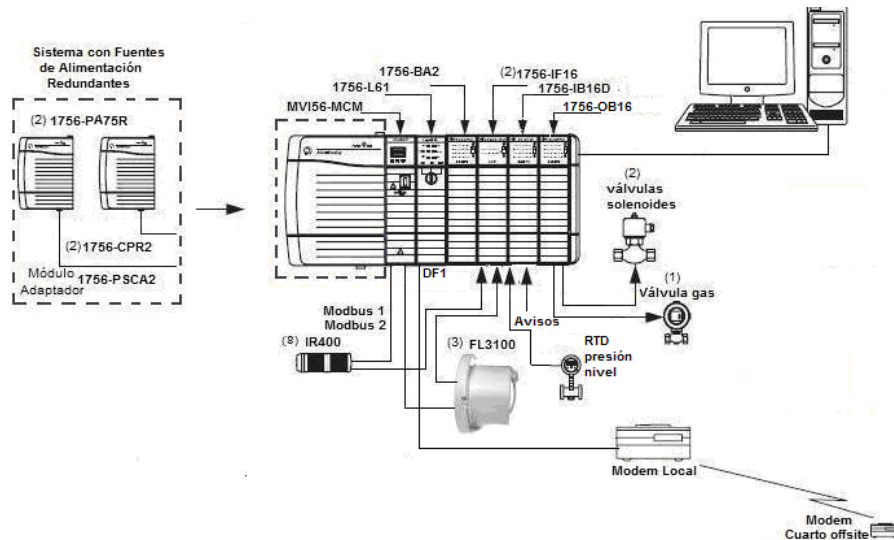


Figura 5.5 Diagrama general con módulos de etapas de lectura, control y comunicación propuesto

A continuación se muestran los módulos necesarios para realizar la labor de lectura y respuesta del sistema utilizando la familia de controladores ControlLogix de Allen Bradley, estos son:

1. (2) Módulos de 16 entradas analógicas marca Allen Bradley, 1756-IF16.
2. (1) Módulo de 16 entradas digitales marca Allen Bradley, 1756-IB16D.
3. (1) Módulo Modbus con dos puertos de comunicación Modbus, marca Prosoft, MVI56-MCM.
4. (1) Módulo de 16 salidas digitales de diagnóstico, marca Allen Bradley, 1756-OB16D
5. (1) Módulo CPU ControlLogix con capacidad de memoria 2 MB, marca Allen Bradley, 1756-L61.

6. (1) Módulo batería Litio para memoria, marca Allen Bradley, 1756-BA2.
7. (1) Chasis familia ControlLogix de 17 ranuras para probables expansiones marca Allen Bradley, 1756-A17, serie B.
8. (10) Cubre Ranuras, marca Allen Bradley, 1756-N2.
9. (2) Fuentes de poder para redundancia de 120/220 VAC, marca Allen Bradley, 1756-PA75R.
10. (2) Cables para alimentación en redundancia, marca Allen Bradley, 1756-CPR2.
11. (1) Modulo adaptador de fuentes de poder, marca Allen Bradley, 1756-P2CA2.

Las razones técnicas por las que se eligió el controlador de la familia ControlLogix de Allen Bradley fueron, entre otras: su capacidad para interconectar los módulos de entrada y salida correspondientes, soportar la adición de módulos para diferentes comunicaciones, tener puertos RS-232 con soporte del protocolo DF1 de Allen Bradley utilizado para el radio módem y el transporte de datos con que cuenta la aplicación, etc. En nuestro caso el módulo Modbus MVI56-MCM de Prosoft Inc. se utilizó, entre otras razones, al ser esta “company partner” de Allen Bradley.

Los módulos de 16 entradas analógicas, 1756-IF16, son los encargados de tomar los valores generados en el campo y traducirlos para el desarrollo de la lógica del controlador. Fueron necesarios dos módulos de este tipo pues, se tiene un total de 16 entradas en cada uno y la aplicación en una esfera con su fosa requerirá de 20 detectores en operación, para cumplir con la recolección de los datos explicada anteriormente, así como con las redundancias del caso. Cada canal soporta varios rangos de entrada, entre ellas de 0 a 21 mA que fue de nuestro interés particular y tiene una resolución de 16 bits, otorgando una sensibilidad de $0.34\mu\text{A/bit}$.

El módulo de 16 entradas digitales, 1756-IB16D, fue utilizado para saber varios aspectos en la detección que se utiliza en la esfera, tanto la forma de operación de las subetapas del sistema y estado de los actuadores. Se necesitan para este propósito 12 entradas por esfera, más 2 adicionales para ver el estado de fuentes de poder. Poseen una categoría de tensión de 12/24 VDC y un rango de operación de 10-30 VDC.

El módulo de 16 salidas digitales, 1756-OB16D, es el que se encarga de dar las señales para activar los actuadores en caso de que la operación se establezca en automática para: refrigeración, incendios y corte de gas. Por aspectos de redundancia son necesarias 12 salidas digitales, que se encargarán de ejecutar las acciones de respuesta automática del sistema para la esfera. Poseen una categoría de tensión de 12/24 VDC y un rango de operación de 10-30 VDC.

El módulo de batería Litio para memoria, 1756-BA2, es utilizado para proteger el programa y datos guardados en la memoria del controlador, ante discontinuidades en la alimentación. Esta alternativa fue seleccionada ante la no certificación de las memorias no volátiles, CompactFlash que ofrece Allen Bradley, en aplicaciones grado SIL2. El chasis y los cubre ranuras fueron seleccionados con miras a una ampliación del proyecto a futuro, o si se le dieran usos adicionales al controlador y su estructura.

Los apartados 9, 10 y 11 son necesarios para la alimentación redundante con que el sistema cuenta, donde se tienen dos fuentes de alimentación operando. En estado óptimo cada fuente asume la mitad de los requerimientos de la carga, éstas serán utilizadas con alimentación 120VAC. Su estado de operación es revisado en todo momento mediante el módulo de entradas digitales haciendo uso de los relés de estas fuentes.

La selección de la capacidad de memoria del CPU del controlador se realizó basándose en la especificación dada por el fabricante, mediante la tabla llamada “Controller Memory Use”, en la cual se obtiene un estimado de la memoria que se utiliza en el controlador según las características y módulos que se utilicen. La misma fue usada para realizar los cálculos, según el programa y módulos que se utilizaron. En el caso de una esfera se utilizaron: 4 tareas, un módulo de salidas digitales, un módulo de entradas digitales, dos módulos de entradas analógicas y un módulo de comunicación Modbus, esto según el fabricante, resulta en un estimado de:

$$(4 * 4000) + (2 * 400) + (2 * 2600) + (1 * 2000) = 24000 \text{ bytes}$$

Se utilizan aproximadamente **24 kB**. De esta forma, la elección del controlador ControlLogix, 1756-L61, con capacidad de memoria de **2MB** (menor capacidad disponible) es la que más se adecua a esta aplicación. Se tiene así el espacio suficiente en caso de que se le quieran introducir nuevas funciones o expandir las que se tienen en el controlador, haciendo uso de los espacios para módulos y/o las ranuras disponibles.

5.3.3 Radio Módem

El radio módem seleccionado es el modelo RLX-IFH9S de Prosoft Inc., el cual se muestra en la figura 5.6. En esta figura se aprecian los puertos del radio RLX-IFH9S, donde además se muestra la toma para la alimentación de 10 a 24 VDC en la que se conecta la batería de 120VAC/24VDC marca Siemens con que cuenta actualmente la empresa. Cuenta además con dos puertos seriales DB9, el RS485 y RS232; el switch de TERM no es importante para nuestra aplicación, tampoco el puerto para RS422.



Figura 5.6 Radio RLX-IFH9S de Prosoft Inc. seleccionado para la aplicación ¹²[15]

El puerto RS232 se utiliza en nuestro caso, con una conexión sin handshaking mediante cable directo, en la figura 5.7 se muestra la conexión del mismo al ControlLogix. La comunicación se realiza haciendo uso del protocolo DF1.

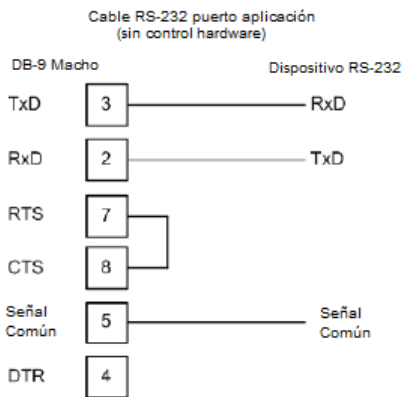


Figura 5.7 Conexión del DB-9 en el radio y el dispositivo al que se conecta [15]

¹² Los elementos marcados con [15] han sido tomadas de el sitio Web: www.prosoft-technology.com, ver bibliografía.

Este equipo de comunicación posee una frecuencia de operación de 902-928 MHz, con un alcance reportado por el fabricante de hasta 48 Km en línea vista. Posee sensibilidades de -108 dBm, para una tasa de transferencia de datos de 172 kbps; y -116 dBm, para una tasa de transferencia de datos de 19.2 kbps. En este caso el enlace es realizado en una trayectoria libre de obstáculos, para una distancia total a cubrir de 1 Km por lo que se afirma que el enlace es totalmente factible sin problemas. Esto se corrobora usando la ecuación 3.3.7 pues al tener dos antenas instaladas a 6.1 m, se obtiene una distancia máxima de separación entre ellas de 20.3 Km.

Se tienen disponibles dos opciones de ganancia de antenas 6 dB o 15 dB, y un rango de potencia de salida de 20 dBm a 30 dBm (100 mW a 1 W). Se consideró la utilización de 4 metros de cable RG-58, el cual a 0.9 GHz (frecuencia del enlace diseñado) tiene pérdidas de 1.056 dB por cada metro. Por lo que, considerando estos datos y utilizando la ecuación 3.3.5 del capítulo 3, se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 5.4 para determinar la factibilidad de este enlace.

Tabla 5.4 Determinación de la posibilidad de realizar el enlace según potencia de salida, ganancias y pérdidas (ec. 3.3.5)

Potencia transmisión (mW)	Potencia transmisión (dBm)	Ganancia antena transmisión (dB)	Ganancia antena recepción (dB)	Potencia recepción (dBm)	Tasa transferencia (kbps)	¿Enlace factible?
100	20	6	6	-7.93	19.2	Sí
100	20	6	15	1.07	19.2	Sí
100	20	15	15	10.07	19.2	Sí
1000	30	6	6	2.07	19.2	Sí
1000	30	6	15	11.07	19.2	Sí
1000	30	15	15	20.07	19.2	Sí

La antena utilizada es la direccional, Yagi de 6 dB de ganancia y polarización lineal, a continuación se muestra un esquema de la misma.

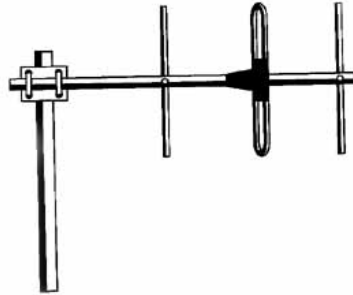


Figura 5.8 Antena direccional usada en ambos puntos del enlace

5.3.4 Comunicaciones

El módulo MVI56-MCM de Prosoft Technology Inc. fue seleccionado para la comunicación Modbus, para ser el Maestro en la topología Maestro/Esclavo de la comunicación Modbus RTU utilizada, en la figura 5.9 se muestra este módulo.

Prosoft Technology desarrolló este módulo para la familia de controladores ControlLogix de Allen Bradley/Rockwell Automation. Posee dos puertos para aplicaciones, los cuales son utilizados para realizar la conexión y comunicación de los esclavos. Los detectores de gas utilizan el puerto aplicación 1, y los detectores de llama el puerto aplicación 2.



Figura 5.9 Módulo MVI56-MCM de Prosoft utilizado para la comunicación Modbus¹³ [16]

Con el fin de realizar las conexiones Modbus mediante este módulo, se debe establecer la configuración física, posicionando algunos jumpers en el PRT2 y PRT3, puertos de aplicación 1 y 2 respectivamente, figura 5.10. Estos se ubican en su parte inferior y se usan para trabajar con las interfaces RS-485 con que cuentan los detectores de gas y llama.

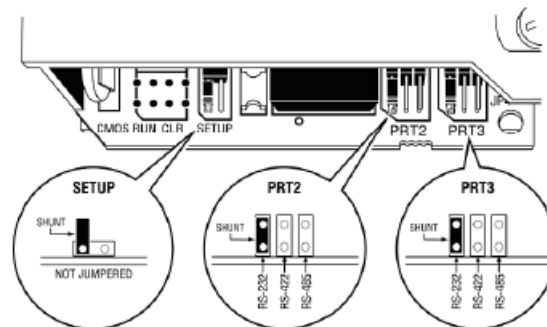


Figura 5.10 Estado de los jumpers para las interfaces de comunicación a utilizar [16]

¹³ Los elementos marcados con [16] fueron tomados de la hoja de especificaciones del módulo MVI56-MCM, Prosoft Inc, ver bibliografía.

La conexión entre los dispositivos y los puertos de aplicación se da, una vez establecidos todos los dispositivos que conforman la red Modbus para cada puerto de aplicación, utilizando cable de par trenzado RS-SF1-PVC, esta conexión se muestra en la figura 5.11.

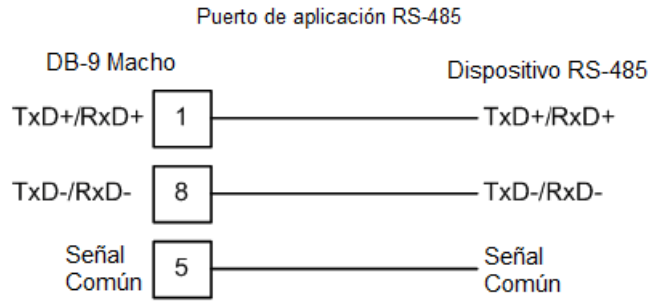


Figura 5.11 Conexión de cables al puerto de aplicación para RS-485 [16]

En la figura 5.12 se aprecia la conexión de la red Modbus de los detectores de gas hacia el puerto de aplicación PRT2, la cual se realiza del detector # 10 hasta el detector #1, mediante la conexión daisy chain (figura 3.5) para lograr la integración de los 8 detectores de la esfera mediante el IR4000M y los 2 detectores de su fosa. De esta forma se comunican con el cuarto de control donde se ubica el módulo Modbus MVI56-MCM.

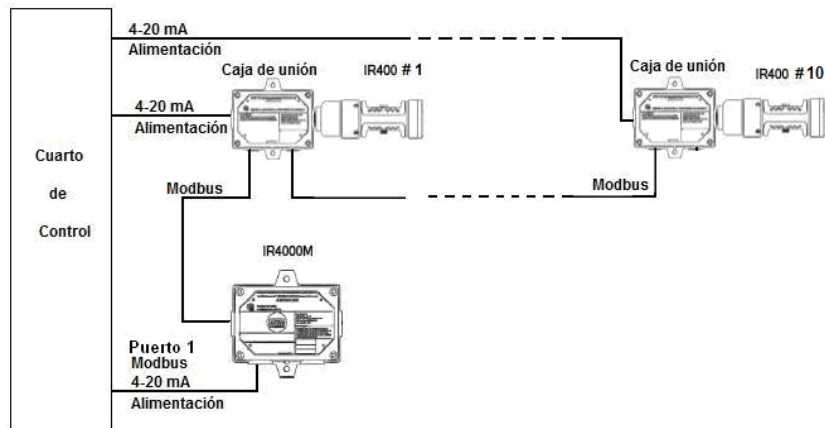


Figura 5.12 Conexión detectores de gas al cuarto de control

Las terminales Host llamados Mod - y Mod+ del IR4000M se conectan a los terminales Mod+ y Mod- de cada dispositivo, y los terminales TB2 llamados Mod+ y Mod- se conectan con el puerto aplicación #1 (PRT2) del módulo Modbus. Las direcciones de los 8 detectores van de la 10 a la 17, programadas vía el menú magnético del IR4000M, los detectores de la fosa tienen las direcciones 1 y 2.

En la Figura 5.13 se observan los dispositivos que serán conectados al puerto de aplicación #2, conformado por tres detectores de llama; configuración daisy-chain.

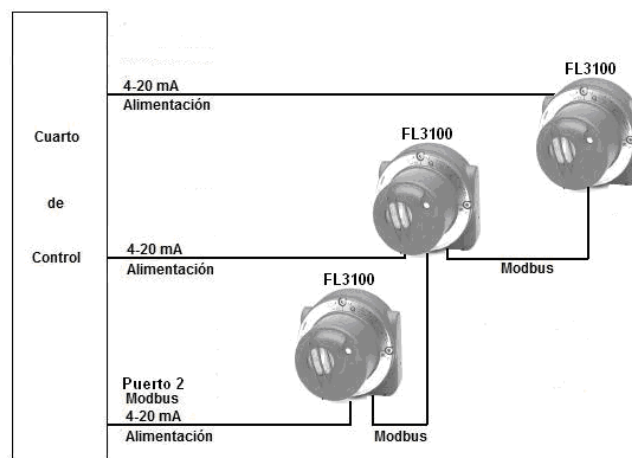


Figura 5.13 Conexión detectores de llama al cuarto de control

Con el fin de alcanzar el nivel SIL2, para los detectores tanto de llama como de gas, fue utilizada su salida analógica 4-20 mA en el lazo de seguridad, conectada al módulo de entradas analógicas, 1756-IF16. De igual forma los transmisores de presión, temperatura y nivel de almacenamiento.

5.3.5 Arquitectura de respuesta

Los circuitos del sistema diseñado para poder dar respuesta ante una situación que así lo amerite, ya sea manual o automáticamente, se encargarán, en conjunto con las salidas dadas por el controlador, de enviar las señales respectivas hasta el campo y la estación de vigilancia de “Offside”. Para ello fue necesario establecer la conexión de cada uno de los elementos del sistema. A continuación se muestran y se da una descripción de estos.

En cuanto a la alimentación del sistema se hizo uso de la alimentación del transformador de aislamiento utilizado en la etapa de energía mencionada anteriormente, de ésta se sirvió para realizar la conexión de los módulos 1756-PA75R, además de la conexión de la batería marca Siemens 120VAC/24VDC con la que se alimenta el módem seleccionado. En la figura 5.14 se muestra el diagrama de esas conexiones.

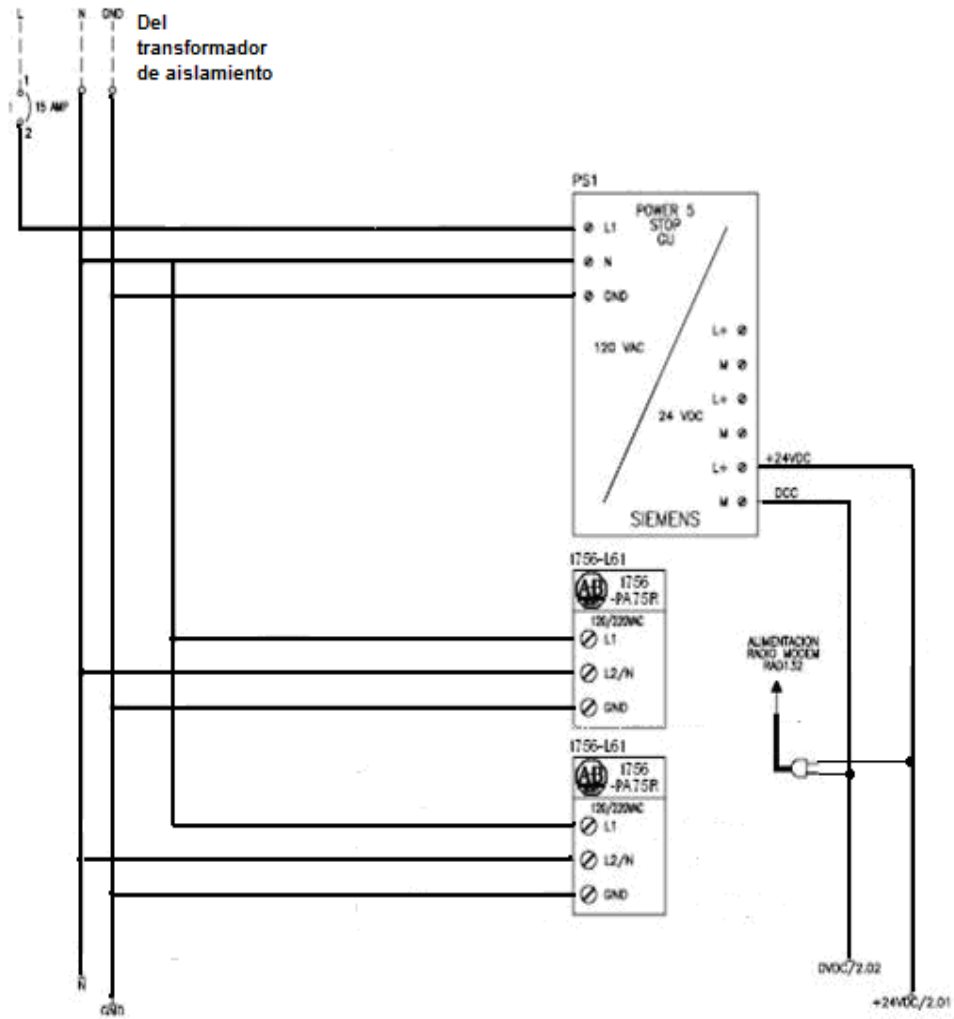


Figura 5.14 Conexión de las fuentes alimentación desde la toma del transformador de aislamiento

En la figura 5.15 se muestra el diagrama del circuito para la prueba de luces piloto.

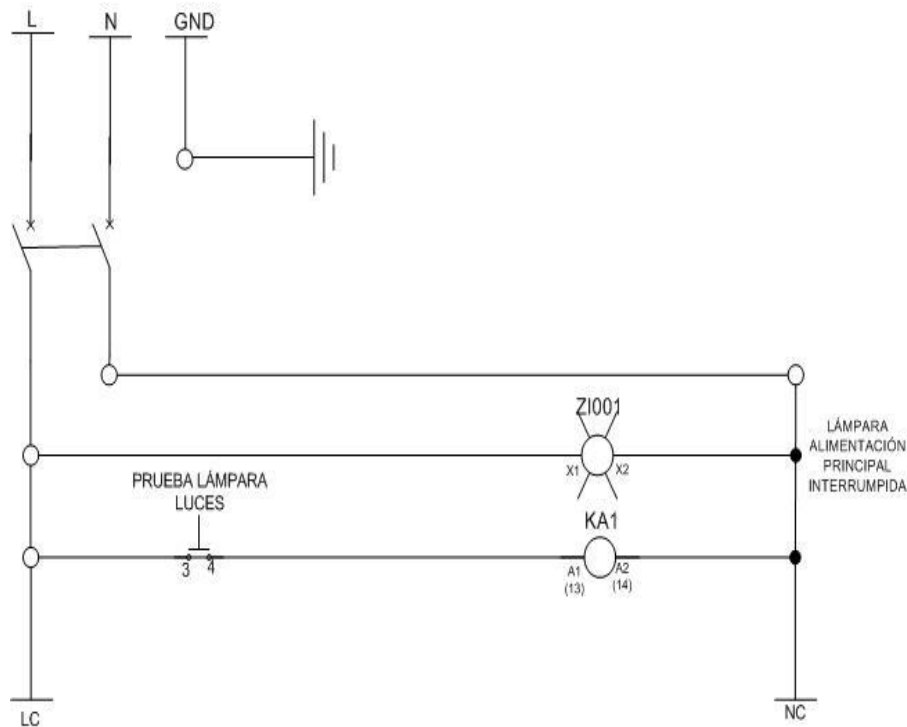


Figura 5.15 Prueba de luces piloto del rack local e indicación estado de alimentación principal

En la figura 5.16 se muestra el circuito de selección de modo para: la refrigeración, operación contra incendios y corte de gas. Se muestra además los circuitos que servirán de mando para las válvulas respectivas en la activación de las diferentes respuestas del sistema.

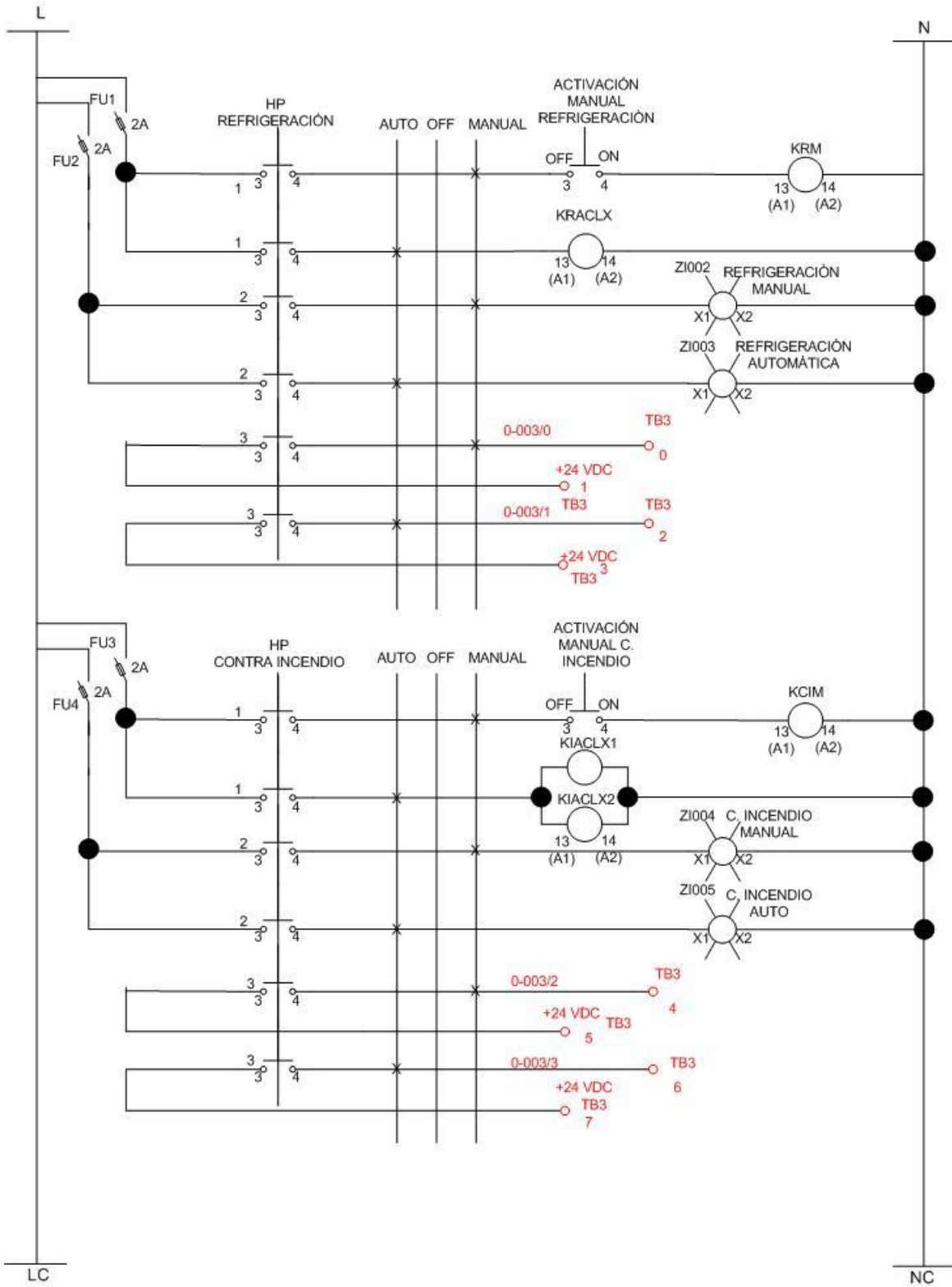
Los selectores de seguridad de la marca Cooper Crouse Hinds de tres estados y tres polos representados como HP REFRIGERACIÓN, HP CONTRA INCENDIO y HP CORTE GAS son los encargados de determinar el modo de operación con que rige el sistema en estas tres acciones. El primer polo es utilizado para determinar como opera el actuador, el segundo polo es utilizado para activación de las luces piloto y el tercer polo es utilizado con el módulo de entradas digitales para comunicar al controlador cual es el modo de operación que se tiene.

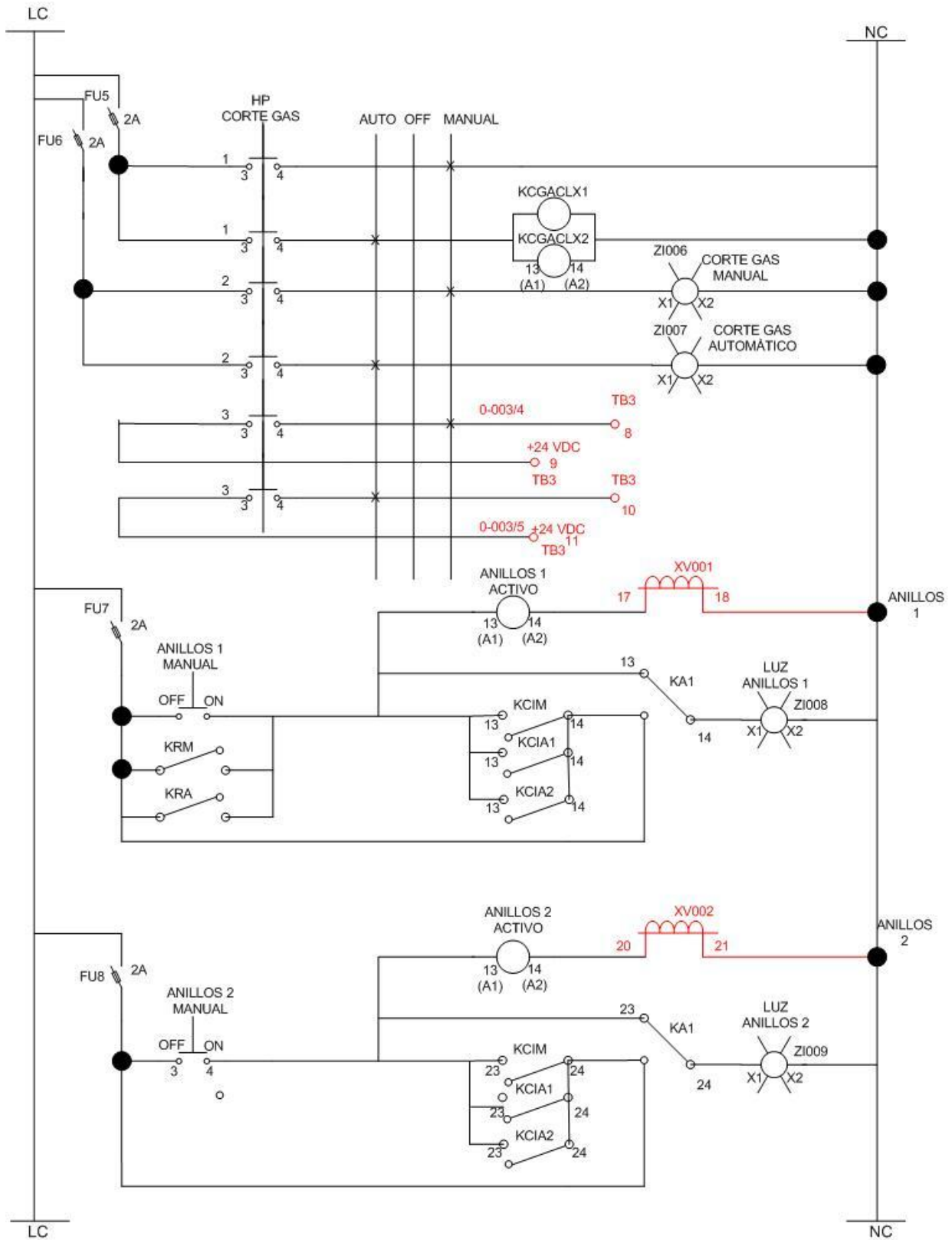
La bobina del relé KRM es alimentada con 120VAC para que sus contactos cierren y se alimente de esta forma el respectivo actuador de refrigeración. Mientras que la bobina del relé KRACLX se alimentará cuando se elija la opción automática para refrigeración, y cerrará sus contactos de modo que el controlador defina en su lógica cuando su salida alimentará la bobina del relé CR-RA. Para el caso de la acción automática contra incendio y corte de gas, se tienen relés con redundancia, como lo son KIACLX1, KIACLX2, KCGACLX1 y KCGACLX2, para que en caso de ser necesario, los actuadores obtengan su señal y el sistema dé la respuesta debida a las situaciones de fuego o presencia de gas que se tengan.

Los actuadores tienen su alimentación manual individual, tal como es requerido para una aplicación SIL2 como la que se controla, para esto son utilizados los interruptores: ANILLOS 1 MANUAL, ANILLOS 2 MANUAL, COLUMNAS MANUAL, LANZAAGUAS 1 MANUAL, LANZAAGUAS 2 MANUAL, CORTEGAS MANUAL. Al activarse cada uno de los actuadores, ya sea automática o manualmente, se encenderá su luz piloto mostrando el estado encendido.

Los actuadores finales denotados como "XV#", se encuentran en el campo y son las válvulas solenoides que serán alimentadas, para que se produzca el campo magnético que controle el émbolo y de esta forma se libere la presión respectiva produciendo la activación de las válvulas de diluvio. En el caso del corte de gas representa la bobina encargada de activar la válvula utilizada en el campo para esta función.

Por su parte, en la figura 5.17 se aprecian los contactos que activa el controlador para alimentar las bobinas ubicadas antes del actuador, en caso de que las detecciones se realicen de forma automática. También se muestran las conexiones de alarma que se activarán en caso que sea necesario por situaciones anómalas en el sistema F&G.





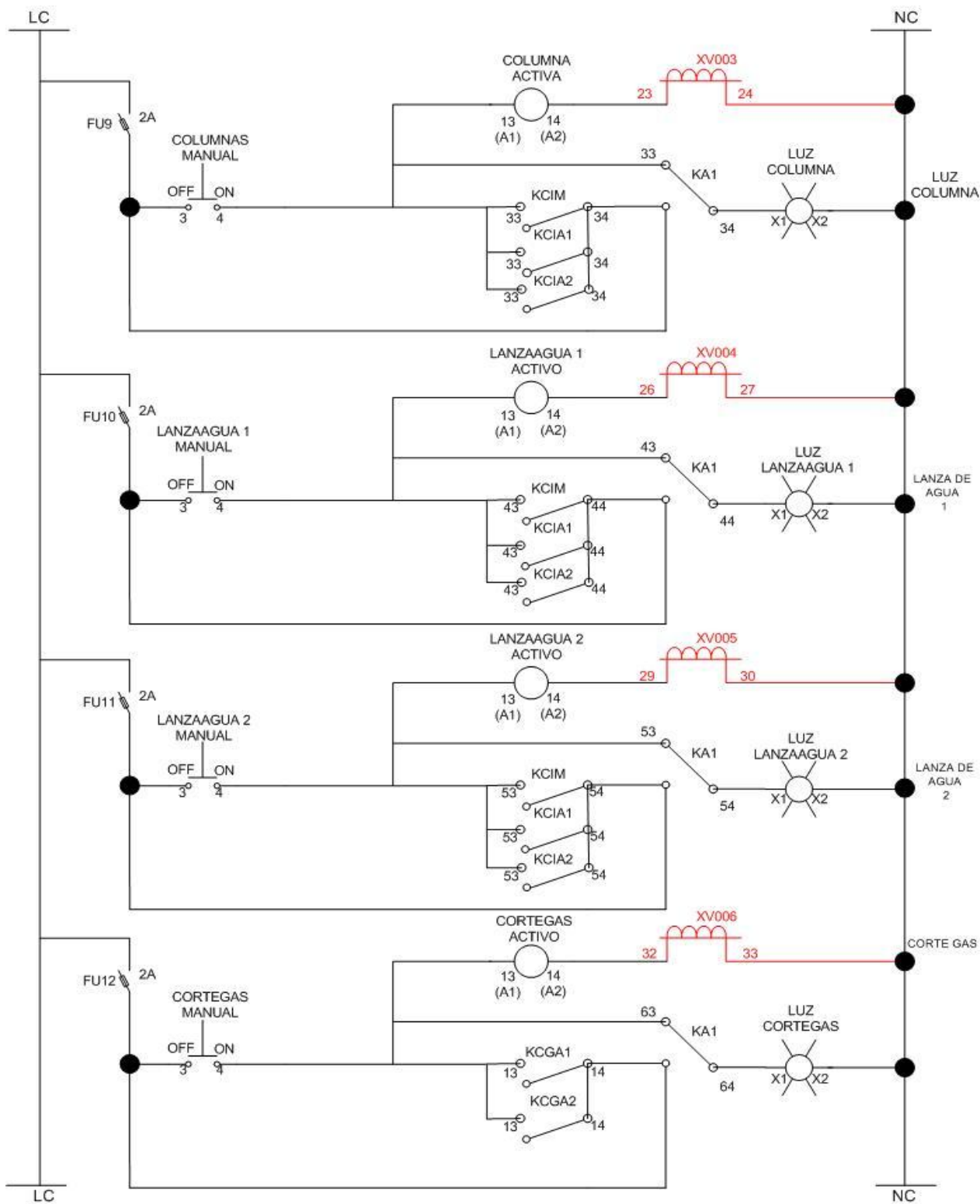


Figura 5.16 Conexiones de selección de modo y activación de actuadores

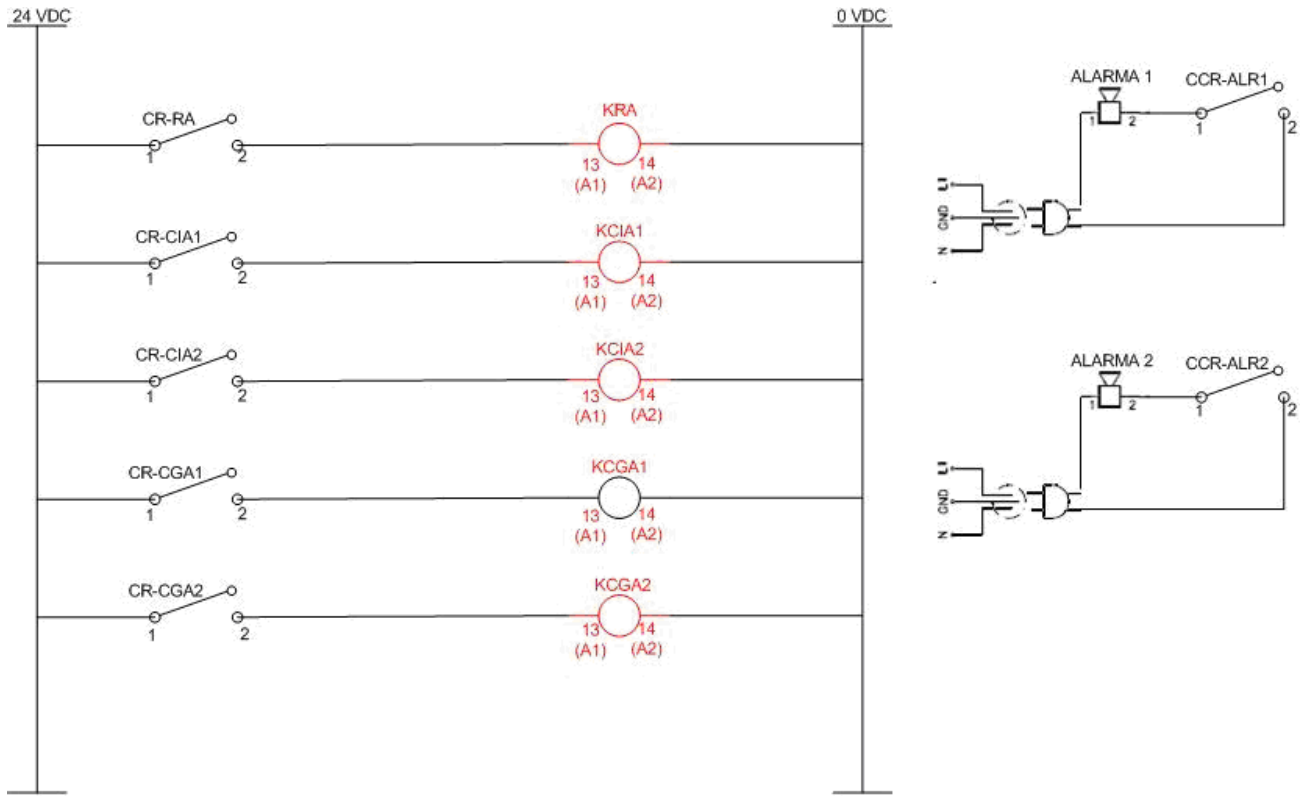


Figura 5.17 Bobinas alimentadas por el controlador para detección automática

El módulo de entradas digitales se utiliza para informar al controlador el modo de operación de los subsistemas de respuesta del sistema F&G (refrigeración, contra incendio y corte de gas), además cuales actuadores están en operación, así como cual o cuales fuentes están en operación normal. La figura 5.18 muestra las conexiones del módulo de entradas y salidas digitales, en el caso de las últimas se muestra la alimentación de las bobinas en los relés de activación por tensión DC, necesarios para la detección automática, quienes deben cerrar sus contactos para que entren en operación los actuadores.

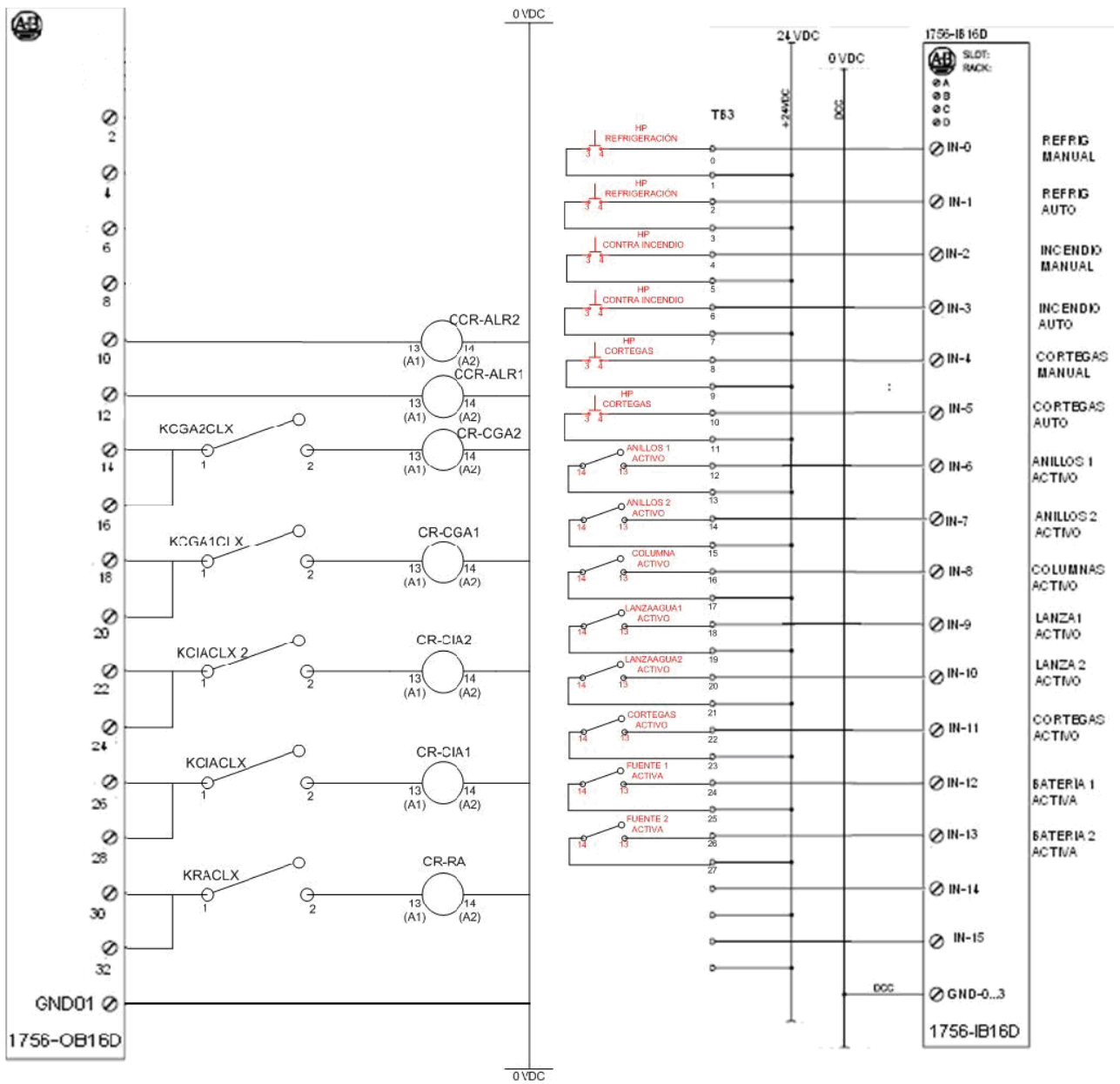


Figura 5.18 Conexiones para módulos de salidas y entradas digitales

En la tabla 5.5 se indica los tipos de relé utilizados y se da una breve descripción de su función (relés de la marca Moeller/EATON, en sus modelos de seguridad ESR5):

Tabla 5.5 Descripción relés de seguridad

Nombre (Bobina/Contacto)	Función
KA# (120VAC/120VAC)	Encargado de prueba de luces
KRM (120VAC/120VAC)	Activación refrigeración manual
KRACLX (120VAC/24VDC)	Habilitación en el controlador para refrigeración automática
KCIM (120VAC/120VAC)	Activación contra incendio manual
KCIACLX1 (120VAC/24VDC)	Habilitación en el controlador, contra incendios automático
KCIACLX2 (120VAC/24VDC)	Habilitación en el controlador contra incendios automático de redundancia
KCGACLX1 (120VAC/24VDC)	Habilitación en el controlador, corte gas automático
KCGACLX2 (120VAC/24VDC)	Habilitación en el controlador, corte gas automático de redundancia
Anillos Activos Lanza Aguas Activos Columna Activa Cortegas Activo (120VAC/24VDC)	Indicación al controlador de que estos actuadores están activos

KRA (24VDC/120VAC)	Activación refrigeración automática
KCIA1 (24VDC/120VAC)	Activación contra incendio automática
KCIA2 (24VDC/120VAC)	Activación contra incendio automática redundante
KCGA1 (24VDC/120VAC)	Activación corte gas automático
KCGA1 (24VDC/120VAC)	Activación corte gas automático redundante
CCR-ALR1 (120VAC/24VDC)	Activación alarma 1
CCR-ALR2 (120VAC/24VDC)	Activación alarma 2
CCR-CGA1 (24VDC /24VDC)	Señal habilitada por el controlador, corte gas automático
CCR-CGA2 (24VDC /24VDC)	Señal habilitada por el controlador, corte gas automático redundante
CCR-CIA1 (24VDC /24VDC)	Señal habilitada por el controlador, contra incendio automático
CCR-CIA2 (24VDC /24VDC)	Señal habilitada por el controlador, contra incendio automático redundante
CCR-RA (24VDC /24VDC)	Señal habilitada por el controlador, refrigeración automático

Finalmente, la figura 5.19 muestra los módulos de entradas analógicas que se encargan de recibir las señales de los detectores de campo. En el módulo de entradas analógicas 1, se ubican los 8 detectores de gas de la esfera, los 2 detectores de gas de su fosa, los 3 detectores de llama de la esfera y 3 detectores de temperatura. Mientras que el módulo de entradas analógicas 2 tendrá el detector de temperatura inferior sur, dos transmisores de presión y un medidor de nivel.

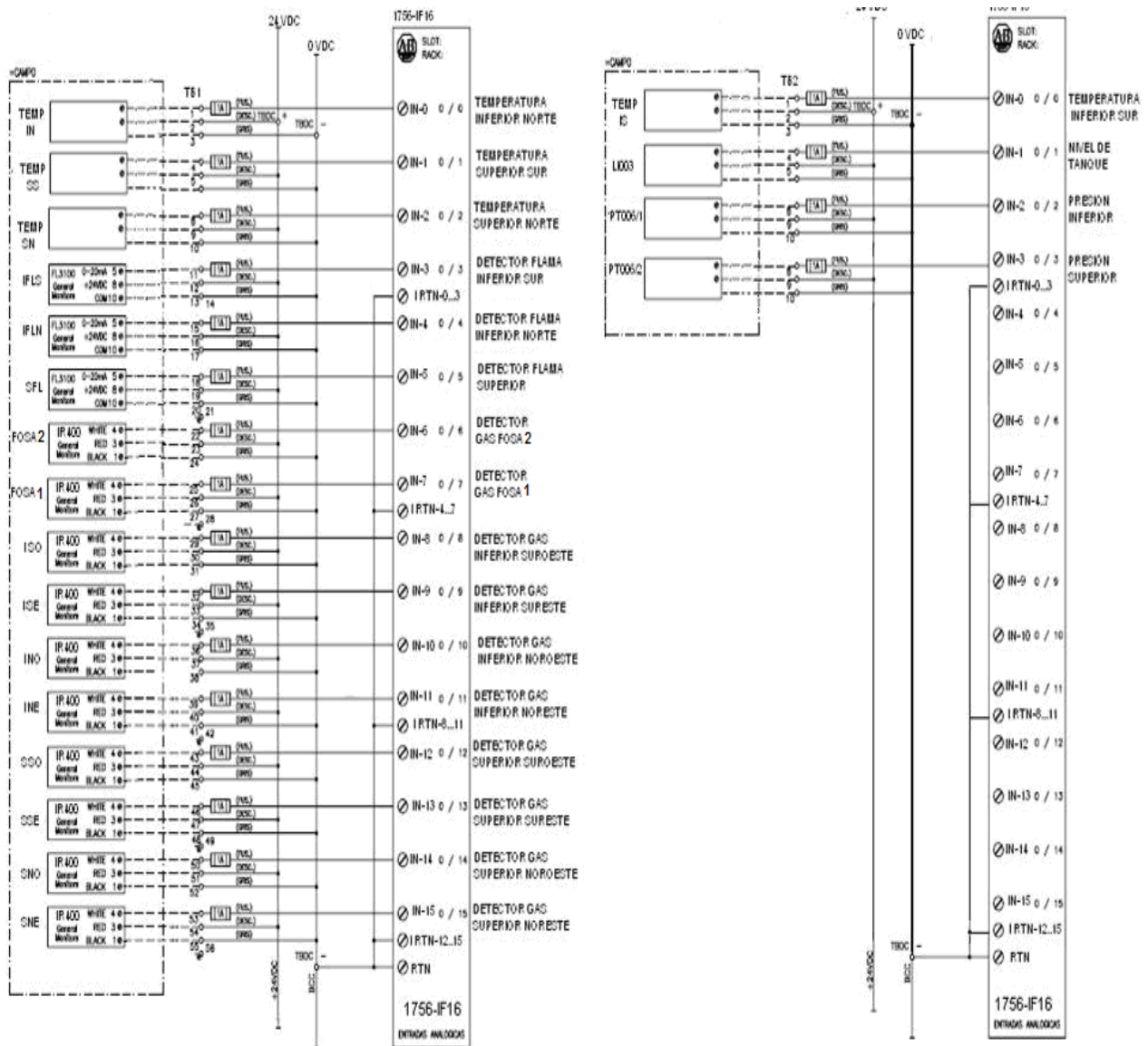


Figura 5.19 Conexión detectores en módulos entradas analógicas

5.4 Descripción del software

En esta sección se describirán detalladamente los algoritmos utilizados para resolver el problema, así como una reseña del software necesario para el desarrollo del mismo. Esta sección será subdividida en: lógica general, lógica control de monitorización, comunicación Modbus, software Logix 5000 y RadioLinx ControlScape FH.

5.4.1 Lógica General

La lógica general del sistema F&G se puede generalizar como se aprecia en la siguiente figura.

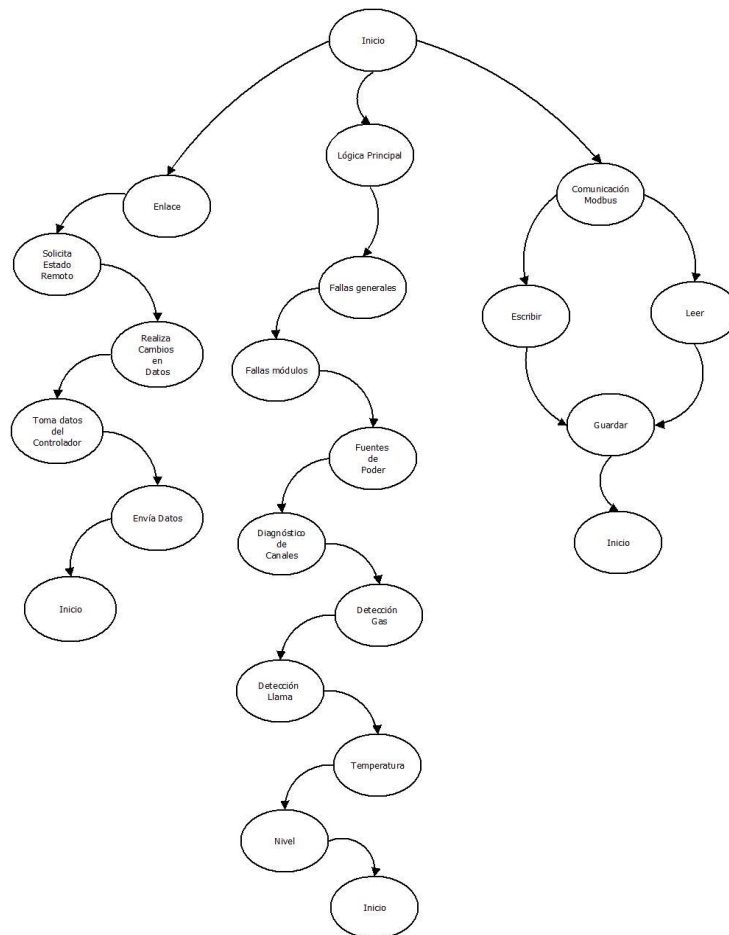


Figura 5.20 Esquema de la lógica general sintetizada del sistema

La lógica general del programa esta subdividida en 3 subsecciones como lo son:

- Lógica principal: encargada de realizar la vigilancia de condiciones no deseadas en el campo, así como la lectura de las variables del proceso requeridas por sus operadores. En esta primeramente se evalúa la presencia de una serie de errores en la arquitectura del sistema, controlador, sus módulos, alimentación; para tomar algunas decisiones, pasar a la obtención de reportes de campo y dar las respuestas necesarias.
- Enlace: Esta parte de la lógica será la encargada de controlar las acciones de enlace desde y hacia del cuarto de Offside. Se verifica si existen solicitudes realizadas y una vez resueltas, en caso que existan, se envían los datos.
- Comunicación Modbus: Muestra la lógica seguida para actualizar los datos provenientes de lo detectores, utilizando el módulo MVI56-MCM. Lee o escribe en los detectores y almacena los valores seleccionados en registros.

La lógica general como tal es un ciclo sin fin, pues se realiza en intervalos de tiempo muy cortos en el controlador, está atenta en todo momento a cualquier evento. Cabe destacar que la lógica principal presenta el mayor grado de prioridad pues contiene el objetivo principal del sistema, por lo que será siempre la primera en ejecutarse y podrá interrumpir a cualquiera de las demás tareas en caso de ser necesario. La lógica de comunicación Modbus para la actualización de datos es periódica, y tiene la segunda en prioridad con el fin de tener datos actualizados para la transmisión de datos mediante el enlace. La tercera en prioridad es el enlace pues sus alcances son de visualización y la activación de la acción mitigadora no depende de ella.

5.4.2 Lógica Control de Monitorización

La lógica general de lectura y función de seguridad como se mencionó anteriormente tendrá la mayor prioridad para operar de forma automática en caso de que se necesite, ver figuras 5.21 y 5.22.

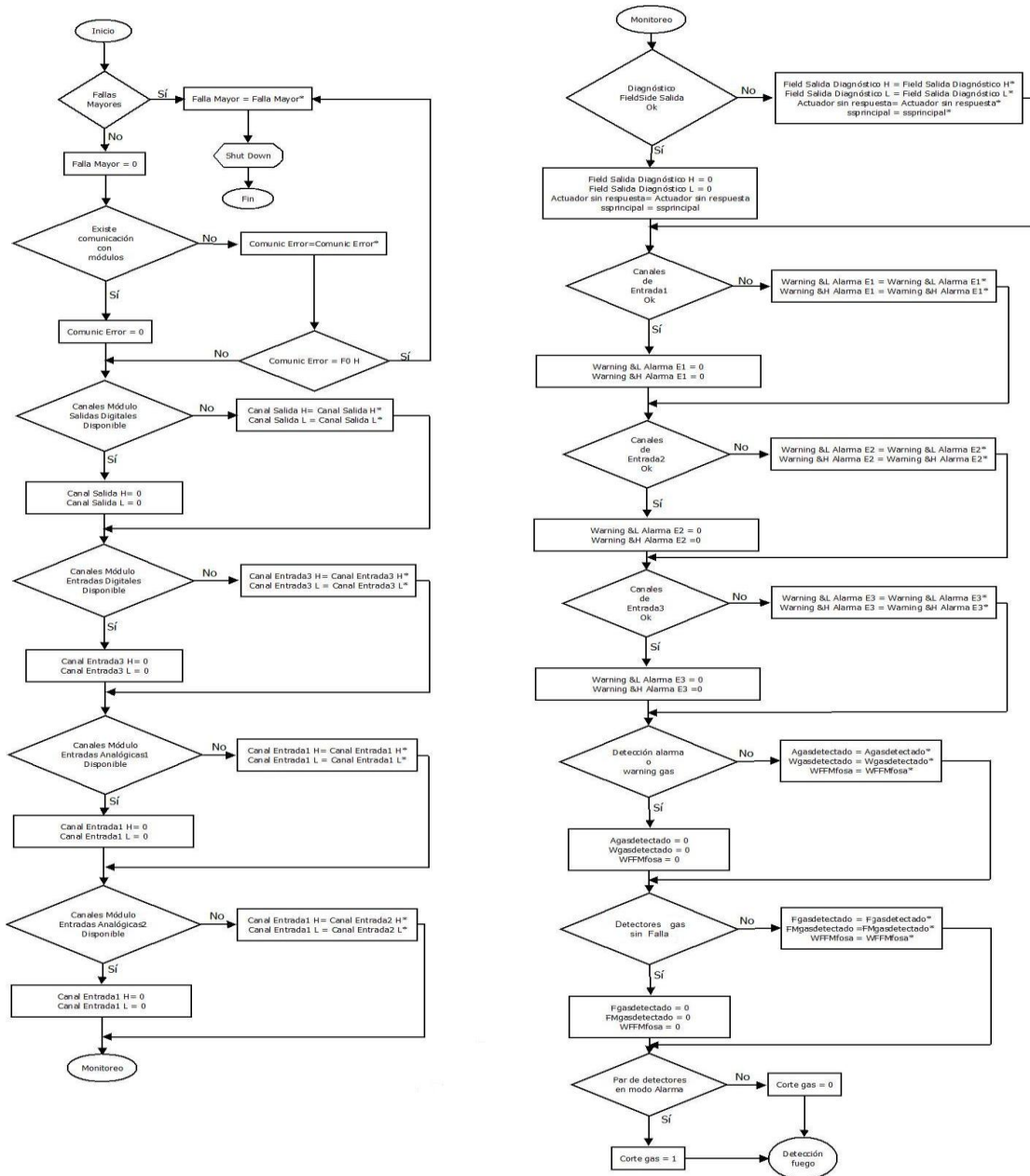


Figura 5.21 Diagrama del programa principal de detección

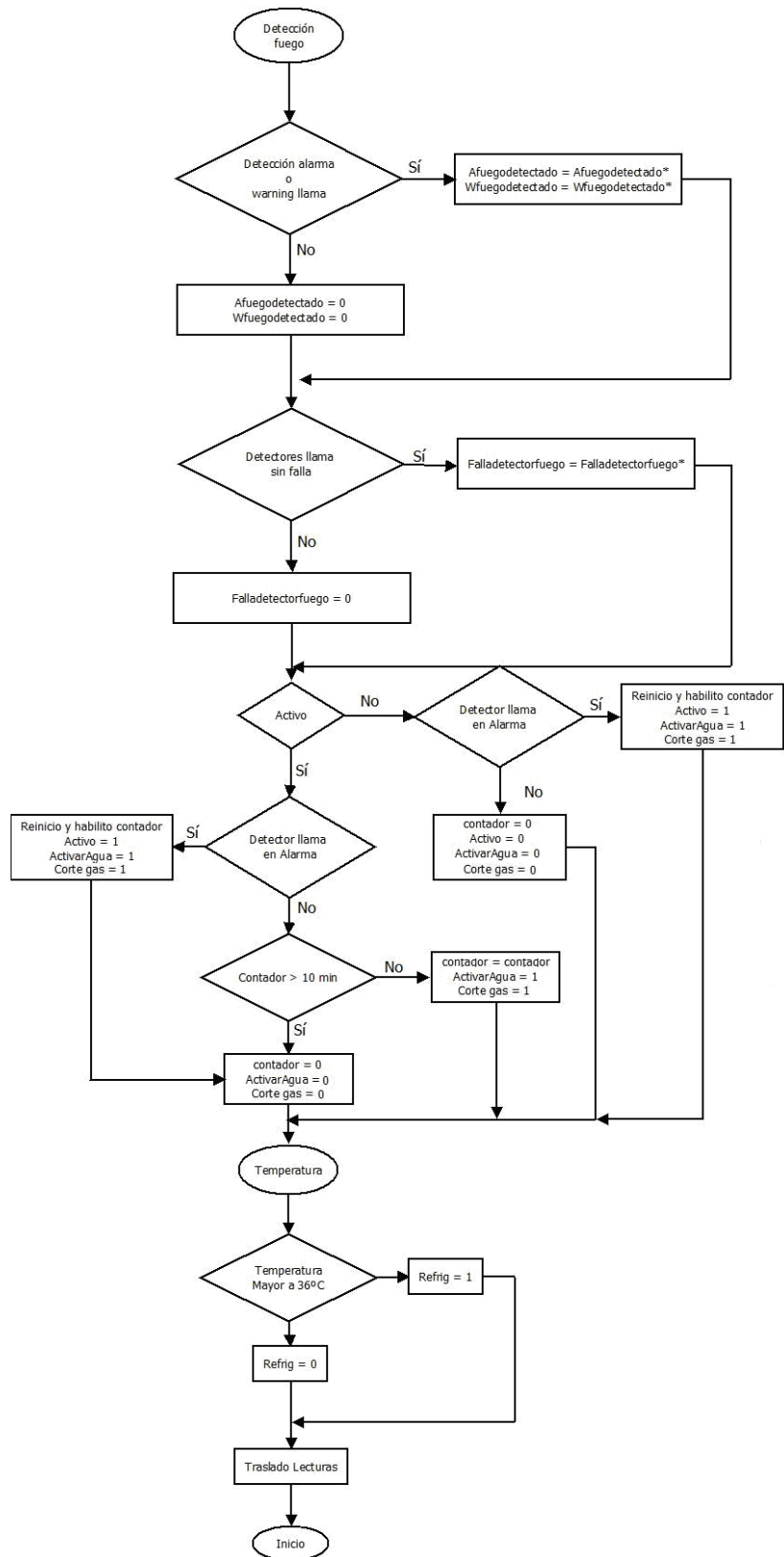


Figura 5.22 Diagrama del programa principal de detección (2)

Inicialmente se verifica la disponibilidad de los módulos y canales del sistema, con el fin inicial de reportar si alguno de ellos presenta falla, y sacarlo de la lógica de detección que da como respuesta la activación de los actuadores. La desactivación de los actuadores de respuesta que activan el agua se dará 10 minutos después de que la condición de fuego ya no esté presente.

En las figuras 5.21 y 5.22 se aporta un extracto del algoritmo solución de monitorización del sistema de F&G, donde se tiene:

1-Fallas generales: En este subprograma se verifica el estado de aspectos primordiales para el funcionamiento correcto del sistema, como lo son: estado del procesador, carga de la batería, posición del keyswitch, fallo de todos los módulos. Tiene como respuesta el paso a modo seguro (o "hold state" definido para la aplicación), así como una señal para indicación de la anomalía.

2- Fallas módulos: Mediante este subprograma se verifica la comunicación con los módulos E/S que se tienen. En caso de no tener comunicación con algún módulo se: indica cual módulo es, sus salidas se colocan en modo seguro (hold state definido para la aplicación), saca al módulo y sus entradas del lazo de seguridad mientras siga su falla.

3- Diagnóstico canales: Realiza diagnósticos de campo al módulo de salida, indica cuales actuadores están en capacidad de dar respuesta y cambia en caso de ser necesario la salida principal para el actuador. En los módulos de entrada realiza prueba de fallas a los canales, indica cuales detectores dan señales confiables y los detectores (gas, llama, temperatura, nivel y presión) que están fuera de operación debido al canal de entrada que realiza sus mediciones.

4- Detección gas superior/inferior: Utilizando los detectores habilitados por sus canales (canales de entrada 15-6), recibe la información de ellos y determina cual es su estado, este puede ser: advertencia LEL $\geq 20\% < 60\%$, alarma $\geq 60\%$, falla mínima (0mA-2mA), falla mayor 0 mA. La falla en este caso es en los detectores y no por inhibición de parte de su canal o módulo lector. Da respuesta

mediante el cierre de la válvula de corte de gas, siempre y cuando, el gas sea detectado en la combinación de al menos dos detectores. Indica el estado de la válvula de corte de gas.

5- Detección llama: Utilizando los detectores habilitados por sus canales (canales de entrada 6-4), recibe la información de ellos y determina cual es su estado. Éste puede ser: advertencia $16\text{mA} \pm 0.2\text{mA}$, alarma $19\text{mA} \pm 0.2\text{mA}$ o falla $0\text{mA} \pm 0.2\text{mA}$; la falla en este caso es en los detectores y no por inhibición de parte de su canal o módulo lector. Da respuesta mediante la activación de las 4 salidas que se encargarán de activar el agua contra incendio del sistema de agua para este fin, además de cortar el gas. Indica también el estado de las salidas para los actuadores.

6- Detección Temperatura: Utilizando los sensores de temperatura, habilitados por sus canales de entrada del módulo de entradas analógicas, recibe la información de ellos y determina cual reporta un valor mayor a 36°C . Con esto informa cual o cuales sectores de la esfera presenta condiciones de temperatura más elevadas de lo normal mediante advertencias, y en caso de estar operando en refrigeración automática envía la señal respectiva, para iniciar la activación del equipo de respuesta correspondiente cuando se sobrepase este límite.

7-Nivel: Utilizando los indicadores de nivel asignados en la empresa se conoce el estado de nivel de la esfera.

8- Presión: Mediante los transmisores de presión se determina esta variable en cada esfera.

La tabla A.4.1 de los anexos define algunos de los datos más importantes de los registros que lleva el programa así como su significado.

5.4.3 Comunicación Modbus

- Programa inicial

A cada detector FL3100 le es asignada una dirección dentro de la red Modbus, esto se realiza en el laboratorio antes de conectar estos dispositivos al sistema total. Para ello se tiene la rutina “Programa inicial”, en la cual cada detector se alimenta con una salida digital de 24 VDC a su terminal de alimentación, llamadas L1, L2 y L3. De éstas, durante la asignación de las 3 direcciones sólo una permanece activa para que los comandos sólo sean recibidos por un detector utilizando la dirección preestablecida que tiene cada uno de ellos, la cual es 1. En la figura 5.23 se muestra el diagrama de flujo del “Programa inicial”.

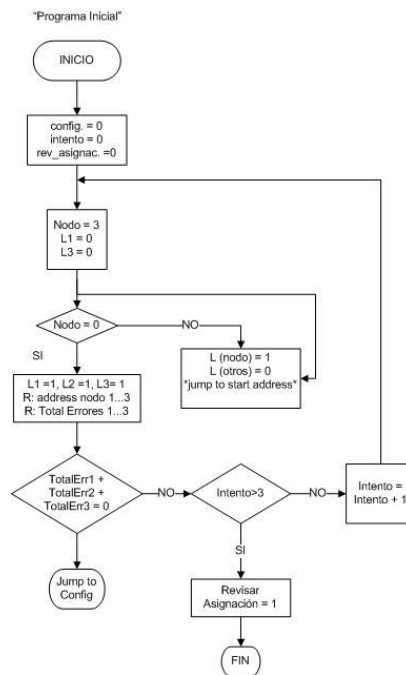


Figura 5.23 Algoritmo programa inicial Modbus

Para realizar la configuración total de los dispositivos vía Modbus, una vez que estos poseen la dirección de nodo-esclavo que se quiere, se tiene el “Subprograma config”, con este se realiza la configuración de los parámetros que utilizan los tres dispositivos FL3100 en su operación vía Modbus.

El “Subprograma config” define los parámetros de:

EEPROM override (registro 07 H), el cual al escribirse el valor de “02H”, asigna el mando al switch que poseen los dispositivos en su cobertor, para parámetros como: sensibilidad del detector, retraso en las alarmas para evitar falsas alarmas, el estado de las alarmas y advertencias como enclavadas o no enclavadas, y estado de los relevadores de estado sólido del detector.

También se asignan los valores para operar en la red Modbus, estos son: 9600 b/s, formato de dato de: 8 bits sin paridad con un bit de parada (registros 0B H y 0C H). Se reestablecen los fallos de COPM tanto de UV como IR, además de asignársele mediante este “Subprograma config” la fecha y hora real. Los parámetros antes descritos que asigna el “Subprograma config” son realizados vía broadcast pues, son los mismos para los tres detectores de llama presentes en la red Modbus.

Al finalizar estas escrituras se revisan los errores totales de comunicación en el registro 2B H de cada dispositivo, y en caso de que se tenga algún error se reintenta la configuración de estos dispositivos un total de 3 veces. En caso de que se sobrepase esa cantidad de veces se obtiene una salida de “revisar parámetros”, la cual debe ser reestablecida por el usuario cuando se quiera que la rutina reintente la configuración nuevamente (3 veces más). En caso de que se no se tengan errores totales en general se obtiene la salida “config correcta” y los dispositivos quedan debidamente configurados según los requerimientos para formar parte del sistema de F&G.

Esta configuración se agrega a los detectores de llama antes de ser utilizados en el sistema F&G. En la figura 5.24 se muestra el diagrama de flujo del “Subprograma config”.

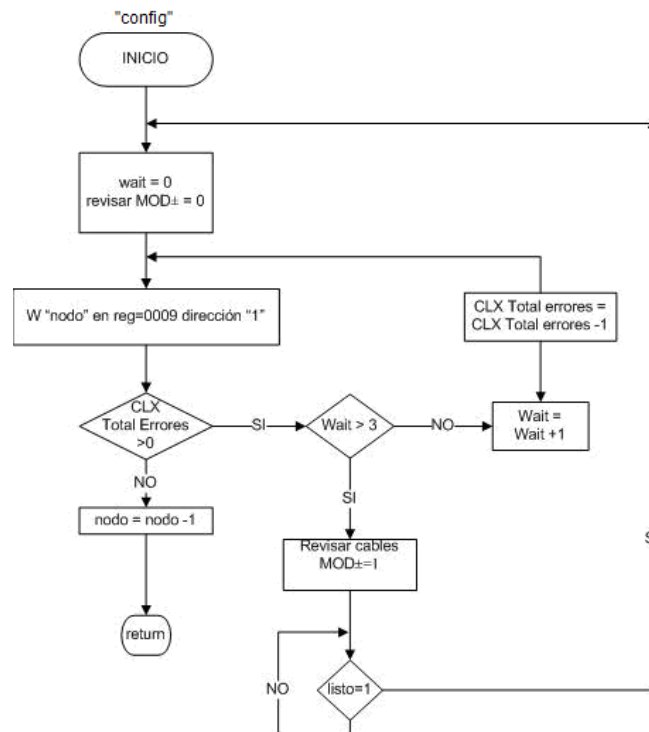


Figura 5.24 Secuencia configuración Modbus para FL3100

- Programa display FL3100

Con el “Programa display FL3100” se establece la causa de fallo en cada detector FL3100H, a continuación se describen algunas causas y su posible solución.

RstLineShrt: El detector tiene su entrada de reset una tensión que reestablece su operación, verificar.

UVtenm: El detector ha percibido una fuente constante de rayos UV por un período mayor a 10 minutos, verificar.

Outputcurrent: Error en el circuito de corriente. Error grave, debe ser cambiado.

FlashChs: La memoria del programa no esta funcionando de forma adecuada. Error grave, debe ser cambiado.

EEPROMChs: Reiniciar el detector, si el problema persiste debe ser cambiado.

RAMTest: La memoria no esta funcionando. Error grave, debe ser cambiado.

LowlineVolt: La tensión de entrada es baja, verificar.

UVCOPM: La ventana UV debe limpiarse, verificar.

IRCOPM: La ventana IR debe limpiarse, verificar.

Internalvoltaje: Se detectan varias tensiones internas. Error grave, debe ser cambiado.

Los demás bits del registro "Error/State" no son utilizados. En la figura 5.25 se muestra el diagrama de flujo del "Programa display FL3100".

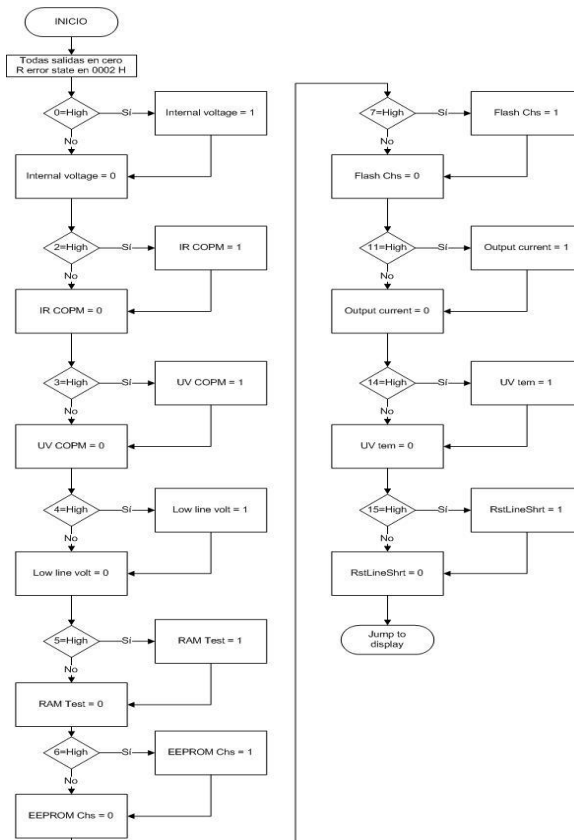


Figura 5.25 Algoritmo del display de fallas para FL3100

- Programa display interactivo FL3100

El “Programa display interactivo FL3100” permite realizar la lectura (y escritura en algunos casos), de los parámetros a conocer. Los parámetros elegidos son considerados como los más importantes, según la consulta que se realizó a los encargados de operar con el sistema F&G, para almacenamiento de LPG en la refinería. Estos parámetros son:

Errorestotales (Lectura y Borrado): Usado para llevar un control sobre los errores de comunicación que han tenido los detectores, con el fin de llevar un control de la comunicación Modbus de cada detector dentro de la red, registro 2B H. Éste además, puede ser reestablecido si se quisiera, Borrar errores registro 2D H.

Eventos (Lectura y Borrado): Se utiliza para tener un registro de los eventos que se tengan en cada detector, un total de 20 eventos son almacenados, 10 de advertencias y 10 fallas con su respectiva fecha y hora pueden ser accedidos. Registros 49 H – 4B H en el caso de advertencias, 59 H – 5B en el caso de fallas. Para estos eventos se solicita indicar el número de evento que se desee ver, siendo 1 el más reciente y 10 el menos reciente. Para borrar los eventos ocurridos se escribe el registro 67 H.

Analógico: Indica el estado de cada detector según su salida de corriente (registro 00 H).

DipSw (Lectura): Utilizado para tener conocimiento de la configuración de operación que tiene cada detector en el campo.

FallasUV totales (Lectura): Indica cuantas fallas por COPM de la ventana UV han sido registradas desde la última vez que se reinició el contador de fallas ópticas, registro 0F H.

FallasIRtotales (Lectura): Indica cuantas fallas por COPM de la ventana IR han sido registradas desde la última vez que se reinició el contador de fallas ópticas, registro 10 H. El registro 13 H borra los contadores de fallas ópticas.

Cantfallas (Lectura): Usado para observar la cantidad de fallas que tiene el dispositivo desde que inicio su operación, registro 5E H.

Al realizar los programas de configuración y “display” para la comunicación Modbus de los detectores de llama, se obtuvo un total de 48 comandos en el puerto de aplicación 2 del módulo MVI56-MCM. La cantidad de comandos es un aspecto a tener presente en el caso de que se requiera hacer una ampliación de estos programas o utilizar este puerto de aplicación para realizar otras tareas, ya que el puerto tiene disponibles un máximo de 100 comandos, por lo que se cuenta con 52 comandos aún libres.

Para los detectores de gas se utiliza la misma lógica de configuración general utilizada en los detectores de llama; y para la configuración de la dirección inicial Modbus se utiliza el menú de opciones del switch magnético del IR4000M. Las direcciones de fábrica son 10-17 para los 8 detectores en la esfera, que pueden ser visualizados a través del IR4000M, mientras que los dos detectores de fosa se establecieron con las direcciones 1 y 2.

- Programa Configuración IR400

El “Programa Configuración IR400” establece la configuración inicial de los parámetros con los que operan los detectores de gas IR400, antes de ser conectados a la red de comunicación Modbus, entre los que se incluye:

Gas#Id (Lectura): Con este parámetro se indica el gas al que es correctamente sensible cada detector, para eso se escribe en el registro 03 H el valor 101 o especial LPG.

Call/Otype (Lectura): Se escribe un cero en el registro 07 H para indicar que la calibración de los detectores se realiza en el campo.

Velocidad (registro 0B H), formato dato (registro 0C H): Con estos dos parámetros se establece la velocidad y formato de datos que se manejan en la comunicación Modbus de estos detectores. Estos valores son: 9600 b/s, formato de dato de: 8 bits sin paridad con un bit de parada.

HazardWatch: Se escribe un "1" en el registro 16 H, para habilitar la indicación de cuando una calibración haya sido abandonada sin completarse.

%alarma (registro 18 H): Se establece que el % LEL bajo el cual cada detector activará su alarma es 60%, según se recomienda en la hoja de seguridad del gas LPG.

%warning (registro 19 H): Se establece que el % LEL bajo el cual cada detector activará su alarma es 20%, según se recomienda en la hoja de seguridad del gas LPG.

Además se asignaron mediante este "Programa Configuración" la fecha y hora real (registros B3 – B5). Las asignaciones de los parámetros antes descritos en el "Programa Configuración" se realizaron vía broadcast con el fin de utilizar la menor cantidad de comandos para el puerto de aplicación 1 del módulo MCVI56-MCM, pues son los mismos para todos los detectores presentes de gas en la red Modbus.

Posterior a la asignación de los parámetros, el "Programa Configuración" revisa si existen errores de comunicación con los dispositivos, de haberlos intenta volver a establecerlos 5 veces, de lo contrario retorna la salida "revisar parámetros". Una vez haya sido reestablecida esta salida lo intenta nuevamente 3 veces. Cuando la configuración de parámetros se dé correctamente en forma completa, se indica mediante la salida "conf correcta", y con esto se tienen los detectores listos para entrar al sistema de F&G en el campo. Esta configuración es agregada a los detectores de gas antes de ser utilizados en el sistema F&G.

- Programa display IR400

El “Programa display IR400” se usa para poder establecer la causa de fallo en cada detector IR400H, a continuación se describen algunas causas y algunas soluciones.

EEPROMerror: La memoria del programa no esta funcionando de forma adecuada. Error grave, debe ser cambiado.

Negexcess: Caída de la salida a negativo. Limpiar la ventana y el camino óptico, calibrar si es necesario.

Miscfault: Verificar estado del detector para operación.

Clippinfault: Verificar estado del detector para operación.

Heaterproblem: Problema en el calentador. Error grave, debe ser cambiado.

Reflamp: Problema en la lámpara referencia. Error grave, debe ser cambiado

Actlamp: Problema en la lámpara activa. Error grave, debe ser cambiado.

Testforgotten: Reiniciar el detector, si el problema persiste debe ser cambiado.

FailtoZero: El detector necesita reajuste del cero, verificar.

Calfail: El detector necesita calibración, verificar.

Lowline: La tensión de entrada es baja, verificar

Wireshortage: Las entradas de reset del relevador de estado sólido fueron puestas a tierra hace más de 30 segundos, verificar si no se encuentra esa condición. Error grave, debe ser cambiado.

IRHigh: Limpiar las ventanas y el camino óptico, verificar.

Beamblock: Limpiar el camino óptico, verificar.

Cleanwindows: Limpiar las ventanas, verificar.

Partialbeamblock: Limpiar las ventanas y el camino óptico, verificar

- Programa display interactivo IR400

El “Programa display interactivo IR400” permite realizar la lectura (y escritura en algunos casos) de los parámetros a conocer. Los parámetros elegidos son considerados como los más importantes, según la consulta que se realizó a los encargados de operar con el sistema F&G, para almacenamiento de LPG en la refinería. Estos parámetros son:

Errorestotales(Lectura y Borrado): Utilizado para llevar un control sobre los errores de comunicación que han tenido los detectores, con el fin de llevar un control de la comunicación Modbus de cada detector dentro de la red, registro 20 H. Éste además puede ser reestablecido si se quisieran borrar los errores registro 2D H.

Eventos (Lectura y Borrado): Se utiliza para tener un registro de los eventos que se tengan en cada detector, un total de 10 eventos de fallas podrán ser almacenados, con su respectiva fecha y hora podrán ser accedidos. Registros CA H – CC H. Para estos eventos se solicita indicar el número de evento que se desee ver siendo 1 el más reciente y 10 el menos reciente. Para borrar los eventos ocurridos se utiliza el registro 67 H.

Analógico: Indica el estado de cada detector según su salida de corriente, registro 00 H.

%Bloqueo: Indica el porcentaje de bloqueo del haz, registro 52 H.

Al realizar estos programas de configuración y display en comunicación Modbus de los detectores de gas, se utiliza un total de 92 comandos en el puerto de aplicación 1 del módulo MVI56-MCM.

5.4.4 Software Logix5000 y RadioLinx ControlScape FH

El software utilizado para la programación del controlador electrónico programable de seguridad ControlLogix es el software Logix5000 de Rockwell Automation. En éste son desarrolladas las rutinas que realiza el 1756-L61 para llevar a cabo la lógica de control necesaria para ejecutar las diferentes etapas del sistema F&G. Se poseen diferentes opciones de programación entre las que se tiene: escalera, diagrama estructurado y diagrama de bloques. La decisión en cuanto a la elección de cual tipo de programación utilizar recae en el programador.

La programación del controlador y los algoritmos para utilizar los módulos (incluyendo el de Prosoft) se realizaron tomando como base este programa. En la figura que se presenta a continuación se muestra el ambiente de programación de Logix5000, utilizando como ejemplo una rutina principal para un CPU Controllogix 1756-L61 como el seleccionado.

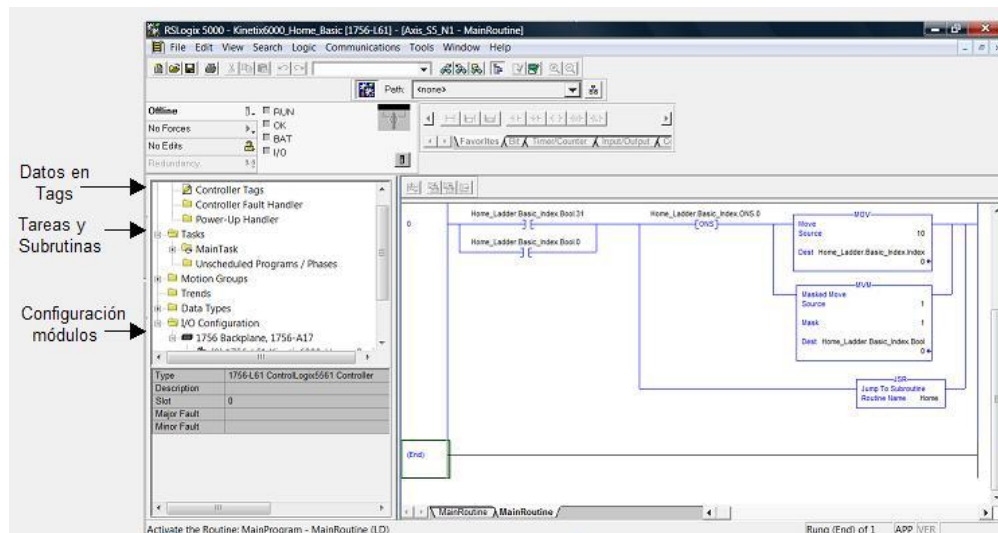


Figura 5.26 Ambiente programación Logix5000¹⁴

¹⁴ Tomado de: Software Logix5000

RadioLinx ControlScape FH es el programa utilizado por el radio RLX_IFHS para realizar las configuraciones de red, de los radios, adicionar radios a la red y realizar cualquier tipo de modificación a los parámetros seleccionados inicialmente. Con este programa se puede además, conectar algún radio remotamente en la red para acceder a él mediante el radio maestro y lograr realizar un diagnóstico de su operación o cual es el problema de su falla, si este fuera el caso. La figura 5.27 muestra la pantalla de configuración del radio maestro donde se seleccionan algunos de sus parámetros a utilizar, como lo son: el protocolo, la velocidad RF, la velocidad del puerto RS232 para comunicarse con su dispositivo DTE para configuraciones o envío de datos.

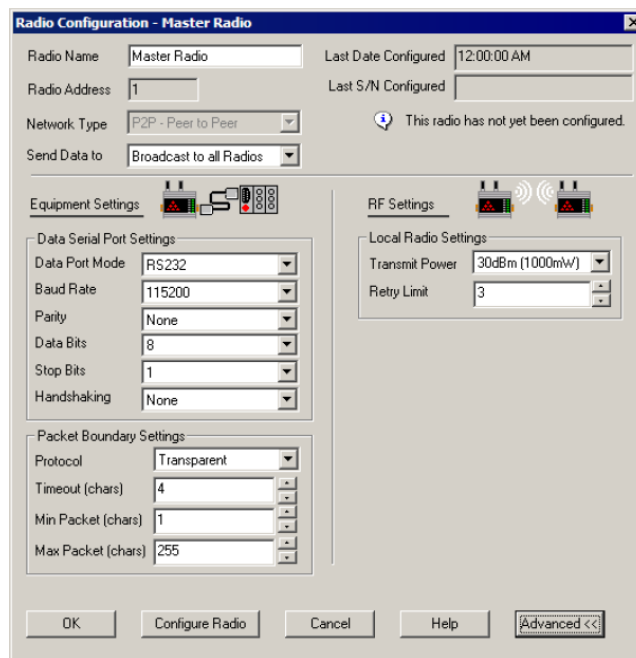


Figura 5.27 Pantalla de configuración radio maestro del programa RadioLinx ControlScape FH¹⁵

¹⁵ Tomado de: Sitio web: www.prosoft-technology.com

Capítulo VI: Análisis de resultados

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de las etapas desarrolladas para el proyecto, como lo son: detección, control, enlace. Además, se incluye una sección de rentabilidad del proyecto.

6.1 Resultados

6.1.1 Instalación detectores en el campo

A continuación en la tabla 6.1 se presentan los datos de longitud de las zonas a detectar en la esfera:

Tabla 6.1 Dimensiones de las zonas por detectar propias de las esferas de almacenamiento

	Diámetro (m)	Altura efectiva (m)
Zona Baja	9.3	5
Zona Alta	2.8	5

El apartado “altura efectiva” de la tabla 6.1 en la zona baja se refiere a la altura desde el suelo, perpendicularmente desde donde se instalan los detectores, hasta alcanzar la superficie de la esfera. Mientras que en la zona alta, se refiere a la altura desde la superficie de la esfera hasta el punto de más alto de las válvulas de seguridad. La tabla 6.2 hace referencia a parámetros anteriormente utilizados.

Tabla 6.2 Parámetros utilizados en instalaciones anteriores para detección en las esferas

	Altura detector llama (m)	Alejamiento de la zona de detección detector llama (m)	Diámetro detectores de gas (m)
Zona Baja	2.1	0	11
Zona Alta	1.8	1.7	3

Con un diámetro aproximado de la esfera de 20 m, y al estar las tuberías de abastecimiento así como la toma de producto ubicadas debajo de ellas, se puede tener cubierta en su totalidad el área inferior de detección de posibles fuentes de llama con la utilización de dos dispositivos FL3100. Con estos dos detectores ubicados de frente, en direcciones opuestas, por ejemplo: norte y sur, este y oeste, etc., se logra cubrir toda la zona baja de las esferas de almacenamiento. Los parámetros que fueron seleccionados en el caso de la zona inferior de la esfera se presentan a continuación en las figuras 6.1 y 6.2.

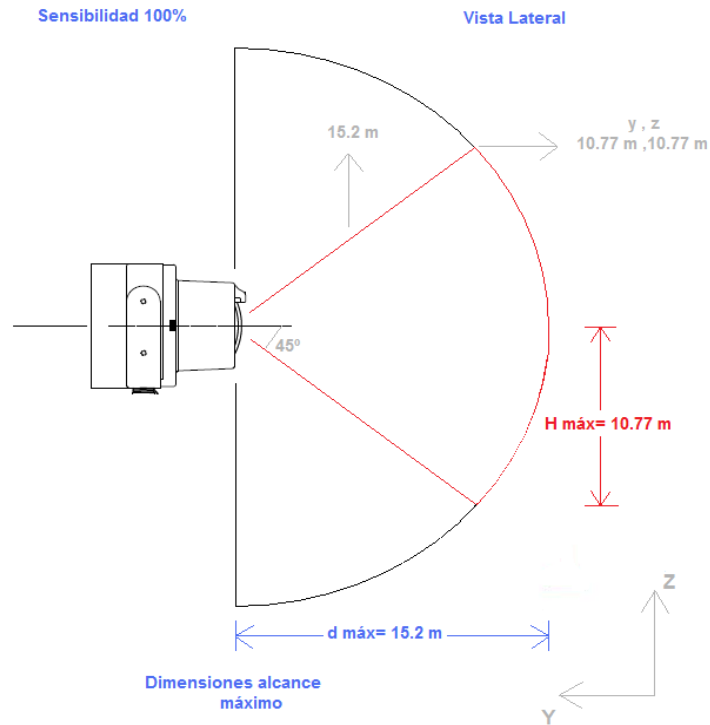


Figura 6.1. Alcance vertical del FL3100 en la parte inferior de la esfera con sensibilidad 100%

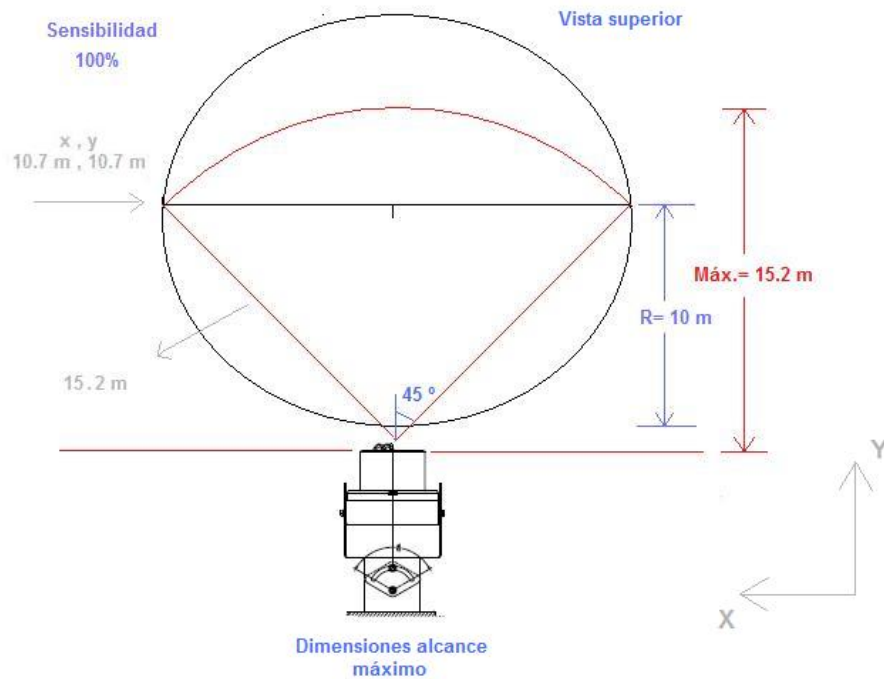


Figura 6.2 Alcance horizontal del FL3100 en la parte inferior de la esfera con sensibilidad 100%

De los valores máximos de longitud de visión en el campo donde tienen sensibilidad los detectores presentados en las figuras 6.1 y 6.2, y teniendo en cuenta la máxima altura bajo la esfera, así como su diámetro, se determinó que los detectores bajo la esfera sean alejados perpendicularmente desde el centro de la zona que se desea controlar con estos dispositivos aproximadamente 0.77 m. Esta distancia se eligió para que el detector pierda su “ángulo muerto”, y se inicie la detección de esta zona con un barrido de longitud de aproximadamente 1.54 m, expandiéndose con un ángulo de 45° a cada lado conforme se vaya haciendo más lejana la detección, teniendo como límites las longitudes presentadas en las figuras 6,1 y 6.2.

Lo anterior se combina con la instalación del detector a una altura de aproximadamente 2.5 m, para tener una visión total de la altura que se tiene en la zona inferior de la esfera. Con lo que se inicia la detección con un barrido de aproximadamente 1.54 m de longitud, y ésta va aumentando con un ángulo de 45° a cada lado conforme se vaya interiorizando en la zona de detección, desde el detector. Todo esto es suficiente ya que la forma de la esfera hace que la altura que necesita ser detectada disminuya conforme se vaya acercando al centro de la esfera.

En el caso de la zona superior de las esferas, se siguieron algunas recomendaciones realizadas por los expertos relacionados con el tema de almacenamiento de gas LPG, donde se necesita que los detectores sean programados en el campo con una sensibilidad de 50%, debido a la ubicación del quemador de la refinería. Tomando en cuenta la recomendación antes citada, se presentan las siguientes observaciones (ver figuras 6.3 y 6.4).

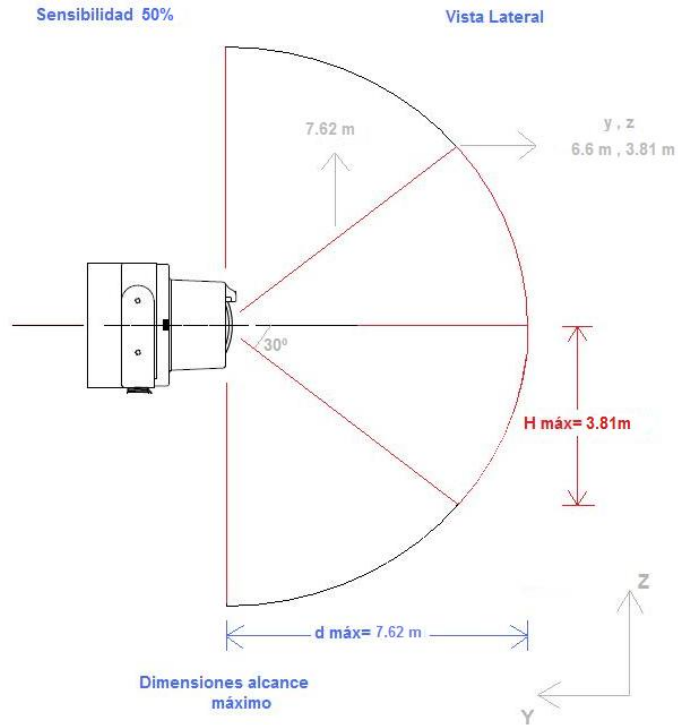


Figura 6.3 Alcance vertical del FL3100 en la parte superior de la esfera con sensibilidad 50%

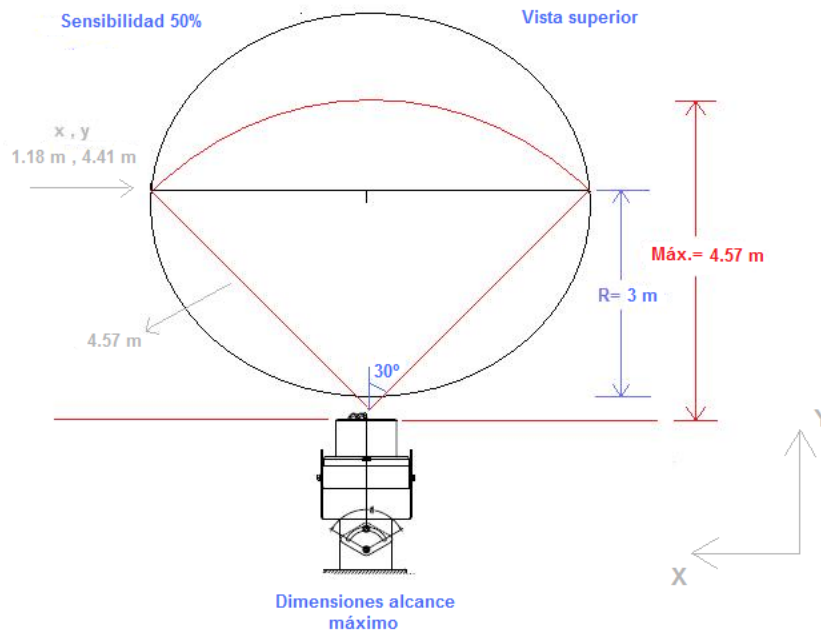


Figura 6.4. Alcance horizontal del FL3100 en la parte superior de la esfera con sensibilidad 50%

De los valores máximos de longitud de visión en el campo, donde tienen sensibilidad los detectores presentados en las figuras 6.3 y 6.4, y teniendo en cuenta la máxima altura superior que se desea cubrir, así como el diámetro (aproximadamente 5 m) de la zona superior de la esfera, se estableció que los detectores sobre la esfera sean alejados perpendicularmente desde el centro de la zona que se desea controlar con estos dispositivos aproximadamente 2 m. Esta distancia se eligió para que el detector pierda su “ángulo muerto”, y se inicie la detección de esta zona con un barrido de longitud de aproximadamente 1.08 m, expandiéndose con un ángulo de 30° a cada lado conforme se vaya haciendo más lejana la detección, teniendo como límites las longitudes presentadas en las figuras 6.3 y 6.4.

Lo anterior se combina con la instalación del detector a una altura de aproximadamente 2.5 m respecto al plano normal de la zona a detectar, para tener una visión total del área potencialmente peligrosa por presencia de fuego. Con esto inicia la detección con un barrido de aproximadamente 1.44 m de longitud, y aumentando la misma con un ángulo de 30° a cada lado, conforme se vaya interiorizando en la zona de detección, desde el detector. Todo esto es suficiente para la zona que se desea cubrir en la zona superior de las esferas (aproximadamente 5 m incluyéndose las válvulas de seguridad), y a la vez evitar posibles falsas alarmas.

Tabla 6.3 Resumen de las ubicaciones para detectores FL3100 de campo según las condiciones de la zona y dispositivos de almacenamiento

Zona	Cantidad detectores (unidades)	Sensibilidad (%)	Altura de instalación (m)	Distancia central máxima a detectar (m)	Distancia de alejamiento (m)
Inferior	2	100	2.5	15	0.77
Superior	1	50	2.5	7.6	2

La configuración que se muestra en la figura 6.5, es la seleccionada tanto en la parte superior como inferior, posee cuatro detectores ubicados en los puntos cardinales NO, NE, SO y SE. Cada detector está a cargo de la detección de un área de aproximadamente 23.8 m² propios y 23.8 m² por la suma de los dos detectores vecinos (para efecto de redundancia, como lo establece la API) para un total de 47.6 m², aproximadamente, por detector en la zona inferior. En la zona superior cada detector cubre 1.76 m² propios y 1.76 m² de la suma de los dos detectores vecinos (según la recomendación de la API), para un total de 3.52 m² por detector. En la fosa con dos detectores y medidas de 8 m de ancho y 18 m de largo cada detector cubre un total de 72 m² propios. La tabla 6.4. muestra un resumen de esto.

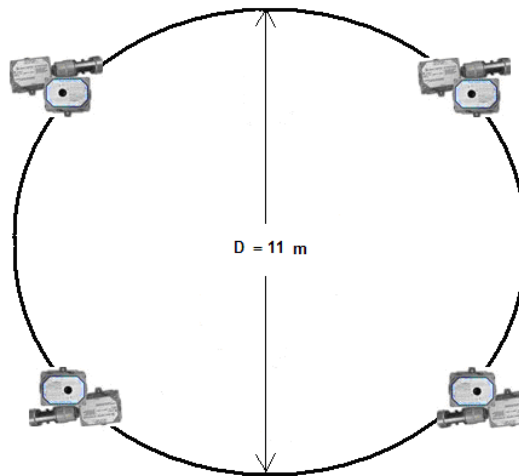


Figura 6.5 Configuración 4 detectores en zona inferior de la esfera

Tabla 6.4 Superficies por cubrir de cada detector de gas en las zonas superior e inferior.

Configuración	Superficie propia a cubrir (m ²)	Superficie de redundancia a cubrir (m ²)	Superficie total por detector (m ²)
Superior	23.8	23.8	47.6
Inferior	1.76	1.76	3.52
Fosa	72	72	144

6.1.2 Comportamiento del sistema

En la figura 6.6 se muestran los resultados obtenidos en cuanto a probabilidad de falla de los elementos principales del lazo de seguridad en el sistema diseñado, esto basado en las pruebas a los elementos realizadas del sistema en configuración “fail safe” para entrar en operación.

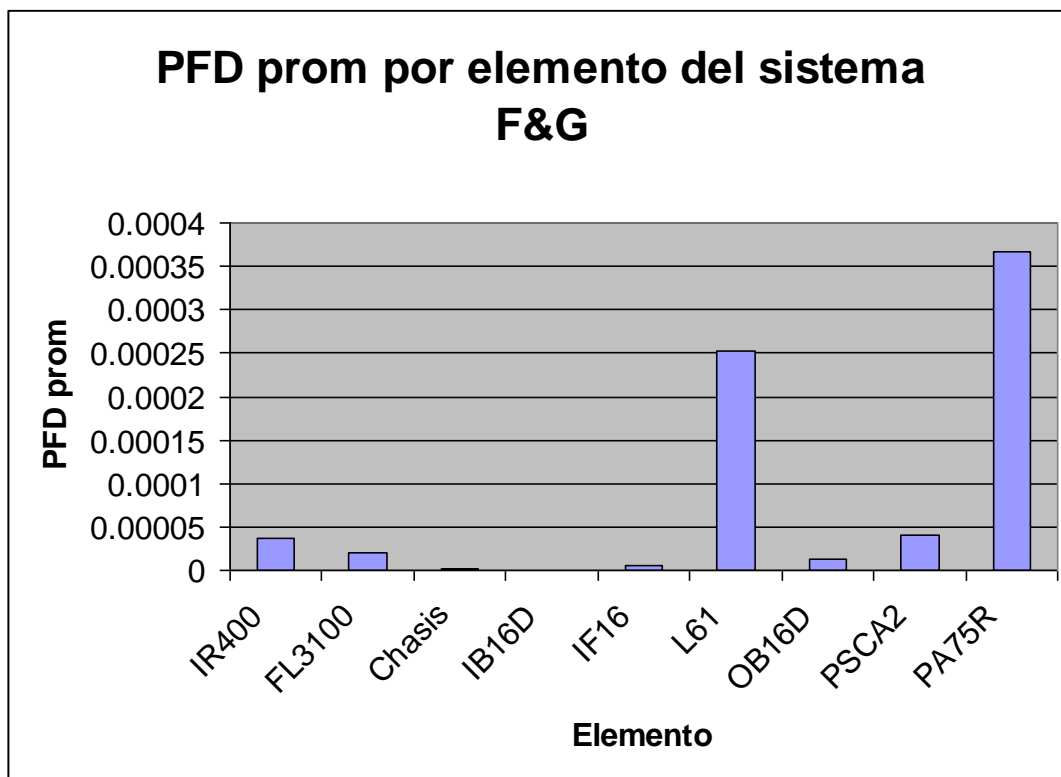


Figura 6.6 Probabilidad de falla en demanda del sistema

A continuación se detalla la lista de eventos que se podrán conocer desde el cuarto de vigilancia:

Tabla 6.5 Eventos más importantes del sistema F&G diseñado

Evento	Causa	Acciones
Alarma fuego	Alarma en un FL3100	Activa agua 10 minutos Aviso
Alarma gas	2 IR400 leen %LEL \geq 60	Corta gas Aviso
Alarma estado OFF	Modo operación OFF en Corte gas, Refrigeración o Incendio	Aviso
Advertencias	Estado advertencia detectores IR400 o FL3100	Aviso Registro en los FL3100
Falla	Estado falla en detectores IR400 o FL3100	Registro en los IR400 y FL3100 Aviso
Alarma Refrigeración	Temperatura \geq 36°C	Activa refrigeración 5 minutos Aviso
Estado fuentes alimentación	Operación 1756-PA75R	Aviso
Salida de operación	Procesador, Batería 95%, todos los módulos E/S sin comunicación, posición keyswitch	Salidas a modo seguro (hold state) Alarma shut down Aviso
Lecturas	Varias	Concentraciones, causa de fallas, eventos, etc.

El diseño del enlace se realizó finalmente siguiendo los siguientes parámetros:

- Hardware: 9600 bps, 8 bits datos, sin paridad, 1 bit de parada y sin hardware control.
- Protocolo ControlLogix/RLX-IFHS: DF (Allen Bradley)
- RF: tasa de transferencia 19.2 kbps, Tx= 100 mW (20 dmB)
- Antena: altura 6.1 m, direccional, ganancia 6 dB
- Obteniendo un valor de potencia recibida de 0.52 dBm.

6.1.3 Rentabilidad del proyecto

El proyecto, al estar enfocado al almacenamiento de LPG en RECOPE, tiene una relación directa con las ventas hechas por la empresa, de este producto. Por lo que resulta conveniente hacer un estimado de los costos que significa el proyecto, en lo que se refiere a equipo a utilizar, mencionado en el presente documento. Es por esta razón, que en la tabla 6.6 se presentan los costos estimados de algunos de los elementos más importantes del proyecto.

Tabla 6.6 Precios estimados algunos elementos importantes del proyecto¹⁶

Elemento	1756-A17	1756-IB16D	1756-IF16	1756-L61	1756-OB16D	1756-PSCA2	1756-BA2	1756-N2	1756-PA75R	1756-CPR2	IR-400	FL-3100
Costo Unitario [\$]	805	562	1,440	5,266	754	180	82	26	1,1000	93	3,400	5,200

La tabla 6.7, presenta los datos mensuales de las ventas de LPG durante el año 2009, necesario para tener dar una idea comparativa de la rentabilidad del proyecto.

¹⁶ Obtenidos de cotizaciones de la empresa y del sitio Web de las casas fabricantes el 10 de Junio del 2010.

Tabla 6.7 Ventas de barriles de LPG en RECOPE para el año 2009 ¹⁷[18]

Mes	Ventas [barriles]
Enero	101169
Febrero	98732
Marzo	100468
Abril	95390
Mayo	95783
Junio	104833
Julio	105442
Agosto	103520
Setiembre	102531
Octubre	103907
Noviembre	103117
Diciembre	115434
Total anual	1,230,328

En la figura 6.7 se detalla el comportamiento del precio por barril establecido en un mes tomado, en este caso Marzo 2009.

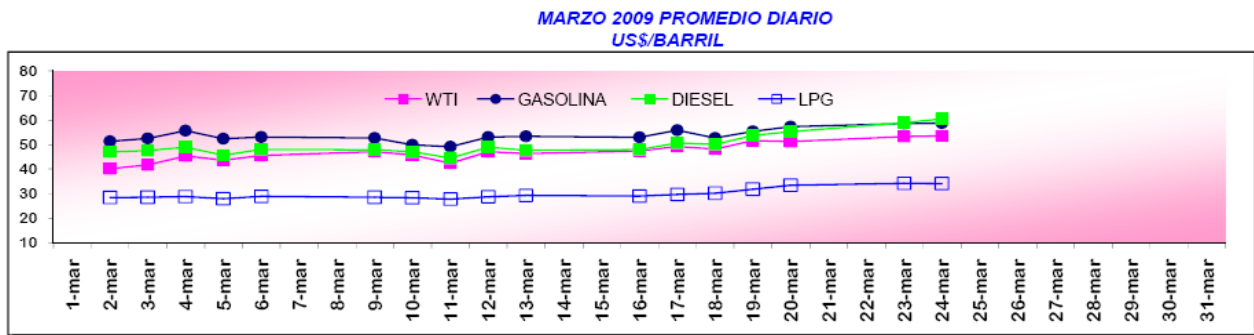


Figura 6.7 Comportamiento de precios por producto [18]

¹⁷ Los elementos marcados con [18] fueron consultados internamente en los departamentos de la empresa, ver bibliografía.

6.2 Análisis

Con el diseño de las etapas planteadas para el sistema de F&G, en el área de almacenamiento LPG en RECOPE Moín, se lograron varios resultados importantes para la vigilancia de la misma.

Primero que todo, se logró realizar el diseño basado en las normas de seguridad establecidas como lo son: la NFPA, API y el IEC, entre otras. Con el IEC se logró tener un control más confiable mediante el diseño y certificaciones alcanzadas por los fabricantes de los diferentes dispositivos, logrando reducir significativamente las posibilidades de fallas inesperadas. Se establecieron los cuidados más importantes a considerar del gas LPG, según sus características físicas y químicas.

Con base en estas dos determinaciones se siguió el camino más conveniente en la detección de fuego y gas para el LPG, entre las que destacan: los criterios aprobados por los organismos internacionales para la colocación de los detectores de gas y fuego (densidad de sus vapores, más pesado que el aire, etc.), niveles de explosividad en concentraciones de gas licuado de petróleo en la atmósfera utilizados en el control de la vigilancia automática, 20% LEL para precaución, 60% LEL para alarma y respuesta únicamente activada cuando se detecta el límite del 60% LEL en al menos dos detectores (redundancia).

Se seleccionó la tecnología de detección de infrarrojos, en el caso del gas; y la detección de infrarrojos y radiación ultra violeta, para fuego. Debido en ambos casos a su inmunidad a fallas, y en el caso del gas, una vida útil más prolongada. Se establecieron los alcances en sensibilidad adecuados para los detectores, esto con el fin de que los detectores sean realmente eficaces en la detección, tanto de fuego como de gas, de las áreas que se quieren.

Se estableció la clasificación de áreas de las zonas donde opera el equipo del sistema, con lo que se determinaron sus grados de seguridad individual (intrínsecamente seguros, a prueba de explosiones, etc.). Se consideraron los alrededores de las esferas, donde operan los detectores, como zonas Clase I, División 2, al igual que el área de las salchichas. El cuarto LPG se definió como una zona sin clasificación, aunque se estableció como aspecto importante tener la precaución de utilizar equipo apto para zonas clasificadas.

En cuanto al control de vigilancia, se estableció una arquitectura más robusta aportada por equipo de la casa fabricante Allen Bradley, mediante el uso del controlador ControlLogix. Su diseño para funciones de seguridad SIL2 fue de vital importancia, para las tareas de su lazo de seguridad. El equipo de pre-actuadores y detectores se seleccionó grado SIL2 o superior, para cumplir con una vigilancia con una probabilidad de falla bajo demanda para el nivel de seguridad intrínseca que se requirió. Se utilizó para ello, detectores de la casa fabricante General Monitors que están certificados por los entes internacionales como productos aptos para la disponibilidad requerida en labores de este tipo, algunos de estos valores pueden verse en figura 6.6 la sección anterior. Fue incluida además, redundancia en puntos clave, como lo es el equipo que activa los actuadores de respuesta ante situaciones de incendio o fugas.

Se utilizaron herramientas especializadas del controlador para hacer posible reducir las fallas al máximo, por ejemplo: redundancia en las salidas de la respuesta de emergencia; una de las más importantes es el paso a modo seguro de sus salidas, manteniéndolas activas o inactivas según como se encuentren mientras se repara el daño, en caso de que se entre en algún error o falla dentro de la arquitectura que lleva a cabo la lógica.

Se separó las funciones de visualización de las del lazo de seguridad propiamente dicho, para lograr el grado SIL en la resolución de situaciones de emergencia, esto mediante la comunicación analógica 4-20 mA de los detectores para funciones de seguridad automática y comunicación Modbus para efectos de visualización y registro de eventos.

La lógica de control de seguridad fue diseñada de manera simple con el fin que sea de fácil comprensión, por si se requiere realizar cambios o expansiones a la misma. La lógica del sistema se diseñó además, de manera que se salga de operación sólo en condiciones sumamente críticas, en otras palabras, donde en definitivo no haya alimentación al equipo, la descarga en la batería de memoria sea mayor al 95%, o cuando ningún módulo tenga comunicación con el CPU del ControlLogix. Las situaciones anteriores hacen imposible tanto la detección como la respuesta, y al darse se entra en la secuencia contra fallas como: alarmas respectivas y condición "fail safe".

Se estableció un sistema con etapas individualizadas, para seleccionar el modo de operación que tendrán las mismas. Se obtuvieron PFD muy bajas a nivel general para el sistema, basándose en una secuencia de pruebas y mantenimiento de 90 días máximo, según el requerimiento de los detectores de llama el cual es el tiempo mínimo para mantenimiento en el sistema. De la selección del equipo y los reportes de los fabricantes se tiene que, el sistema es tan bueno como su eslabón o elemento más débil, que en el caso del lazo de seguridad de control viene a ser la fuente de alimentación (1756-PA75R), razón por la cual se determinó éste como un punto al cual aplicar redundancia, obteniéndose de aquí que la probabilidad de falla en demanda promedio más alta del sistema, y por ende, representativo del mismo es de 3.67×10^{-4} .

Mediante la comunicación Modbus se lograron conocer mejor los estados de los detectores IR400 y FL3100, para saber la confiabilidad de su señal. Mediante esta comunicación se logra, entre otras cosas, llevar un registro de algunos eventos en que caen los detectores durante su operación, conocer cual es la falla que presenta cada uno sin la necesidad de ir al campo, y en caso de ser grave corregir la situación en el menor tiempo posible.

Con el fin de aumentar la disponibilidad del enlace de comunicación inalámbrica, se definió la configuración de la comunicación serial entre el controlador ControlLogix (DTE) y el radio de comunicación. Se definieron los parámetros de la red RF y se utilizó la frecuencia libre de los 900 MHz, la cual se propaga mejor que una frecuencia de operación alternativa como lo es la 2.4GHz. Además, para lograr la máxima disponibilidad, se utilizaron: algoritmos de escucha para disponibilidad del canal de radio, reintentos de transmisión, apoyo en la técnica de FHSS y los cálculos de factibilidad del enlace.

En cuanto a la rentabilidad del proyecto, se puede indicar que una esfera de LPG tiene una capacidad de almacenamiento de aproximadamente 22 mil barriles de producto, y multiplicamos esto por el precio promedio en dólares de un barril de LPG por ejemplo en el mes de Marzo del 2009 (30 dólares), se generan 660 mil dólares, obteniendo que el costo estimado del proyecto (tabla 6.6) es menor al 10% de esta cantidad. Si se quisiera dejar un cierto margen, por el equipo menor de complemento que no se consideró, el costo no llegaría a ser ni el 20% de la cantidad generada en ventas. En el año 2009, por ejemplo, RECOPE logra comercializar más de un millón de barriles de LPG, por lo que, no cabe duda que la inversión en el proyecto de seguridad, es rentable y recuperable rápidamente con esa tendencia de ventas y precios del barril de LPG. Además, al tener un sistema de seguridad que cumple con las normas internacionales antes mencionadas, las aseguradoras disminuirían la cantidad de dinero que tendría que pagárseles por el seguro de esta área.

Capítulo VII: Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

- Tomando como base las normas de seguridad referentes a almacenamiento de LPG y sus características químicas se establecieron las cantidades de detectores, características de detección, ubicación y configuración, necesarias para la medición de los parámetros que rodean cada esfera de almacenamiento, con lo que cada esfera cuenta con 10 detectores de gas y 3 detectores de llama.
- Mediante la implementación de la red Modbus se logró conocer el estado de los detectores de gas y llama sin necesidad de ir al campo, logrando el acceso a sus registros especiales de errores, estado de memoria, porcentajes de bloqueo, entre otros, que permitan el mantenimiento de esta sub-etapa del sistema.
- Se logró el registro de 10 eventos de falla y 10 de advertencia en cada detector de llama, 10 eventos de falla en cada detector de gas, con fecha y hora de suceso para el conocimiento en el cuarto de operadores. El número de eventos se debe a la cantidad de detectores de cada tipo en el sistema y la limitante de contar con 100 comandos de programación generales permitidos en cada puerto de aplicación.
- El sistema de control se diseñó para que detecte automáticamente las fallas en su módulo de control, de manera que salga de operación únicamente cuando se presenten fallas críticas que impidan una detección y respuesta total.
- El sistema F&G de detección en las etapas diseñadas que conforman el lazo de seguridad, tiene un MTBF crítico de 610,161 y una probabilidad de falla en demanda promedio representativa de 7.39525×10^{-4} , con lo que cumple con las especificaciones para SIL2.

- Los circuitos visualización del sistema indican cuáles actuadores están en funcionamiento. Cada uno de ellos posee su alimentación manual individual y se separó el lazo de seguridad del lazo de visualización, permitiendo que las actualizaciones de la información hacia el cuarto de vigilancia se realicen automáticamente cada dos segundos, lo cual contribuirá a alargar la vida útil del radio módem al disminuir su frecuencia de uso.
- Con el fin de evitar la pérdida de datos en la comunicación inalámbrica se seleccionó una velocidad de comunicación serie entre el controlador y el módem de 9600 kbps mientras que la velocidad de la red RF se eligió en 19.2 kbps para evitar problemas de latencia.

7.2 Recomendaciones

- Con el fin de mejorar la detección de gas, resulta conveniente definir la adición de nuevos detectores, para que la superficie a cubrir para cada uno de ellos sea menor (para efectos de redundancia).
- Se recomienda un constante mantenimiento y pruebas al equipo, durante un máximo de cada 90 días, para que el sistema mantenga el SIL2.
- Se sugiere solicitar al fabricante de los actuadores finales en las válvulas de diluvio y actuadores para corte de gas, la certificación respectiva para aplicaciones SIL2. Pues los actuadores representan el 50% del nivel de integridad de seguridad en un sistema completo de F&G.
- Se recomienda en caso de presentarse nuevos problemas en la comunicación inalámbrica, buscar una alternativa diferente para dar solución al envío de estos datos. Pues el ambiente de interferencias en la empresa es cambiante e intenso, debido a los trabajos que se realizan y el equipo con que cuenta el plantel.
- Con el fin de lograr que el sistema total a implementar logre ajustarse a lo exigido por la IEC-61508, se recomienda realizar un análisis con los profesionales requeridos del proceso para ejecutar el “safety life cycle” que ésta norma sugiere.

Bibliografía

- [1] Ferrel G. Stremmer. Introducción a los Sistemas de Comunicación. 3 ed. México: Addison Wesley Iberoamericana, 1993.
- [2] Schleicher, Manfred. ***“Digital Interfaces and Bus Systems, fundamentals and practical advice for the connection of field devices to MODBUS, PROFIBUS-DP, ETHERNET, CANopen and Hart”***, 5ta Ed, JUMO, Alemania, 2005.
- [3] National Fire Protection Association. NFPA 497, **“Clasificación de líquidos, gases o vapores inflamables y de áreas para instalaciones eléctricas en atmósferas químicas”**, Estados Unidos, 2004.
- [4] International Fire Safety Consulting. **“Informe final sobre estudio de ingeniería en atmósferas inflamables y clasificación de áreas peligrosas”**, Limón, 2007.
- [5] Fernández B., Roberto. **“Sistemas de protección segura para procesos industriales”**, Sistemas DACS S.A., Argentina, 2001.
- [6] General Monitors. *Model IR400 Instruction Manual: Infrared point detector for hydrocarbon applications* [en línea]. Revisión 09-08 <<http://generalmonitors.com>> [Consulta 11 Abril 2010].
- [7] General Monitors. *Models FL3100H/FL3101H Instruction Manual: UV/IR and UV only Flame detectors* [en línea]. Fecha 01-10 <<http://generalmonitors.com>> [Consulta 13 Abril 2010].
- [8] Comunicación Serial: Conceptos Generales [en línea]. <http://digital.ni.com/public.nsf/> [Consulta 1 Mayo 2010].
- [9] Protocolo Modbus, Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Tecnología Electrónica. <http://www.dte.upct.es/personal/manuel.jimenez/docencia/GD6_Comunic_Ind/pdfs/Tema%207.pdf> [Consulta 1 Mayo 2010].

- [10] Controladores Lógicos Programables [en línea]
<<http://inggilberto.com/plc.htm>> [Consulta 21 Abril 2010].
- [11] Relés y contactores [en línea]
<<http://www2.uah.es/vivatacademia/anteriores/n50/docencia.htm>> [Consulta 12 Mayo 2010].
- [12] Válvulas solenoides [en línea]
<<http://profesores.elo.utfsm.cl/~jgb/CARVALLOVARGASc.pdf>> [Consulta 30 Abril]
- [13] Montenegro Solís, Fabián Ricardo. **“Sistema electrónico inalámbrico para la recolección y almacenamiento de datos de telemetría, con un alcance de 15 Km y alimentación independiente de la red eléctrica, para la estación meteorológica Plástico de la estación biológica La Selva”**. Proyecto de graduación. Cartago: Setiembre, 2006.
- [14] Allen Bradley. Controllogix Selection Guide [en línea]. Publicación 1756-SG001M-EN-P. Mayo 2009. <<http://literature.rockwellautomation.com>> [Consulta 1 Mayo 2010].
- [15] Prosoft Inc. RLX-IFHS RadioLinx Industrial Wireless Industrial Frequency Hopping Serial Radios [en línea]. <<http://prosoft-technology.com>> [Consulta 28 Mayo 2010].
- [16] Prosoft Inc. MVI56-MCM módulo comunicaciones Modbus. Abril 2010 [en línea]. <<http://prosoft-technology.com>> [Consulta 21 Mayo 2010].
- [17] Allen Bradley. Using ControlLogix in SIL2 Applications [en línea]. Publicación 1756-RM001F-EN-P - Junio 2009. <<http://literature.rockwellautomation.com>> [Consulta 1 Mayo 2010].
- [18] RECOPE Estadístico Ventas. “Ventas mensuales por producto 2009 BLS y Promedio precio diario Marzo 2009”, Período Enero-Diciembre 2009.
- [19] Allen Bradley. Controllogix Controllers [en línea]. Publicación 1756-UM001I-EN-P. Octubre 2009. <<http://literature.rockwellautomation.com>> [Consulta 8 Mayo 2010].

Apéndices

A.1 Glosario, abreviaturas y simbología

Glosario

Enlace: Trayecto de telecomunicaciones que sirve para conectar dos puntos específicos en la red.

Estándar ANSI: Establecido por el Instituto Nacional estadounidense de Estándares.

Estándar NEMA: Establecido por la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos.

Failsafe: Disparo innecesario de un sistema de seguridad que provoca una acción protectora injustificada.

Ganancia Antena: Relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y la densidad de potencia que radiaría una antena isotrópica, a igualdad de distancias y potencias entregadas a la antena.

Half-duplex: Comunicación bidireccional que no puede ser simultánea.

Modbus (RTU): Modbus (unidad terminal remota). Protocolo de comunicaciones desarrollado por la compañía Americana Gould-Modicon especialmente para procesos. Su uso es libre.

Protocolo: Conjunto de reglas que se establecen entre dispositivos que establecen una comunicación con el fin de asegurar que los mensajes lleguen de forma correcta.

Radiofrecuencia: Frecuencias de las ondas electromagnéticas empleadas en la radio comunicación.

Red: Conjunto de dispositivos interconectados físicamente (vía alámbrica o inalámbrica), que comparten recursos y se comunican entre sí mediante protocolos (reglas).

RS-232: Interfaz de comunicación para intercambio serie de datos binarios.

Transformador eléctrico: Es un dispositivo eléctrico capaz de elevar y disminuir la tensión eléctrica, transformar la frecuencia (Hz), equilibrar o desequilibrar circuitos eléctricos.

Abreviaturas

API: Instituto Americano de Petróleo.

CRC: Comprobación de redundancia cíclica.

dB: Decibeles, unidad de potencia.

DF1: Protocolo de comunicaciones serie propio de dispositivos Allen Bradley.

FHSS: Frequency Hopping Spread Spectrum.

FM: Factory Mutual.

HAZAN: Hazard Analysis, o, análisis de riesgos

HAZOP: Hazards and Operability Analysis, o, análisis de riesgos y operabilidad.

HMI: Human Machine Interface, es decir, Interfaz Humano-Máquina.

IEC: Comisión Internacional Electrotécnica.

IR: Radiación Infrarroja.

LEL: Lower Explosive Level, lo que quiere decir, Límite inferior de explosividad.

LPG: Liquefied petroleum gas, lo que quiere decir, gas licuado de petróleo.

MTBF: Mean time between failures. Representa el tiempo promedio que pasará antes que se presenten dos fallas.

NFPA: National Fire Protection Association

PESC: Programmable Electronic Safety Controller

PFD: Probability of failure on demand, lo que quiere decir, probabilidad de falla en demanda.

PLC: Controlador Lógico Programable, en inglés, Programmable Logic Controller.

PLC5: Familia de controladores de la casa Rockwell Automation.

psi: pound per square inch, lo que quiere decir, libras por pulgada cuadrada y equivale a 6894,76 Pa aproximadamente.

RECOPE: Refinería Costarricense de Petróleo

RTU: Remote terminal unit, o, unidad terminal remota.

SIC: Sistema contra incendios.

SIL: Safety Integrity Level, lo que quiere decir, nive de seguridad intrínseca.

SIS: Safety instrumented system, lo que quiere decir, sistema integrado de seguridad

Sistema F&G: Sistema fuego y gas

UL: Underwriters Laboratories Inc.

UV: Radiación ultravioleta.

Simbologías

d: Distancia de separación de la zona a detectar para los detectores FL3100

g: Ganancia detectores FL3100, cuantos [m] de detección se ganan por la distancia d.

SFL: Detector de llama superior

IFLN: Detector llama inferior norte

IFLS: Detector llama inferior norte

S(I)NE: Superior (Inferior) Noreste

S(I)NO: Superior (Inferior) Noroeste

S(I)SO: Superior (Inferior) Suroeste

S(I)SE: Superior (Inferior) Sureste

S(I)N: Superior (Inferior) Norte

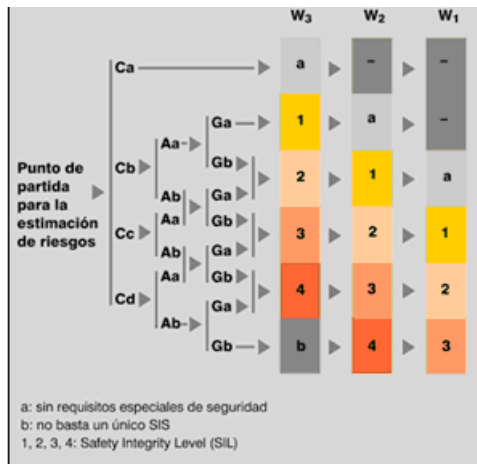
S(I)S: Superior (Inferior) Sur

Anexos

B.1 Determinación cualitativa SIL

Para establecer el nivel requerido de un sistema de seguridad se debe considerar:

Severidad de consecuencias si el sistema falla, probabilidad de que el personal sea expuesto al riesgo, medidas de mitigación para reducir las consecuencias del evento de riesgo y frecuencia con que se requiere que actúe el sistema de seguridad.



Grado de los daños	
Ca	Lesiones leves de una persona, pequeños daños medioambientales
Cb	Lesiones graves o muerte de una persona
Cc	Muerte de varias personas
Cd	Muerte de muchas personas
Duración de la estancia de una persona en la zona peligrosa	
Aa	Ocasional a frecuente
Ab	Frecuente a permanente
Eliminación del peligro	
Ga	Posible en determinadas condiciones
Gb	Apenas posible
Probabilidad de ocurrencia	
W1	Muy reducida
W2	Reducida
W3	Relativamente alta

Figura B.1.1 Método cualitativo para la determinación del SIL [5]

Ante la falta de un estudio de seguridad previo de este tipo, para establecer el grado necesario de seguridad intrínseca del sistema, se aplicó el método cualitativo de la figura B.1.1 con personal de la empresa, más precisamente al Ing. Pablo Gutiérrez Pérez, el cual eligió los siguientes factores:

Grado de los daños: Cd-Muerte de muchas personas. Duración de la estancia de una persona en la zona peligrosa: Aa-Ocasional a frecuente. Eliminación del peligro: Ga-Posible en determinadas condiciones. Probabilidad de ocurrencia: W2-Muy reducida.

Por lo que, utilizando la matriz del método cualitativo para determinar el SIL, se obtuvo que el grado SIL de la actividad requerido sea SIL2. Es importante señalar que, debido a que el grado SIL se determina como el grado más bajo de cada uno de los elementos que componen el lazo de seguridad, y las limitaciones que se tuvieron a la hora de realizar la investigación para lograr el acceso al estándar IEC 61508 (al no ser su acceso libre sino restringido a compra), y no contarse con este en la empresa, el proyecto se limitó a la utilización del equipo disponible en el mercado certificado como apto para operaciones de nivel SIL2 o mayores. Según el resultado que se obtuvo a la hora de establecer el grado SIL de la actividad realizada en el área de almacenamiento de gas LPG.

B.2 Equipo permitido por clasificación Clase I, División

En las áreas clasificadas como: Clase I, División 1 (NFPA 497: 4.1.3.1 y 5.2.1.1) podrán ser utilizados equipos de las siguientes características:

Encerramientos a prueba de explosión

Equipos a presión.

Circuitos de seguridad intrínseca. (NFPA 497: 4.1.5.1)

Seguridad aumentada

Además como lo dicta la norma NFPA 70E: 440.3 (B) (2) y (E) (3), los equipos identificados para operar en un lugar División 1 se permitirán en uno División 2, de la misma clase y grupo.

En las áreas clasificadas como: Clase I, División 2 (NFPA 497: 4.1.3.2 y 5.2.2), podrán ser utilizados equipos de las siguientes características:

Encerramientos a prueba de explosión, equipos a presión, y circuitos de seguridad intrínseca. (NFPA 497: 4.1.5.1).

Equipos no-inflamables (NFPA 497: 4.1.5.2).

Equipo que no hace chispa eléctrica y otros equipos menos restrictivos según lo específica NEC ®.

Además como lo dicta la norma NFPA 70E: 440.3 (B) (2) y (E) (3) los equipos identificados para operar en un lugar División 1 se permitirá en uno División 2 de la misma clase y grupo.

Todos estos equipos preferiblemente certificados por UL, FMA, CSA o ATEX.

B.3 Esquema de registros

La tabla B.3.1 muestra el esquema de los registros principales de la aplicación y sus significados a nivel de bits:

Tabla B.3.1 Descripción de los valores y registros principales que utiliza el programa

Registro	MSB 7	6	5	4	3	2	1	0	Comentario
Falla mayor	Procesador	Bateria 95%	Keyswitch	Todos los módulos en falla	Libre	Libre	Libre	Libre	Detalla estados de falla mayor y se utiliza para avisos
Comunic Error	Módulo S digitales	Módulo E1 analógicas	módulo E2 analógicas	Módulo E digitales	Libre	Libre	Libre	Libre	Detalla fallas backplane y RPI timeout
Canal Entrada1 H (analógicas)	Falla Canal E 15 IR400-SNE	Falla Canal E 14 IR400-SNO	Falla Canal E 13 IR400-SSE	Falla Canal E 12 IR400-SSO	Falla Canal E 11 IR400-INE	Falla Canal E 10 IR400-INO	Falla Canal E 9 IR400-ISE	Falla Canal E 8 IR400-ISO	Mantiene el estado de disponibilidad
Canal Entrada1 L (analógicas)	Falla Canal E 7 IR400-Fosa1	Falla Canal E 6 IR400-Fosa2	Falla Canal E 5 SFL	Falla Canal E 4 IFLN	Falla Canal E 3 IFLS	Falla Canal E 2 Temp SN	Falla Canal E 1 Temp SS	Falla Canal E 0 Temp IN	o falla de cada canal de entrada
Canal Entrada2 H (analógicas)	Falla Canal E 15 Libre	Falla Canal E 14 Libre	Falla Canal E 13 Libre	Falla Canal E 12 Libre	Falla Canal E 11 Libre	Falla Canal E 10 Libre	Falla Canal E 9 Libre	Falla Canal E 8 Libre	Mantiene el estado de disponibilidad
Canal Entrada2 L (analógicas)	Falla Canal E 7 Libre	Falla Canal E 6 Libre	Falla Canal E 5 Libre	Falla Canal E 4 Libre	Falla Canal E 3 Presión inferior	Falla Canal E 2 Presión superior	Falla Canal E 1 Nivel tanque	Falla Canal E 0 Temp IS	o falla de cada canal de entrada
Canal Entrada3 H (digitales)	Falla Canal E 15 Libre	Falla Canal E 14 Libre	Falla Canal E 13 Libre	Falla Canal E 12 Libre	Falla Canal E 11 CorteGas activo	Falla Canal E 10 Lanzaagua2 activo	Falla Canal E 9 Lanzaagua1 activo	Falla Canal E 8 Columna activo	Mantiene el estado de disponibilidad
Canal Entrada3 L (digitales)	Falla Canal E 7 Anillos2 activo	Falla Canal E 6 Anillos1 activo	Falla Canal E 5 CorteGas Auto	Falla Canal E 4 CorteGas Manual	Falla Canal E 3 Incendio Auto	Falla Canal E 2 Incendio Manual	Falla Canal E 1 Refrig Auto	Falla Canal E 0 Refrig Manual	o falla de cada canal de entrada

Canal Salida H	Falla Canal S 15 Refrig Principal	Falla Canal S 14 Refrig Redundante	Falla Canal S 13 Incendio1 Principal	Falla Canal S 12 Incendio1 Redundante	Falla Canal S 11 Incendio2 Principal	Falla Canal S 10 Incendio2 Redundante	Falla Canal S 9 CorteGas1 Principal	Falla Canal S 8 CorteGas1 Redundante	Mantiene el estado de disponibilidad
Canal Salida L	Falla Canal S 7 CorteGas2 Principal	Falla Canal S 6 CorteGas2 Redundante	Falla Canal S 5 Alarma Sonora 1	Falla Canal S 4 Alarma Sonora 2	Falla Canal S 3 Libre	Falla Canal S 2 Libre	Falla Canal S 1 Libre	Falla Canal S 0 Libre	o falla de cada canal de salida
Dinformación H	Activaagua	Cortegas	Fuente 2	Fuente 1	Error Gas	Estado Lanzaagua2	Estado Lanzaagua1	Estado Columnas	Estados leídos para información del sistema
Dinformación L	Estado anillos 2	Estado anillos 1	Error Gas	Estado Gas	Error Incendio	Estado Incendio	Error Refrig.	Estado Refrig.	Estados leídos para información del sistema
Actuador sin respuesta	Refrig.	Contra Incendio 1	Contra Incendio 2	Corte Gas 1	Corte Gas 2	Alarmas	Libre	Libre	Parejas de salidas que no dan respuesta en actuadores
Field Salida Diagnóstico H	Resultado Field Side Refrig Principal	Resultado Field Side Refrig Redundante	Resultado Field Side Incendio1 Principal	Resultado Field Side Incendio1 Redundante	Resultado Field Side Incendio2 Principal	Resultado Field Side Incendio2 Redundante	Resultado Field Side CorteGas1 Principal	Resultado Field Side CorteGas1 Redundante	Reporta si la salida es capaz de
Field Salida Diagnóstico L	Resultado Field Side CorteGas2 Principal	Resultado Field Side CorteGas2 Redundante	Resultado Field Side Alarma Sonora 1	Resultado Field Side Alarma Sonora 2	Resultado Field Side 3 Libre	Resultado Field Side 2 Libre	Resultado Field Side 1 Libre	Resultado Field Side 0 Libre	responder para activar el actuador
Switch Principal	Refrig.	Contra Incendio 1	Contra Incendio 2	Corte Gas 1	Corte Gas 2	Libre	Libre	Libre	0 = salida principal 1= salida redundante
Warning & H Alarma E1	IR400-SNE	IR400-SNO	IR400-SSE	IR400-SSO	IR400-INE	IR400-INO	IR400-ISE	IR400-ISO	Deshabilita o habilita el detector relacionado
Warning & L Alarma E1	IR400-FOSA1	IR400- FOSA2	SFL	IFLN	IFLS	Temp SN	Temp SS	Temp IN	con esta entrada para dar advertencias y alarmas

Warning & Alarma E2	Libre	Libre	Libre	Libre	Presión Inferior	Presión Superior	Nivel tanque	Temp IS	Deshabilita o habilita entrada para advertencias y alarmas
Agasdetectado	IR400-SNE	IR400-SNO	IR400-SSE	IR400-SSO	IR400-INE	IR400-INO	IR400-ISE	IR400-ISO	Indica si algún detector lee más de 60% LEL
Wgasdetectado	IR400-SNE	IR400-SNO	IR400-SSE	IR400-SSO	IR400-INE	IR400-INO	IR400-ISE	IR400-ISO	Indica si algún detector lee más de 20% LEL
Fgasdetectado	IR400-SNE	IR400-SNO	IR400-SSE	IR400-SSO	IR400-INE	IR400-INO	IR400-ISE	IR400-ISO	Indica cual detector tiene lectura igual a 0mA
FMgasdetectado	IR400-SNE	IR400-SNO	IR400-SSE	IR400-SSO	IR400-INE	IR400-INO	IR400-ISE	IR400-ISO	Indica cual detector tiene lectura de entre 0 mA a 2 mA
WFFMfosa	Falla menor Fosa 2	Falla Mayor Fosa2	Advertencia Fosa2	Alarma Fosa2	Falla menor Fosa 1	Falla Mayor Fosa1	Advertencia Fosa1	Alarma Fosa1	Registra el estado del detector de la fosa
Afuego_ detectado	SFL	IFLN	IFLS	Libre	Libre	Libre	Libre	Libre	Indica si hay algún detector en alarma o no.
Wfuego_ detectado	SFL	IFLN	IFLS	Libre	Libre	Libre	Libre	Libre	Indica si hay algún detector en advertencia o no.
Falla_ detector fuego	SFL	IFLN	IFLS	Libre	Libre	Libre	Libre	Libre	Indica si hay algún detector falla o no.

B.4 Distribución del plantel en Moín

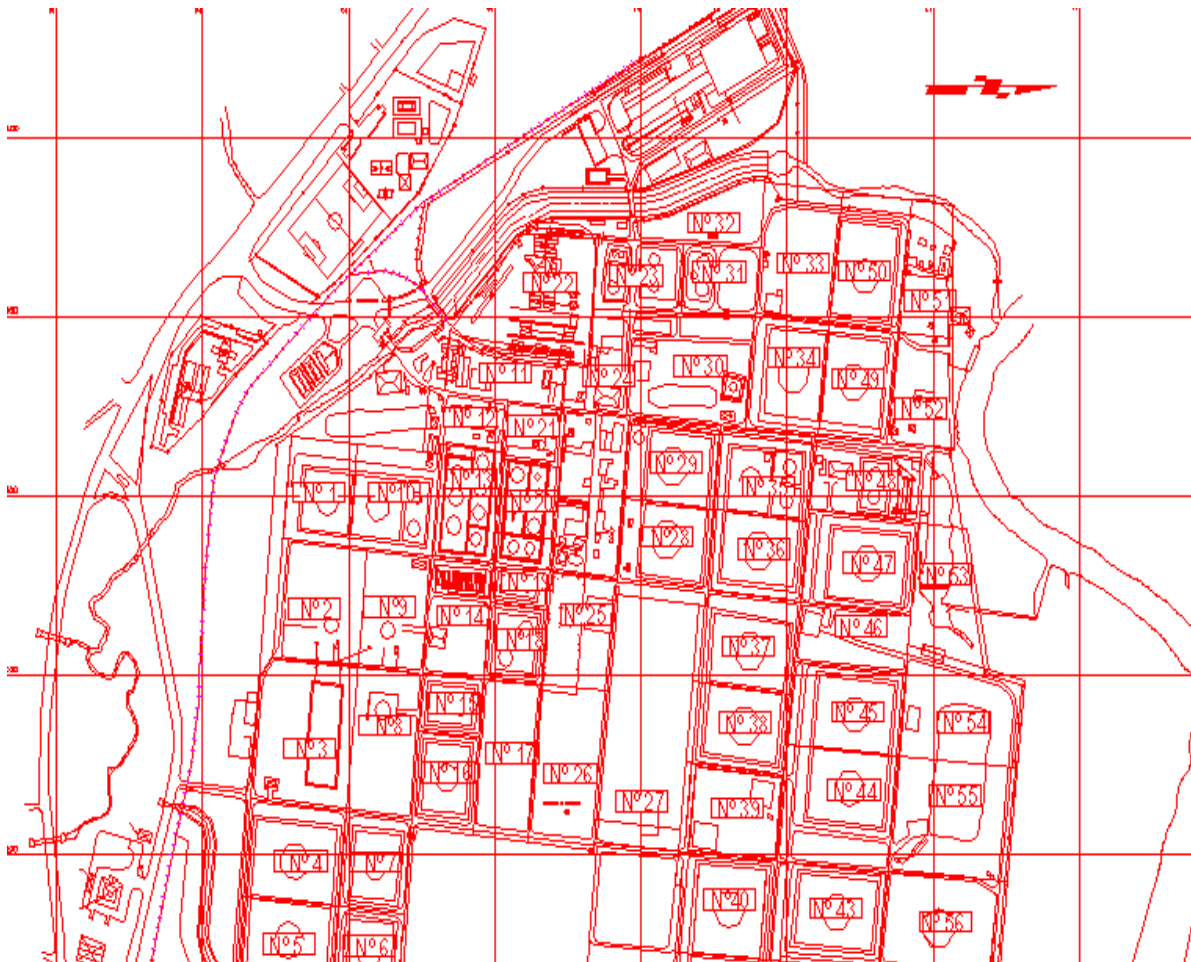


Figura B.6.1 Distribución del plantel en Moín²⁰

El área del proyecto se muestra en la figura B.6.1, donde se plantea expandir la zona de almacenamiento, en donde se enmarcan las esferas del plantel en los cuadrantes rotulados como:

N°2: esfera 770

N°8: esfera 7710

N°9: esfera 771 y cuarto LPG

N°14: salchichas de almacenamiento

²⁰ Tomado de planos realizados por la IFSC para RECOPE, 2007