



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**IMPORTANCIA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE ANÁLISIS HAZOP Y
MÉTODOS CUANTITATIVOS PARA ANÁLISIS DE RIESGOS EN PLANTAS DE
CICLO COMBINADO EN MÉXICO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**

PRESENTA

DANIELA MUÑIZ ROJAS

DIRECTORA DE TESIS

DRA. PAMELA FRAN NELSON EDELSTEIN





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: MODESTO JAVIER CRUZ GOMEZ

VOCAL: ALFONSO DURAN MORENO

SECRETARIO: PAMELA NELSON EDELSTEIN

1er. SUPLENTE: OSCAR DE ANDA AGUILAR

2° SUPLENTE: ALEJANDRA MENDOZA CAMPOS

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

LABORATORIO LAIRN, ANEXO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

ASESOR DEL TEMA:

DRA. PAMELA FRAN NELSON EDELSTEIN

SUSTENTANTE:

DANIELA MUÑIZ ROJAS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	2
ÍNDICE DE FIGURAS.....	4
ÍNDICE DE TABLAS	6
ABSTRACT	7
OBJETIVO.....	7
Capítulo I. Introducción	8
Capítulo II. Marco Teórico.....	10
2.1 Centrales de Ciclo Combinado	10
a. Principio de Funcionamiento.....	10
b. Principales Equipos y Sistemas	13
c. Impacto Ambiental	18
d. Centrales de CC en México	23
e. Incidentes y Fallas	25
2.2 Gas Natural	26
a. Generalidades del Gas Natural.....	26
b. Usos del Gas Natural.....	27
c. Riesgos del Gas Natural	28
2.3 Riesgo.....	29
a. Concepto de Riesgo	30
b. Clasificación de Riesgos	30
2.4 Métodos de Análisis de Riesgos.....	31
a. Análisis HAZOP.....	32
b. Árbol de Eventos	35
c. Árbol de Fallas.....	37
2.5 Normatividad	39
a. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.....	40
b. NOM-028-STPS-2012	43
c. Otros.....	44
Capítulo III. Análisis y Recomendación	45
3.1 Descripción y Justificación del Nodo Elegido.....	45
a. Justificación de Elección de la Unidad de Proceso	45
b. Características Generales de la Central de CC	46
c. Características Generales y Componentes del Sistema de Suministro de Gas	46

3.2 Análisis HAZOP	48
3.3 Árbol de Eventos	52
3.4 Árbol de Fallas	54
a. Cut Set 1 – Alta Presión por Obstrucción no Detectada.....	58
b. Cut Set 2 – Baja (o Nula) Presión no Detectada	60
c. Cut Set 3 – Alta Presión por Obstrucción no Detectada.....	58
3.5 Implicaciones y Recomendación	63
a. Impacto Económico	64
b. Impacto en Seguridad.....	65
c. Impacto Ambiental y Regulación.....	66
d. Recomendación.....	68
Capítulo IV. CONCLUSIONES.....	69
Trabajo Futuro.....	70
Insights.....	71
APÉNDICE A – TABLAS MARCO TEÓRICO	72
APÉNDICE B - ANÁLISIS HAZOP	77
APÉNDICE C – ÁRBOLES DE EVENTOS	83
NODO 1 – Línea de Suministro de Gas	83
NODO 2 - Filtro 561-SKD-9002	86
NODO 3 – Estación de Regulación de Presión.....	88
NODO 4 – Patín Consolidado para Acondicionamiento de Gas.....	90
NODO 5 – Línea de Suministro de Gas a Sistema HRSG	93
APÉNDICE D – ÁRBOLES DE FALLAS	94
APÉNDICE E – DIAGRAMAS DE PROCESO	¡Error! Marcador no definido.
ABREVIATURAS	104
REFERENCIAS	107

ÍNDICE DE FIGURAS

<u>Figura 2.1.a.</u> Elementos constitutivos principales del ciclo combinado básico	11
<u>Figura 2.1.b.</u> Diagrama del ciclo Brayton teórico (en negro) y real (en azul),	12
<u>Figura 2.1.c.</u> Diagrama T-S de un ciclo de Rankine con vapor de alta presión sobrecalentado.....	13
<u>Figura 2.1.d</u> Funcionamiento de la ERM.....	14
<u>Figura 2.1.e.</u> Diagrama de bloques de los principales componentes de un CC.....	18
<u>Figura 2.1.f.</u> Ejemplo de pluma de vapor.....	20
<u>Figura 2.1.g.</u> Capacidad Instalada por Tipo de Tecnología 2015 (<i>Porcentaje</i>).....	24
<u>Figura 2.1.h.</u> Capacidad Instalada del SEN por Modalidad 2015 (<i>MW, Porcentaje</i>)....	24
<u>Figura 2.1.i.</u> Capacidad y Generación en Centrales de CC en México 2015) [MW / GWh]	25
<u>Figura 2.2.b.</u> Demanda Nacional de Combustibles, 2014	28
<u>Figura 2.4.b.</u> Protocolo típico de las reuniones HAZOP	35
<u>Figura 2.4.c.</u> Ejemplo de Árbol de Eventos	37
<u>Figura 2.4.d.</u> Ejemplo de Árbol de Fallas	39
<u>Figura 2.5.a.</u> Diagrama para la determinación del Nivel del Estudio de Riesgo.....	41
<u>Figura 2.5.b.</u> Listado de sustancias químicas peligrosas en la NOM-028-STPS-2012	44
<u>Figura 3.3.b.</u> Secuencia para activación de válvula maestra y válvula de venteo.....	53
<u>Figura 3.4.d1.</u> Árbol de Eventos Original – Cut Set 1	59
<u>Figura 3.4.d2.</u> Árbol de Eventos con Salvaguardia Propuesta – Cut Set 1	59
<u>Figura 3.4.d3.</u> Árbol de Fallas de la Salvaguardia Propuesta – Cut Set 1	59
<u>Figura 3.4.f1.</u> Árbol de Eventos Original – Cut Set 2.....	61
<u>Figura 3.4.f2.</u> Árbol de Eventos con Salvaguardia Propuesta – Cut Set 2.....	61
<u>Figura 3.4.f3.</u> Árbol de Fallas de la Salvaguardia Propuesta – Cut Set 2	61
<u>Figura 3.4.g1.</u> Árbol de Eventos Original – Cut Set 3.....	62
<u>Figura 3.4.g2.</u> Árbol de Eventos con Salvaguardia Propuesta – Cut Set 3.....	62
<u>Figura 3.4.g3.</u> Árbol de Fallas de la Salvaguardia Propuesta – Cut Set 3	63
<u>Figura 3.5.a.</u> Radio del área afectada como función del diámetro y la presión.....	66
<u>Figura 3.5.b.</u> Fragmento del Reglamento Federal de Seguridad y Salud en el Trabajo.....	67
<u>Figura 3.3.1.</u> E11 Válvula de Venteo Falla - Abierta (con Frecuencia de Falla por Secuencia)	84
<u>Figura 3.3.2.</u> E12 Fuga de Gas (con Frecuencia de Falla por Secuencia)	84
<u>Figura 3.3.3.</u> E13 Alta Presión (con Frecuencia de Falla por Secuencia).....	85
<u>Figura 3.3.4.</u> E14 Válvula Maestra Falla – Cerrada (con Frecuencia de Falla por Secuencia)	85

<u>Figura 3.3.5.</u> E15 Baja/Nula Presión (con Frecuencia de Falla por Secuencia).....	86
<u>Figura 3.3.6.</u> E16 Obstrucción de Líneas (con Frecuencia de Falla por Secuencia).....	86
<u>Figura 3.3.7.</u> E21 Baja Calidad de Gas (alto contenido de agua, partículas y líquidos)	87
<u>Figura 3.3.8.</u> E22 Válvula de Drene (561-LCV-9002) Falla – Abierta	87
<u>Figura 3.3.9.</u> E23 Alta Presión (de instalación previa).....	87
<u>Figura 3.3.10.</u> E24 Fuga de Gas en Filtro 561-SKD-9002.....	88
<u>Figura 3.3.11.</u> E25 Obstrucción de Líneas o Equipos	88
<u>Figura 3.3.12.</u> E31 Fuga de Gas en 1er Rama.....	89
<u>Figura 3.3.13.</u> E32 Fuga de Gas en 2da Rama.....	89
<u>Figura 3.3.14.</u> E33 Fuga de Gas en 3er Rama.....	89
<u>Figura 3.3.15.</u> E34 Obstrucción de Líneas o Equipos	90
<u>Figura 3.3.16.</u> E35 Alta Presión (de sección previa)	90
<u>Figura 3.3.17.</u> E36 Baja/Nula Presión (de sección previa)	90
<u>Figura 3.3.18.</u> E41 Fuga de Agua en Tubo del Calentador de Desempeño	91
<u>Figura 3.3.19.</u> E42 Falla en Bomba de Alimentación de Agua de la Sección de Presión Intermedia (IP) o Baja Temperatura	91
<u>Figura 3.3.20.</u> E43 Baja Calidad de Gas (alto contenido de agua, partículas y líquidos)	92
<u>Figura 3.3.21.</u> E44 Baja/Nula Presión de Gas.....	92
<u>Figura 3.3.21.</u> E44 Fuga de Gas en Patín de Acondicionamiento	92
<u>Figura 3.3.22.</u> E45 Alta Presión de Gas.....	93
<u>Figura 3.3.23.</u> E46 Obstrucción de Líneas o Equipos	93
<u>Figura 3.3.24.</u> E47 Alta Temperatura de Gas en el Calentador de Desempeño.....	93
<u>Figura 3.3.25.</u> E51 Fuga de Gas en Línea de Suministro a HRSG.....	94
<u>Figura 3.3.26.</u> E52 Baja Calidad de Gas (alto contenido de agua, partículas y líquidos)	94
<u>Figura 3.3.27.</u> E53 Alta Presión (proveniente de sección previa)	94
<u>Figura 5.1.</u> Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) de la Central de Ciclo Combinado..	98
<u>Figura 5.2.</u> Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI) del Sistema de Suministro de Gas (1 de 4).....	100
<u>Figura 5.3.</u> DTI del Sistema de Suministro de Gas (2 de 4)	102
<u>Figura 5.4.</u> DTI del Sistema de Suministro de Gas (3 de 4)	104
<u>Figura 5.5.</u> DTI del Sistema de Suministro de Gas (4 de 4)	106

ÍNDICE DE TABLAS

<u>Tabla 2.1.a.</u> Resumen de principales sustancias empleadas en centrales de CC, riesgos e impacto ambiental.....	73
<u>Tabla 2.1.b.</u> Centrales de ciclo combinado en operación al cierre de 2015 en México.....	75
<u>Tabla 2.2.a.</u> Composición química del gas natural	27
<u>Tabla 2.4.a.</u> Palabras guía más utilizadas en HAZOP	34
<u>Tabla 3.2.a.</u> Análisis HAZOP Nodo 1 - Línea de Suministro de Gas	49
<u>Tabla 3.4.c1.</u> Conjuntos de Corte para Nodo 1	56
<u>Tabla 3.4.c2.</u> Conjuntos de Corte por Estado Final	57
<u>Tabla 3.4.d4.</u> Lógica y Probabilidad de Falla para la Salvaguardia Propuesta – Cut Set 1 ...	60
<u>Tabla 3.4.e.</u> Costos Estimados para Plantas de CC	60
<u>Tabla 3.4.f4.</u> Lógica y Probabilidad de Falla para la Salvaguardia Propuesta – Cut Set 2	61
<u>Tabla 3.4.g4.</u> Lógica y Probabilidad de Falla para la Salvaguardia Propuesta – Cut Set 3.....	63
<u>Tabla 3.2.b.</u> Análisis HAZOP Nodo 2 - Filtro 561-SKD-9002.....	79
<u>Tabla 3.2.c.</u> Análisis HAZOP Nodo 3 - Estación de Regulación de Presión	80
<u>Tabla 3.2.d.</u> Análisis HAZOP Nodo 4 - Patín Consolidado para Acondicionamiento de Gas ..	81
<u>Tabla 3.2.e.</u> Análisis HAZOP Nodo 5 - Línea de Suministro a Sistema HRSG	83
<u>Tabla 3.3.a.</u> Algunas ventajas y desventajas del análisis HAZOP.....	51
<u>Tabla 3.3.b.</u> Algunas ventajas y desventajas de los Árboles de Eventos	52
<u>Tabla 3.3.c.</u> Algunas ventajas y desventajas de los Árboles de Fallas.....	55
<u>Tabla 3.4.a.</u> Probabilidad de Falla por Árbol de Fallas.....	95
<u>Tabla 3.4.b.</u> Eventos Iniciaadores.....	95
<u>Tabla 3.4.c.</u> Lógica de Árboles de Fallas con Probabilidad para Eventos Básicos.....	96

ABSTRACT

Los análisis de riesgo son herramientas necesarias para mejorar la seguridad y la confiabilidad en la operación de las industrias. Los análisis cualitativos tipo HAZOP se emplean actualmente en centrales de Ciclo Combinado en México; sin embargo, existen métodos cuantitativos de análisis probabilístico de seguridad que emplean el Árbol de Fallas y el Árbol de Eventos, los cuales pueden tener un impacto positivo adicional para esta industria en los ámbitos económico, ambiental y de seguridad. En el presente trabajo se muestra el impacto positivo que la aplicación conjunta de análisis HAZOP con métodos cuantitativos puede tener para las centrales de Ciclo Combinado a través de un ejemplo práctico de aplicación.

Risk analysis is a necessary tool for the improvement of safety and operation reliability in industries. HAZOP qualitative analyses are currently used in Combined Cycle plants in Mexico. However, there are quantitative methods for probabilistic safety analysis that use Fault Trees and Event Trees, which can have an additional positive impact for the industry on the economic, environmental, and safety areas. The present work shows the positive impact that the joint application of HAZOP and quantitative methods can have for Combined Cycle plants, through a practical example of application.

OBJETIVO

Que el presente trabajo sirva como referencia a estudiantes, ingenieros y profesionistas interesados en el análisis de riesgos en centrales de Ciclo Combinado en operación. Mostrar los potenciales beneficios en los ámbitos de seguridad, ambiente e impacto económico que los análisis HAZOP, junto con los métodos cuantitativos de análisis de riesgos, pueden brindar a esta industria a través de un ejemplo práctico de aplicación de los análisis.

Capítulo I. Introducción

La energía eléctrica es un insumo primario para la realización de las actividades productivas, de transformación y servicios en el país. El suministro eficiente promueve la competitividad y la capacidad de las empresas e industrias para producir más y mejores bienes y servicios, lo que tiene impacto directo sobre el crecimiento económico. La energía eléctrica resulta indispensable también para los consumidores. Al garantizar el abasto de forma continua y segura, se permite el acceso a bienes y servicios básicos, con lo que se eleva el bienestar y la calidad de vida de la población. Aunado a esto, la industria eléctrica mexicana ha tenido un crecimiento dinámico en los últimos años, lo que representa en promedio 1.8% del PIB nacional en la última década (PRODESEN 2016-2030).

El sector energético se enfrenta a importantes cambios, como la reducción de fuentes de energías fósiles, mayor demanda de energía, el compromiso del cuidado del medio ambiente y la mitigación de los efectos del cambio climático. Todo ello obliga a las empresas públicas y privadas de este sector a ser competitivas y eficientes. A partir de la Reforma Energética ha habido un gran interés por más y mejores formas para producir energía; una de ellas ha sido la generación de electricidad en centrales de Ciclo Combinado a partir de gas natural.

Actualmente el gas natural es un combustible clave para el desarrollo de los países por su eficiencia energética, bajas emisiones de partículas contaminantes, abundancia y múltiples usos. Los Ciclos Combinados, que en su mayoría emplean gas natural como combustible, generan el 50% de la energía eléctrica de México, lo que los convierte en la tecnología más empleada en el país. México cuenta con 63 centrales en operación, pero ya se cuenta con varios proyectos¹ para adaptar viejas centrales eléctricas para funcionar con gas natural a través de ciclos combinados, así como para construir nuevas centrales.

¹ Para mayor información consultar: PRODESEN 2016-2030, Prospectiva del Sector Eléctrico 2015-2029, Prospectiva de Gas Natural y Gas L.P. 2015-2029 y el Programa Sectorial de Energía 2013-2018.

Por todo lo anterior, resulta prioritario invertir recursos para asegurar el funcionamiento seguro y eficiente en este tipo de centrales. Una manera de lograrlo es mediante la aplicación de estudios de riesgos de tipo HAZOP junto con métodos cuantitativos como los árboles de eventos y árboles de fallas. En el presente trabajo se presenta un análisis de los beneficios que estos estudios pueden implicar en diversas áreas, a través de un ejemplo práctico de aplicación de estos estudios.

Capítulo II. Marco Teórico

2.1 Centrales de Ciclo Combinado

a. Principio de Funcionamiento

Las centrales eléctricas de Ciclo Combinado (CC) se caracterizan por emplear usualmente gas natural como combustible primario; sin embargo, pueden utilizar también diésel o algún combustible alternativo. Las centrales de ciclo combinado con base en gas natural tienen mayor eficiencia térmica y emiten la mitad de CO₂ en comparación con las centrales termoeléctricas con base en carbón. Además, son más rápidas de construir, poseen menor oposición o resistencia de las localidades aledañas y su costo de capital es inferior. Las plantas que emplean gas también ofrecen mayor flexibilidad que las plantas de carbón en términos de adaptar su nivel de producción a la variabilidad existente en el sistema eléctrico, asociada con el aumento en el uso de fuentes intermitentes de generación (eólica y fotovoltaica).

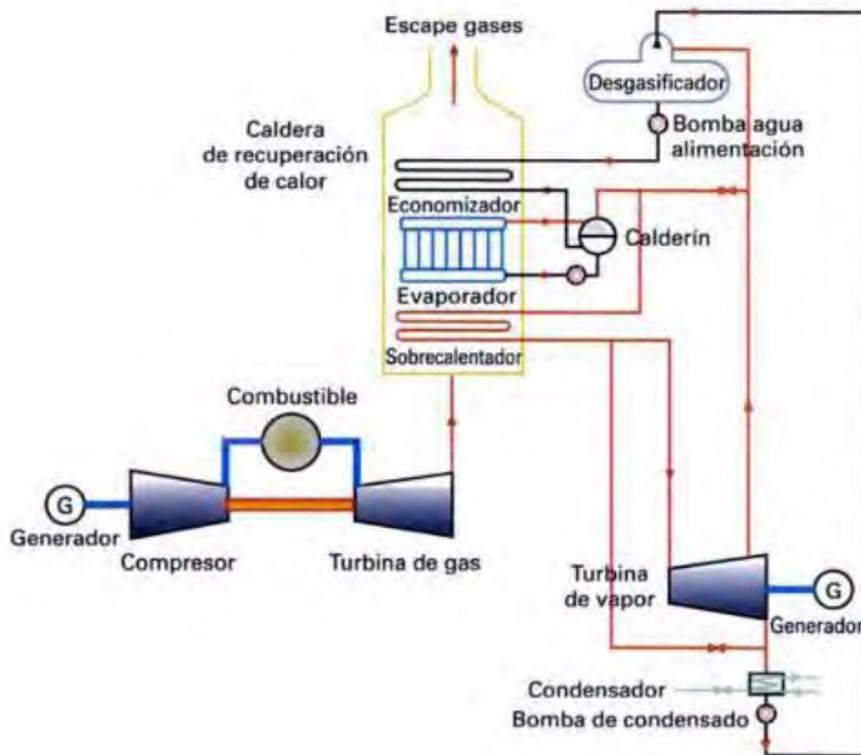
Las centrales de ciclo combinado con turbinas de gas y de vapor se basan en el acoplamiento de dos ciclos de potencia diferentes, de tal forma que el calor de desperdicio producido por uno de los ciclos se usa totalmente como fuente de calor para el otro ciclo. Los ciclos empleados son el ciclo Brayton (o ciclo Joule) y el ciclo Rankine.

El proceso de generación es similar al de centrales de turbogás, donde el combustible se mezcla con aire comprimido dentro de una cámara para dar paso a la combustión, que produce una mezcla de gases a una temperatura de entre 1100 y 1500 K. Los gases de combustión se expanden en la turbina de gas y de esta manera se obtiene trabajo útil en el ciclo de la turbina de gas.

La diferencia con las centrales de gas radica en que antes de enviar los gases de combustión hacia la atmósfera, se hacen pasar a través del recuperador de calor, o caldera de recuperación (HRSG), donde ceden su energía para calentar y evaporar agua, generando vapor sobrecalentado. Dicho vapor se expande en la turbina de vapor, en un proceso similar al de las centrales térmicas convencionales. Las turbinas se conectan a su vez con un generador eléctrico. Existen múltiples configuraciones y número de turbinas

posibles para el sistema de generación. En la Figura 2.1.a. se aprecian los principales elementos constitutivos del ciclo combinado básico.

Figura 2.1.a. Elementos constitutivos principales del ciclo combinado básico



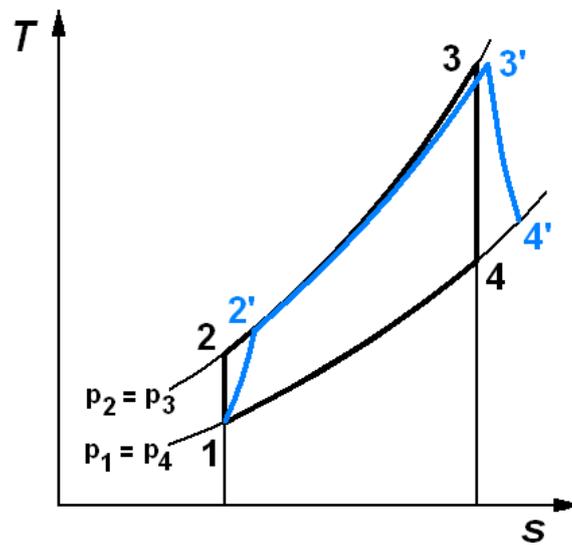
Fuente: Sabugal García

i) Ciclo Joule o Ciclo Brayton

La turbina de gas de una central de ciclo combinado es una turbina de gas de ciclo abierto y termodinámicamente es una aplicación del ciclo Brayton, el cual se observa en la Figura 2.1.b. Su rendimiento depende exclusivamente de la relación de presiones y no del calor suministrado. La evolución que sigue el fluido consta básicamente de las siguientes etapas:

- Una etapa de compresión, efectuada por un compresor, lo más isoentrópica posible.
- Una etapa de aportación de calor a presión constante (combustión).
- Una etapa de expansión, realizada por una turbina, lo más isoentrópica posible.
- Una etapa de cesión de calor a presión constante (expulsión de los gases de escape).

Figura 2.1.b. Diagrama del ciclo Brayton teórico (en negro) y real (en azul), en función de la entropía S y la temperatura T



Fuente: Wikipedia

i) Ciclo Rankine

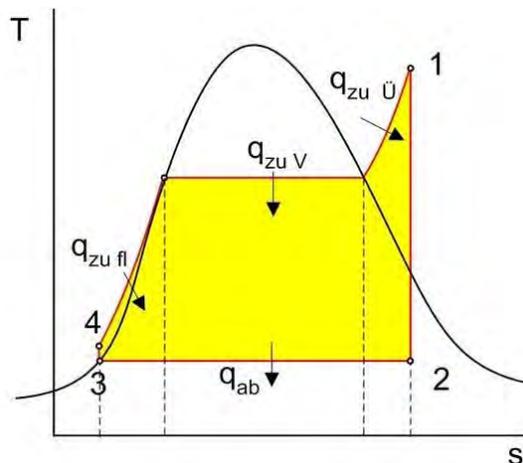
La utilización de turbinas de vapor en ciclos combinados gas-vapor deriva del excelente acoplamiento térmico con el ciclo Brayton en los rangos actuales de temperaturas de trabajo y por los altos rendimientos que brinda el empleo de ambas tecnologías en conjunto.

El ciclo Rankine es la aplicación tecnológica del ciclo de Carnot para el caso de que el fluido motor sea un fluido condensable y durante su evolución se produzcan cambios de fase, lo cual se aprecia en la Figura 2.1.c. Suele emplearse agua desmineralizada, por su facilidad de manejo, reposición y abundancia.

El ciclo Rankine consta de las siguientes etapas:

- Una etapa de expansión del fluido en fase vapor, realizada en una turbina de vapor, lo más isoentrópica posible.
- A la salida de la turbina de vapor, una cesión de calor residual del vapor a presión constante en un condensador.
- Una o varias etapas de presurización del fluido. El proceso se realiza con bombas y fuera de la zona de cambio de fase.
- Una etapa de aportación de calor (Q) a presión constante. El fluido pasa primero a líquido saturado, luego un cambio de fase (vaporización) y una elevación posterior de temperatura hasta llegar a vapor saturado en lo que se denomina sobrecalentador. Así se disminuye la humedad en el vapor en las últimas etapas de expansión de la turbina y aumenta el rendimiento.

Figura 2.1.c. Diagrama T-S de un ciclo de Rankine con vapor de alta presión sobrecalentado



Fuente: Wikipedia

b. Principales Equipos y Sistemas

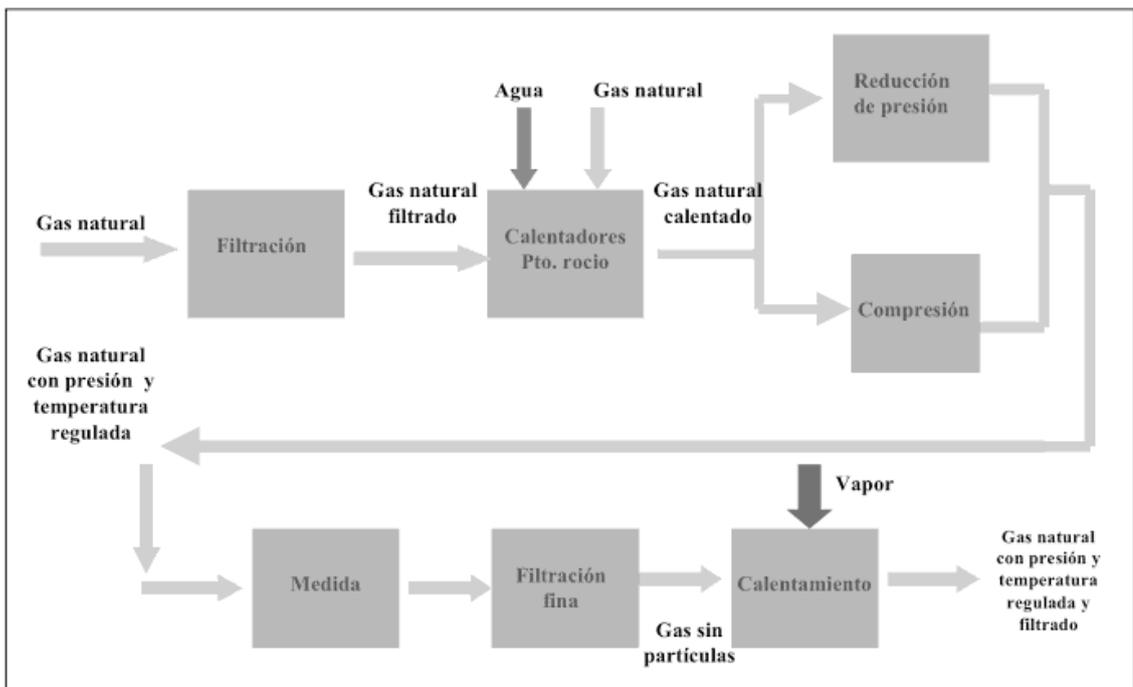
i) Estación de Regulación y Medición de gas (ERM)

Respecto a Medición, este subsistema cumple con tres funciones muy importantes para la planta. La primera de ellas es medir y ajustar la presión del gas que entra al sistema; esto puede lograrse tanto con un compresor, como con un expansor, dependiendo de las condiciones de entrada del gas.

Otra de las funciones es la de monitorear el poder calorífico del gas, característica indispensable para obtener una óptima combustión en la cámara de combustión; estas mediciones se hacen utilizando medidores ultrasónicos, cromatógrafos en línea y analizadores de humedad y ácido sulfhídrico (H₂S). Finalmente, en la ERM se mide y controla el flujo de gas.

En cuanto a Regulación, se cumple con la función de acondicionar el gas para su entrada a la planta. Se cuenta con filtros que limpian el gas de las posibles impurezas sólidas que se pudiesen arrastrar; pueden ser de varios tipos (de cartucho, ciclónicos, etc.). Se debe contar también con calentadores de punto de rocío para evitar que se forme hielo durante la expansión del gas, lo cual podría dañar la turbina. Finalmente el gas, ya regulada su presión, debe calentarse antes de entrar a la turbina, y esto puede hacerse mediante vapor tomado del ciclo o con calentadores eléctricos.

Figura 2.1.d Funcionamiento de la ERM



Fuente: García Garrido

ii) Turbina de Gas

Es donde ocurre la combustión del gas en presencia de aire. Los gases procedentes de la combustión (por encima de 1200°C) pasan a gran velocidad a través de la turbina, haciéndola girar y generando energía mecánica de rotación en el eje de la turbina. Durante un apagado o encendido es preciso que el interior de la turbina esté libre de posibles gases combustibles, por lo que se realizan purgas con nitrógeno y aire.

iii) Sistema de Generación de Vapor por Recuperación de Calor (Heat Recovery Steam Generator o HRSG por sus siglas en inglés)

Los gases de escape de la turbina de gas salen a una temperatura que oscila entre los 550°C y 600°C, por lo cual se aprovecha su energía térmica para producir vapor en el sistema HRSG, el cual es un intercambiador de calor con múltiples tubos. El mismo calor de los gases de la turbina sirve para sobrecalentar el vapor generado antes de ser inyectado a la turbina de vapor.

iv) Turbina de Vapor

La turbina de vapor consta de tres secciones: vapor de baja, media y alta presión. Al vapor de alta presión, después de su expansión en la sección de alta presión de la turbina, se le denomina vapor “frío” y se junta con el flujo de vapor de media presión. Luego se transporta hasta la entrada al área de recalentamiento del HSRG para finalmente ser llevado hasta la entrada de la sección de media presión de la turbina de vapor. Lo mismo sucede con el vapor de media presión que sale de la turbina, se recalienta y se alimenta a la sección de baja presión de la turbina de vapor.

v) Sistema de Condensado

El vapor que sale de la turbina de vapor se envía al condensador y luego los condensados son enviados mediante bombas al tanque (o pozo) de condensados, para reutilizarlos posteriormente.

vi) Generador

El generador transforma la energía mecánica de rotación transmitida al eje por las turbinas en energía eléctrica. La transmisión de energía mecánica se puede realizar a través de uno o varios ejes de potencia, dando lugar a plantas de eje único o de eje múltiple. El tipo de refrigeración dependerá del tamaño del generador; para los más pequeños puede emplearse aire y para los más grandes se puede utilizar gas hidrógeno, que debe acompañarse de equipos de seguridad por el riesgo de explosión asociado. También existen los sistemas de refrigeración agua/hidrógeno. Se suele utilizar CO₂ como gas de purga en el generador.

vii) Compresores de Aire para Equipos y Servicios

Generan el aire que requieren los equipos e instrumentos de indicación y control. El aire debe tener la suficiente presión, calidad (libre de impurezas y humedad) y flujo para que la planta no se dispare por falta de aire. Es muy importante para la combustión.

viii) Sistema de Protección contra Incendios

Este sistema consta básicamente de detectores de humo, fuego y mezclas explosivas, los cuales son monitoreados por una unidad electrónica. Al detectarse un evento, se emiten alarmas visuales y audibles y la unidad electrónica inicia las secuencias de mitigación que previamente se han configurado en el área del evento.

Otro de los sistemas empleados es mediante CO₂ para la extinción del fuego. El CO₂ es producido por la misma turbina durante la combustión o suministrado en depósitos; como la turbina se encuentra en un recinto cerrado, se puede usar el CO₂ para llenar la sala y que así el fuego se "asfixie". Como medida de seguridad, se deberá desconectar este sistema cuando se entre a realizar cualquier labor a la sala de la turbina, por el riesgo de que se asfixien las personas que haya dentro.

ix) Planta de Tratamiento de Agua

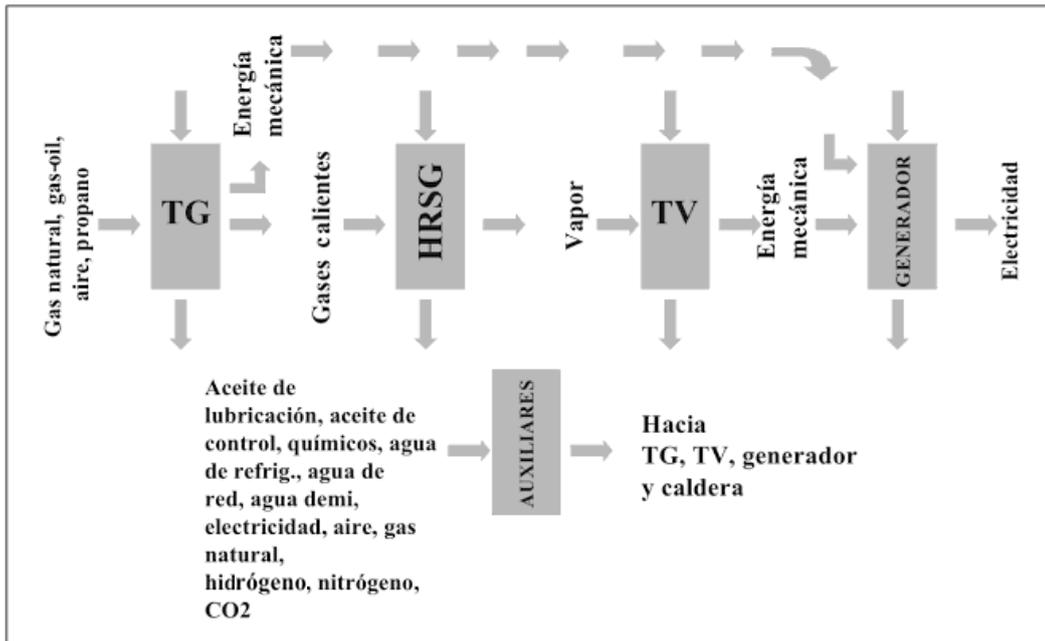
El agua de servicio empleada en las centrales de CC proviene muchas veces de ríos, lagos, mares, o del subsuelo; esto significa que el agua puede tener un alto contenido de impurezas e incluso microorganismos que afecten las instalaciones y equipos. Por ello, es necesario realizar un control o tratamiento físico-químico al agua que se utilizará en los sistemas de refrigeración y caldera. Los tratamientos adecuados estarán en función de las características físico-químicas originales del agua a tratar (pH, salinidad, dureza, presencia de microorganismos) y del patrón químico deseado, que viene dado por los materiales de tuberías y equipos.

x) Sistema de Monitoreo Continuo de Emisiones (CEMS)

Su nombre viene de Continuous Emission Monitoring System. Este sistema tiene la función de monitorear y controlar continuamente las emisiones del HRSG para cumplir con la normatividad ecológica correspondiente. El CEMS se compone de analizadores y tanques de gases que se usan para la calibración periódica y mantenimiento de los analizadores, bombas para transportación de muestras, algún sistema de calentamiento en la conducción de la muestra y un contenedor climatizado que contiene los analizadores, los tanques de gas para calibración y un PLC². En la chimenea que conduce los gases hacia el exterior se instalan medidores en continuo de los diferentes contaminantes, como CO, CO₂, NO_x, SO₂ y partículas sólidas suspendidas. Además, se instalan en las proximidades de la central otros dispositivos de medición que analizan la calidad del aire a cierta distancia de la central.

² PLC = Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programable)

Figura 2.1.e. Diagrama de bloques de los principales componentes de un CC



Fuente: García Garrido

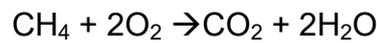
c. Impacto Ambiental

Como se menciona al inicio de este capítulo, las centrales térmicas de ciclo combinado son mucho más respetuosas con el medio ambiente que el resto de las centrales térmicas que utilizan combustibles fósiles. Las centrales de CC presentan hasta un 40% menos emisiones de gases contaminantes y partículas suspendidas que otras tecnologías (García Garrido, 2011). En cuanto a vertidos líquidos, se trata en su mayoría de agua de refrigeración, cuyo aspecto más importante es la elevación de temperatura, la cual se puede eliminar utilizando diversas tecnologías de refrigeración. El segundo aspecto más importante en cuanto a efluentes líquidos es la presencia de sustancias como ácidos, bases, biocidas o aceites, que son fácilmente depurados. Finalmente, respecto a residuos sólidos, se generan muy pocos: residuos sólidos urbanos, papel, aceites usados, envases de productos químicos y restos de filtros de entrada de aire a turbina, principalmente. Todos ellos deben ser retirados y tratados por un gestor autorizado, de manera que el impacto ambiental resultante es prácticamente nulo.

i) Emisiones Gaseosas

A continuación se mencionan las principales emisiones provenientes de la turbina de gas.

- Dióxido de Carbono (CO₂): Al ser mayormente metano, la reacción de combustión del gas natural es la siguiente:



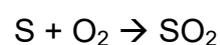
Las emisiones son de aproximadamente 2,300 toneladas anuales por MW de potencia instalada. Este es uno de los gases responsables del efecto invernadero y existen numerosos acuerdos internacionales para controlar sus emisiones (como el protocolo de Kyoto).

- Monóxido de Carbono (CO): Las emisiones de monóxido de carbono se forman por una combustión deficiente, como lo muestra la siguiente reacción:



En condiciones normales, las emisiones de CO son muy bajas (menos de 1mg/Nm³) ya que suele oxidarse a CO₂ en un par de días. Únicamente durante los procesos de arranque estas emisiones adquieren valores apreciables, aunque tras unos minutos vuelven a la normalidad. Las emisiones pueden controlarse catalíticamente. En altas concentraciones, este gas puede provocar muerte por envenenamiento.

- Dióxido de Azufre (SO₂) y Óxidos Nitrosos (NO_x): Los combustibles fósiles suelen contener pequeñas cantidades de azufre, que también sufren la combustión, produciéndose SO₂. Este gas es responsable de la llamada lluvia ácida, y es altamente irritante. Su reacción de oxidación es:



Por su parte, el nitrógeno presente en el aire se introduce también en la cámara de combustión y forma dos óxidos:

$N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$ (óxido nítrico, gas incoloro)

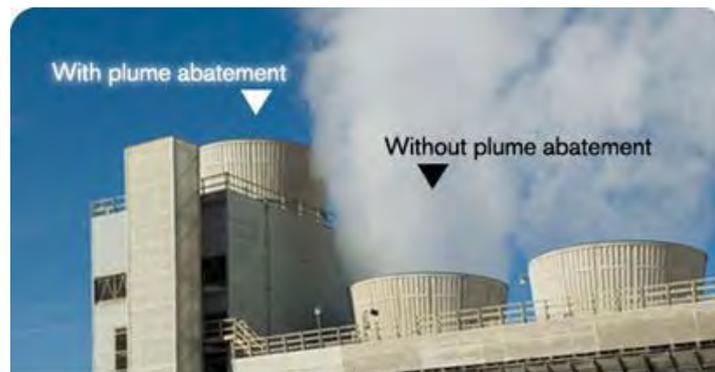
$2NO_{(g)} + O_{2(g)} \rightarrow 2NO_{2(g)}$ (dióxido de nitrógeno, gas color café)

Estos gases son responsables por el fenómeno de lluvia ácida, formación de smog, y altos niveles de ozono troposférico (O_3).

ii) Vapor

En el caso de centrales que se refrigeran en circuito cerrado con torres de refrigeración, se aprecia la salida de vapor por la parte alta de las torres, lo cual se conoce como “pluma”. Ésta no tiene ningún efecto contaminante, pero tienen cierto impacto visual, por lo que los diseños actuales del proceso tienden a minimizar este efecto.

Figura 2.1.f. Ejemplo de pluma de vapor



Fuente: Google

iii) Efluentes Líquidos y Vertidos

Los efluentes líquidos de una central de CC provienen del circuito de refrigeración y de los distintos procesos que se llevan a cabo. Como se mencionó anteriormente, el aspecto más importante a considerar es la elevada temperatura del efluente de refrigeración. Sin embargo, la utilización de sistemas de refrigeración como aquellos basados en torres de refrigeración o aerocondensadores tienen un impacto bajo o nulo en la temperatura del agua.

Después del agua de refrigeración, las aguas de purgas de calderas suponen el segundo efluente por cantidad. La necesidad de purgar las

calderas proviene del aumento en la concentración de sales, que pueden ser arrastradas por el vapor y provocar diversos daños en la caldera, en el ciclo agua-vapor o en la turbina de vapor. El agua de la caldera es un agua desmineralizada, de extraordinaria pureza, pero a la que se añaden una serie de sustancias para controlar el pH (amoníaco y fosfatos) y el contenido de O₂ (con hidrazina).

En menor cantidad, pero de cierta toxicidad, es el agua que pudo estar en contacto con aceites y combustibles. Ésta debe ser depurada previamente en depuradoras específicas que faciliten la separación entre las fases líquidas. Estas aguas contaminadas pueden provenir de vertidos ocasionales y accidentales que se recogen en las naves que alojan los trenes de potencia, en los talleres, o en cualquier zona con equipos que trabajen con aceite. Dichas zonas deben contar con un sistema de drenajes que conduzca las aguas recogidas en cualquier derrame hacia las depuradoras.

Las aguas procedentes de la PTA son salmueras y aguas de lavado de las resinas de intercambio iónico. Las primeras no contienen ningún contaminante, por lo que se envían junto con el resto de las aguas del proceso. Las aguas procedentes de la regeneración de las resinas (también llamados lechos mixtos) contienen ácido sulfúrico e hidróxido de sodio, por lo que se debe neutralizar su pH antes de mezclarlas con el resto de las aguas. Finalmente, las aguas sanitarias procedentes de los edificios de oficinas deben conducirse a una depuradora específica.

iv) Ruido

En cuanto a ruidos, las turbinas de gas y vapor, así como el generador, suelen estar dentro de recintos aislados acústicamente, lo cual garantiza que el ruido no llegue a niveles nocivos para los trabajadores. Otras fuentes importantes de ruido son el transformador principal, así como las bombas, que suelen estar aisladas acústicamente.

v) Aceites usados

Los aceites usados provienen del sistema del tren de potencia (conjunto formado por turbina de gas, turbina de vapor y generador) y de los transformadores. El resto de los equipos de la planta son pequeños consumidores de lubricantes. El aceite rara vez se sustituye de forma sistemática, en su lugar, se realizan análisis periódicos para determinar si éste mantiene sus propiedades, e incluso en el caso de que en el análisis se determine que está contaminado por determinadas sustancias, puede filtrarse y evitar así su sustitución.

La cantidad anual de aceite usado que se entrega a un gestor autorizado de residuos es baja en este tipo de centrales. Es obligatorio llevar un registro de la cantidad de aceite usado enviado para su tratamiento. El aceite usado debe almacenarse en un recinto apropiado de manera que un derrame pueda ser controlado y no afecte al suelo ni se pueda mezclar con aguas residuales, pluviales o freáticas. Cada uno de los envases que contienen este aceite usado debe etiquetarse convenientemente.

vi) Envases de Productos Químicos

Los diversos productos químicos que se emplean en la planta son suministrados en envases de diversos tipos, aunque generalmente son materiales plásticos. Estos envases vacíos deben guardarse en un recinto señalizado especial con acceso restringido y deben ser entregados a un gestor autorizado de residuos para su tratamiento.

vii) Filtros de Aire de Entrada a Turbina de Gas

Es un caso algo especial de residuo sólido, no tanto por su toxicidad o peligrosidad, sino por su volumen. Cada cambio de filtros supone generar un volumen grande de residuos, que es necesario prever para dimensionar adecuadamente el contenedor para su retirada.

viii) Otros Residuos Sólidos No Tóxicos

El resto de los residuos que se generan en una planta de CC son iguales a los que se generan en cualquier otra actividad industrial: chatarra metálica, papel y cartón, vidrio, plástico, madera, residuos orgánicos y residuos inorgánicos. Estos residuos pueden ser tratados como residuos sólidos urbanos, pero es más ecológico y aconsejable separarlos y entregarlos a un gestor de residuos para su reciclado. La única precaución que hay que tener en cuenta es que es mucho más eficaz separar los residuos por tipo, por lo que es necesario prever papeleras, contenedores o cubos de basura diferenciados para cada tipo de residuo.

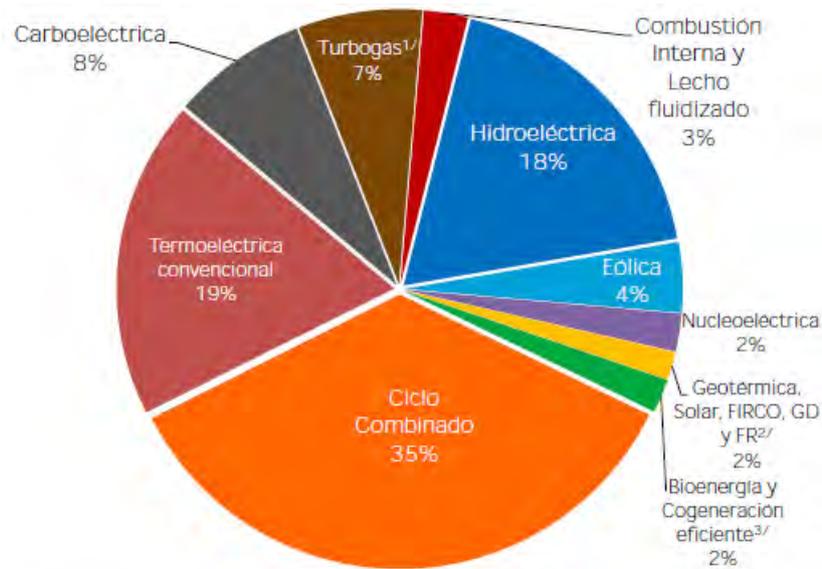
En la Tabla 2.1.a. del Apéndice A se puede encontrar una tabla resumen de las principales sustancias empleadas en centrales de ciclo combinado, así como sus principales usos, riesgos e impacto ambiental.

d. Centrales de CC en México

Los ciclos combinados son la tecnología preponderante en la matriz energética nacional al representar casi el 35.3% de la capacidad nacional y el 50.1% de la generación de electricidad del país.

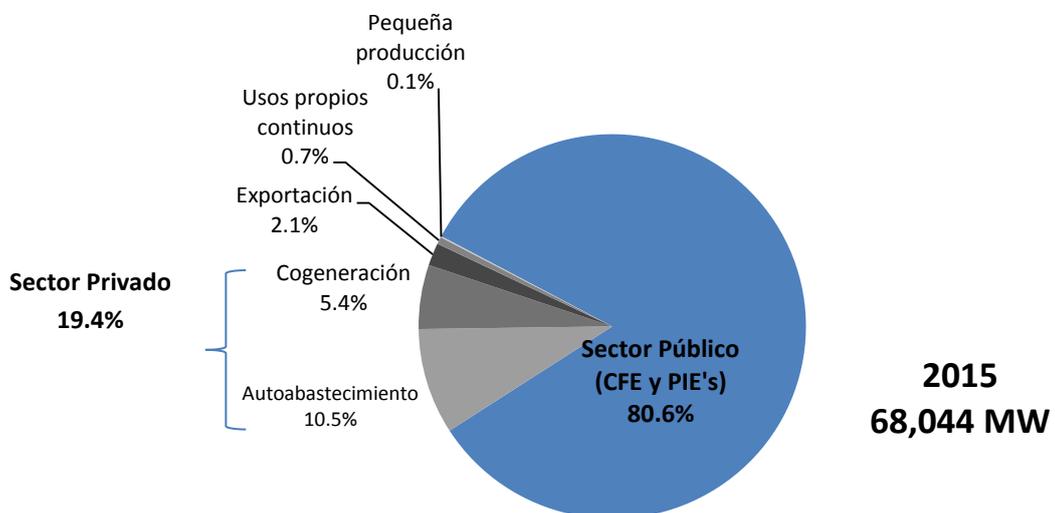
Al cierre de 2015, el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) contaba con una capacidad eléctrica instalada de 68,044 MW entre servicios públicos y privados, 4% más que en 2014. El 61.6% de este parque de generación pertenece a CFE, 19% a centrales de Productores Independientes de Energía (PIE's) y el 19.4% restante es la que los productores privados aportan bajo los esquemas de autoabastecimiento, cogeneración, pequeña producción, exportación, usos propios continuos y generador. El SEN consiste 71.7% en fuentes de energía convencionales y 28.3% en tecnologías limpias (SENER, Prospectiva del Sector Eléctrico 2015-2029). Esta distribución se aprecia mejor en las siguientes dos figuras. Cabe mencionar que la tecnología de generación mayor utilizada es el ciclo combinado, como se aprecia en la Figura 2.1.g.

Figura 2.1.g. Capacidad Instalada por Tipo de Tecnología 2015 (Porcentaje)



^{1/} Incluye plantas móviles. ^{2/} Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), Generación Distribuida (GD) y Frenos Regenerativos (FR). ^{3/} Once permisos acreditados por la CRE como Cogeneración Eficiente. El total puede no coincidir por redondeo. Información preliminar al cierre de 2015. Fuente: Elaborado por SENER con datos de CFE, CRE y Subsecretaría de Planeación y Transición Energética.

Figura 2.1.h. Capacidad Instalada del SEN por Modalidad 2015 (MW, Porcentaje)

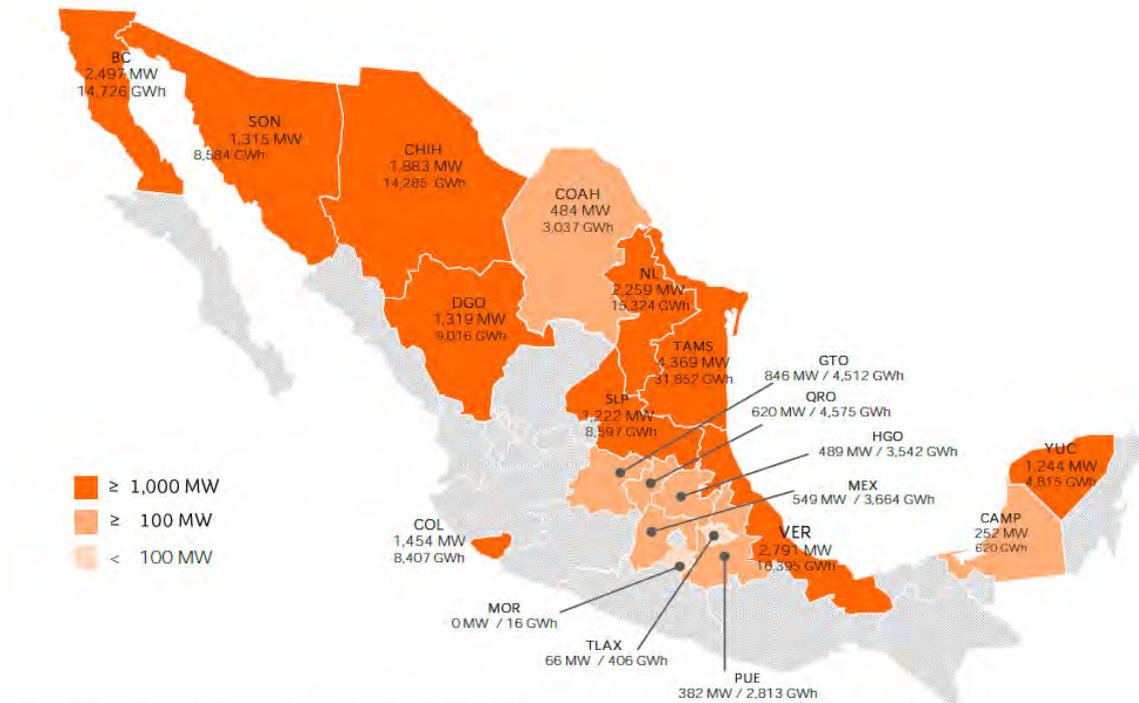


Fuente: SENER con información de CFE y CRE

México contaba con un total de 63 plantas de ciclo combinado a finales de 2015, lo que representa el 35.3% de la capacidad instalada del país y 50.1% de

la electricidad total generada. La mayoría de ellas se concentran en las zonas Noroeste, Noreste y Sur-Sureste, como puede apreciarse en el mapa de la Figura 2.1.i. Una lista detallada de todas las centrales puede encontrarse en la Tabla 2.1.b del Apéndice A.

Figura 2.1.i. Capacidad y Generación en Centrales de CC en México (2015) [MW / GWh]



Fuente: Elaborado por SENER con datos de CFE, CENACE y CRE. Los totales pueden no coincidir por redondeo.

e. Incidentes y Fallas

Las razones más comunes para paros en centrales de CC son las siguientes:

- i) Fallos en la alimentación del combustible
- ii) Fallo en la red (black out)
- iii) Fallos eléctricos de sistemas propios de la central, como interruptor de máquina, transformador principal, protección del generador
- iv) Sistemas de instrumentación y/o control de la turbina de gas
- v) Fallos en el sistema HRSG o caldera (altas temperaturas, bajo flujo, pérdida de nivel, fallos en la instrumentación)

- vi) Fallos en el ciclo agua-vapor (pérdidas de vacío en el condensador por fugas o fallos en la refrigeración, funcionamiento anómalo de by-pass, fallos en la instrumentación)

Los sistemas más afectados por una parada de emergencia son el HRSG y el ciclo agua-vapor. Las presiones bajan bruscamente, el ciclo se desequilibra y se producen alteraciones en los niveles de calderines.

En México han ocurrido accidentes en centrales de CC, como el ocurrido en Tuxpan en 2011 (González, 2011).

2.2 Gas Natural

A nivel mundial, una quinta parte de la generación de electricidad depende del gas natural. México se ubica dentro de los primeros diez lugares en generación eléctrica a partir de gas natural, el cual cuenta con un 41.8% participación en el mercado nacional, por encima de la gasolina y del diésel. El mayor consumidor de gas natural es el sector eléctrico público (CFE), seguido del petrolero (Pemex), el industrial y el eléctrico privado. Se espera que la demanda de gas natural incremente 44.1% para 2029.

El gas natural es considerado como una buena fuente para generación de electricidad por ser técnica y financieramente de bajo riesgo. Éste ofrece diversas opciones para la generación de electricidad a través de cogeneración o turbinas de gas, y es el principal combustible empleado en plantas de Ciclo Combinado.

a. Generalidades del Gas Natural

El gas natural es un combustible fósil formado por una mezcla de hidrocarburos ligeros, principalmente metano y etano, que se encuentra naturalmente en el subsuelo en estructuras similares a aquellas donde se halla petróleo crudo. Prácticamente todos los yacimientos de petróleo crudo tienen gas natural asociado a ellos (llamado gas asociado), pero también existen

yacimientos independientes de gas natural (gas no asociado o gas libre). Típicamente el gas natural tiene la siguiente composición química:

Tabla 2.2.a. Composición química del gas natural

Compuesto	Fórmula Química	% mol
Metano	CH ₄	87 - 97
Etano	C ₂ H ₆	1.5 - 7.0
Propano	C ₃ H ₈	0.1 - 1.5
i-Butano	C ₄ H ₁₀	0.01 - 0.30
n-Butano	C ₄ H ₁₀	0.01 - 0.30
i-Pentano	C ₅ H ₁₂	trazas - 0.04
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	trazas - 0.04
Hexano	C ₆ H ₁₄	trazas - 0.06
Nitrógeno	N ₂	0.2 - 5.5
Dióxido de Carbono	CO ₂	0.1 – 1.0
Oxígeno	O ₂	0.1 – 1.0
Hidrógeno	H ₂	trazas – 0.02

Fuente: UnionGas 2016

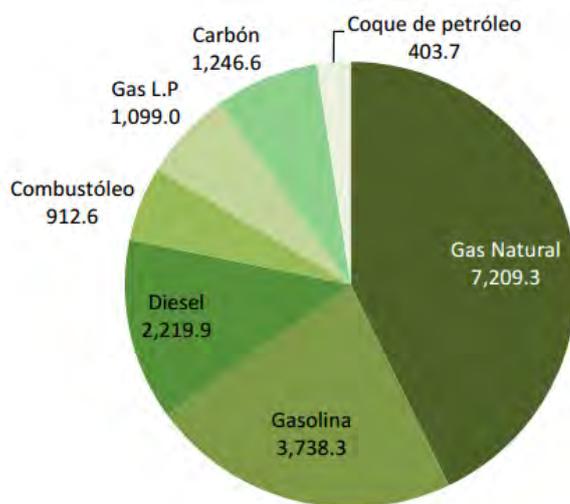
Las impurezas más comunes en el gas natural incluyen agua, partículas sólidas (arena, polvo, tierra), CO₂, ácido sulfhídrico (H₂S) y trazas de gases nobles. Es importante controlar los niveles de estas sustancias ya que pueden provocar corrosión o desgaste en ductos y tuberías, así como elevar los costos de transporte y almacenamiento del gas y producir emisiones contaminantes. A veces también es deseable separar las fracciones de hidrocarburos más pesados si éstos se encuentran en abundancia y representan una oportunidad de valor agregado (por ej. para producir etano, gas L.P. y gasolinas).

b. Usos del Gas Natural

El gas natural tiene diversos usos en los sectores Residencial, Servicios, Industrial, Petrolero y Autotransporte, donde suele emplearse como combustible, para generación de electricidad y también como materia prima. Recientemente el Gobierno Federal ha buscado aprovechar los bajos precios

de este combustible para sustituir el uso de diésel y combustóleo por gas natural en diversas centrales eléctricas. Actualmente el gas natural es el combustible más demandado en México (ver Figura 2.2.b). Asimismo, la CFE en coordinación con PEMEX, ha buscado invertir en nuevos gasoductos (para mayor información, se puede revisar el Plan Quinquenal de Gasoductos 2015-2019), lo que permitirá utilizar un combustible más barato y apoyar a la disminución de los costos de generación (DOF, 2013).

Figura 2.2.b. Demanda Nacional de Combustibles, 2014
(mmpcd de gas natural equivalente)



Fuente: SENER con base en información del IMP

c. Riesgos del Gas Natural

Cualquier gas combustible puede generar riesgos si no se utiliza de manera adecuada, produciendo riesgo toxicológico, de asfixia o de incendio. Las fugas pueden fácilmente llevar a cualquiera de estos escenarios, por lo que suelen emplearse dispositivos de detección de fugas tales como semiconductores, sensor catalítico, ultrasonido, dispositivos infrarrojos o laser. Los riesgos más comunes asociados al gas natural son los siguientes:

- i) Fuego y/o Explosión

El gas natural es altamente inflamable, tanto en estado líquido como gaseoso, además se tiene un riesgo de explosión por las altas presiones a las que se suele manejar. Por lo anterior, debe evitarse que esta sustancia entre en contacto con chispas o fuentes de calor. Su temperatura de ignición es de 480°C.

ii) Asfixia

Si se genera una acumulación de gas natural, puede provocar asfixia por desplazamiento de oxígeno, por lo cual es muy importante contar con las condiciones adecuadas de ventilación en cualquier instalación que utilice gas. El gas natural tiene la ventaja de que al ser más ligero que el aire, se dispersa cuando existen condiciones adecuadas de ventilación y se evita su acumulación.

iii) Toxicidad

El gas natural no es un elemento tóxico, pero dentro de los productos de su combustión se encuentra el monóxido de carbono (CO), que sí lo es. El monóxido de carbono está presente en toda combustión real en cantidades mínimas. Cuando las condiciones de ventilación son las adecuadas, no hay riesgo para el organismo, puesto que las pequeñas cantidades presentes se diluyen perfectamente en la atmósfera sin generar efectos nocivos.

iv) Otros

Existen otros riesgos asociados al manejo de gas natural, que dependen de la situación específica en que se emplee. Algunos ejemplos pueden incluir el riesgo de trabajar con recipientes a presión, riesgo de trabajar con bajas temperaturas (al trabajar con Gas Natural Licuado), su reactividad con otras sustancias (el metano reacciona explosivamente en presencia de halógenos, óxido de nitrógeno y acetileno), entre otros.

2.3 Riesgo

a. Concepto de Riesgo

El Riesgo suele confundirse con el peligro. El peligro es una condición que puede provocar una consecuencia no deseada, como muerte, enfermedad, daño a la propiedad o al medio ambiente, es decir, el potencial para causar un daño. Por otro lado, el Riesgo se presenta debido a la existencia del peligro e involucra tanto la probabilidad de un evento como la magnitud de sus consecuencias, ambos conceptos no deben confundirse.

El Riesgo es una medida cuantitativa expresada en función de la Frecuencia (F) (o probabilidad de ocurrencia en un periodo) de un evento y la magnitud de sus Consecuencias (C), también llamada severidad (Juárez Pastrana, 2014).

$$\text{RIESGO} = F \times C$$

Así, el riesgo se calcula como la frecuencia con la que ocurre una cierta consecuencia, con la ecuación de riesgo básica:

$$\text{Riesgo} = \frac{\text{Eventos}}{\text{Año}} \times \frac{\text{Consecuencia}}{\text{Evento}}$$

b. Clasificación de Riesgos

El riesgo puede clasificarse de diferentes maneras, pero una de las más comunes es con respecto a las personas, con respecto a las consecuencias y con respecto a su origen (Creus, 2011).

i) Con respecto a las personas

Se pueden considerar dos tipos de riesgo: el riesgo individual y el riesgo social. El riesgo individual es aquel que afecta a una persona de forma aislada. A su vez, el riesgo individual puede ser clasificado como voluntario (aquel que puede aceptarse o rechazarse) o involuntario (aquel que no puede evitarse). Por otro lado, el riesgo social está relacionado con el número de personas afectadas por una clase de eventos, como una enfermedad.

ii) Con respecto a las consecuencias

Los distintos tipos de consecuencias pueden ser, muerte, lesiones, tiempo de trabajo perdido, daños materiales, reducción de la esperanza de vida, por mencionar algunas.

iii) Con respecto al origen

Se puede distinguir entre riesgos naturales y riesgos inducidos por el hombre. Por ejemplo, la electrocución por rayos frente a los accidentes automovilísticos.

2.4 Métodos de Análisis de Riesgos

Para lograr decidir si un riesgo es aceptable se requiere estimar su magnitud, por lo que es necesario realizar un análisis sistemático y lo más completo posible de todos los aspectos que implica para la población, ambiente y bienes materiales que pudieran ser afectados. Algunas de las proporciones que puede tomar un incidente asociado con materiales peligrosos incluyen lamentables consecuencias como pérdidas humanas, graves daños al medio ambiente y/o cuantiosas pérdidas materiales. Todo ello por no tomar las medidas adecuadas de prevención y la incapacidad de respuesta rápida y eficaz.

Uno de los objetivos del análisis de riesgo es determinar los equipos y funciones más críticas para la seguridad del sistema analizado, así como proponer acciones preventivas sobre éstos, tanto en el diseño de la instalación como en su operación y mantenimiento, con el objetivo de aumentar el nivel de seguridad.

En el caso de riesgos por actividades industriales, esto se logra a partir de la cuantificación de la magnitud del daño y su Probabilidad de ocurrencia. La Probabilidad es un número contenido en el intervalo $[0, 1]$, que refleja la frecuencia relativa de un evento respecto a todos los posibles resultados. Se calcula el riesgo a partir de estudios que emplean varias técnicas para identificar los peligros, combinar estos con fallas de equipo o fallas humanas que pueden resultar en accidentes.

Existen diversas metodologías para llevar a cabo un análisis de riesgo, que varían en nivel de complejidad y recursos requeridos; los métodos más simples sólo dan resultados cualitativos, mientras que los métodos más complejos dan resultados cuantitativos. Es común aplicar varios métodos de manera progresiva. Primero puede usarse un método simple para filtrar y priorizar escenarios, seguido por un método más complejo para desarrollar los escenarios de accidente que rebasan el filtrado, y finalmente, el análisis de consecuencias puede limitarse a los escenarios más significativos. A continuación se describen los métodos empleados en este proyecto, pero existen muchos más (Creus, 2011).

a. Análisis HAZOP

Un estudio de peligro y operabilidad (HAZOP por sus siglas en inglés: Hazard and Operability) es un estudio riguroso y sistemático de las consecuencias de posibles desviaciones en el proceso que causen problemas operativos o de peligro. Este método se desarrolló originalmente en el Reino Unido en la década de los 70 y su principal característica es que es realizado por un equipo multidisciplinario que identifica los peligros y problemas operacionales que pueden dar lugar a un accidente y dirigido por una persona experimentada en la técnica HAZOP. Típicamente se contaría con especialistas de procesos, instrumentación, mecánica, electricidad, mantenimiento, seguridad y medio ambiente. El número ideal de integrantes es de cuatro a ocho.

Se trata de un método inductivo que parte de la premisa de que los accidentes se producen como consecuencia de una desviación de las variables de proceso con respecto de los parámetros normales de operación en un sistema dado y en una etapa determinada. Se usa un protocolo preestablecido para evaluar metódicamente el impacto de variar las condiciones normales de operación (diseño) de ciertos equipos y sistemas.

La documentación requerida para el estudio HAZOP es universal, aunque existen varias variantes. La hoja de trabajo consiste de las siguientes partes (CCPS, 1995):

- i) Encabezados: se debe registrar la información sobre el equipo de trabajo, fecha de realización, nombre del proyecto, área de estudio, flujo, temperatura, presión, composición u otros parámetros clave, y la intención de diseño de la línea, contenedor, nodo, subsistema o subsección a estudiar
- ii) Desviaciones: Se debe llevar un registro de desviaciones potenciales (parámetro y palabra guía) de la intención de diseño, posible causa de la desviación, consecuencias probables, salvaguardias (ejecutan una función de protección a través del uso de hardware, software o alguna acción humana) o protecciones existentes.
- iii) Existe una tercera opción para registrar acciones y respuestas para el control de la administración. Aquí se incluyen las acciones requeridas, respuesta a las acciones requeridas, persona responsable de las acciones requeridas, prioridad o potencial de peligro de la desviación.

Las Palabras Guía son los términos clave apropiados para plantear las desviaciones de cada variable. Combinándolas con las variables, se pueden describir las desviaciones del sistema o proceso, por ejemplo: NO + FLUJO → NO FLUJO. A continuación se muestran las palabras guía más utilizadas en el análisis HAZOP y el protocolo típico de aplicación de esta metodología.

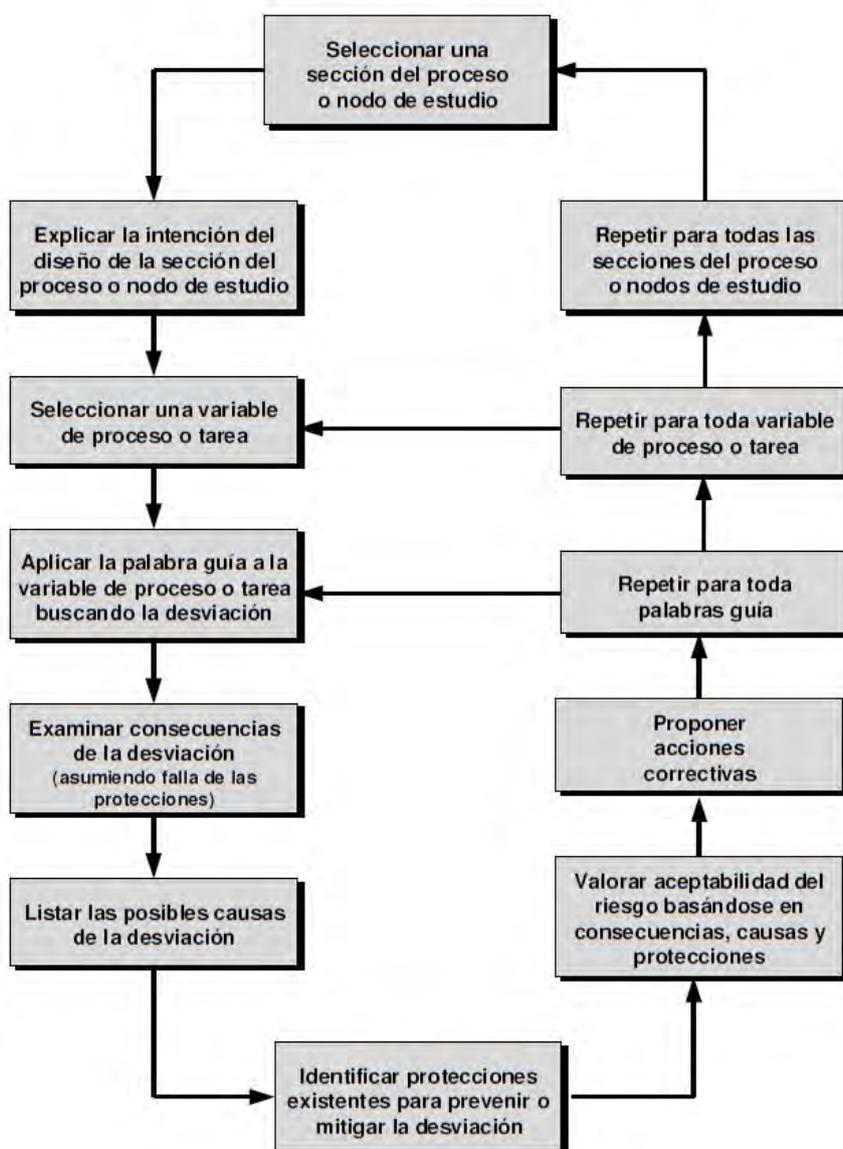
Existen códigos informáticos que permiten registrar las sesiones HAZOP de forma directa, entre ellos: Nemours (DuPont), SCRI HAZOP, HAZSEC (Technica), HAZTRAC (Technica), HAZOP (ITSEMAP). Éstas guían al técnico durante las sesiones y permiten en general una posterior agrupación y clasificación de las recomendaciones surgidas en el estudio (Juárez Pastrana, 2014).

Algunos sistemas de interés para un análisis HAZOP en una central de CC son: el sistema de suministro de gas, el sistema de lubricación de las turbinas, los sistemas de instrumentación de aire, el sistema de condensado de agua y el sistema de alimentación de agua.

Tabla 2.4.a. Palabras guía más utilizadas en HAZOP

Palabra guía	Significado	Ejemplos
No	Negación de la intención	No hay flujo de regreso cuando debería de haber. Paso omitido en un proceso secuencial
Más	Incremento cuantitativo	Más de un parámetro físico relevante de lo que debe ser, por ejemplo: mayor flujo, mayor presión, alta temperatura o alta viscosidad.
Menos	Decremento cuantitativo	Opuesto a más de...
Parcial	Decremento cualitativo	Diferente composición del sistema a lo que debería de ser (en flujos con varios componentes)
Además de	Incremento cualitativo	Más cosas presentes de las que deberían de estar (fases extra) Transferencia de más de una fuente o a más de un destino
Reversa	Opuesto lógico	Flujo en reversa Pasos de un proceso secuencial en orden inverso
Aparte de	Sustitución completa	Qué puede pasar aparte de una operación normal (encendido, apagado normal, apagado de emergencia, mantenimiento, muestreo) Transferencia de una fuente equivocada o a un destino equivocado

Figura 2.4.b. Protocolo típico de las reuniones HAZOP



b. Árbol de Eventos

El Árbol de Eventos es un método inductivo, en el que después de identificar un evento o suceso, se desarrollan las posibles consecuencias o resultados de éste. Esta es una herramienta útil para desarrollar la secuencia de eventos que pueden ocurrir tras un accidente o evento primario (también llamado evento iniciador).

Un evento o suceso iniciador es cualquier suceso que por un lado interrumpa la operación normal del proceso, y por el otro degrade la capacidad de algún sistema requerido para llevar el proceso a condiciones seguras una vez interrumpido. Los eventos iniciadores pueden ser fallas inherentes al proceso, roturas o fugas en componentes importantes, o bien fallas de sistemas de apoyo requeridos para la operación normal. Igualmente, los eventos iniciadores pueden ser fenómenos externos al proceso, que puedan intervenir en su operación exitosa, tales como un sismo, huracán, incendio en áreas adyacentes, inundación, impacto de vehículos o proyectiles. Para identificar el evento iniciador se pueden emplear métodos cualitativos, como el análisis HAZOP.

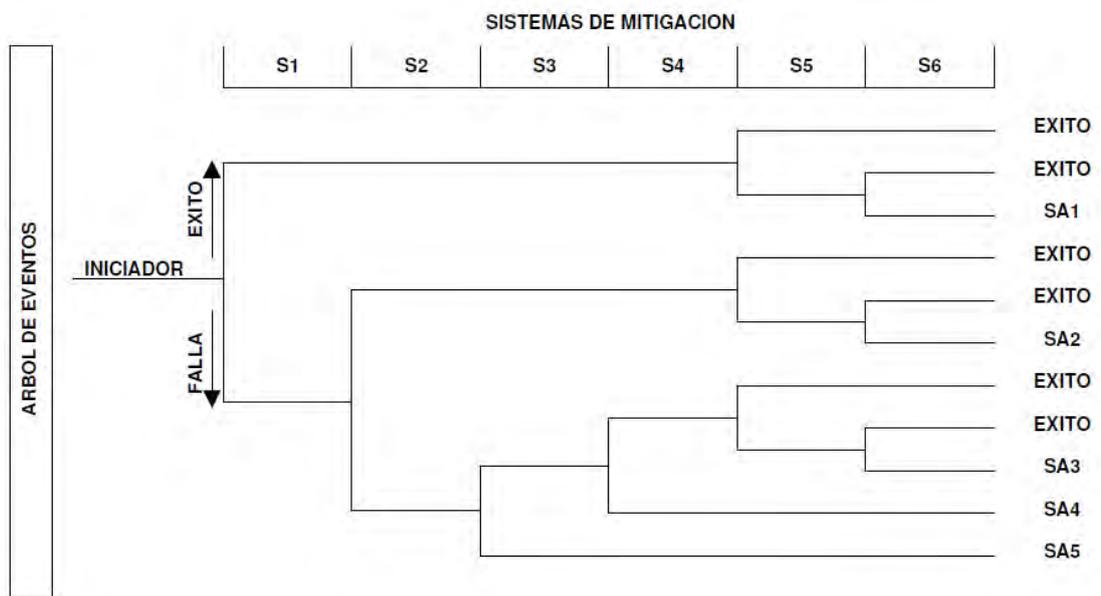
En los encabezados del árbol se enumeran los distintos sistemas o dispositivos de mitigación capaces de contrarrestar los efectos del evento iniciador; éstos generalmente se obtienen de la información de diseño y los procedimientos de operación. Para cada encabezado del árbol de eventos se pregunta si éste es capaz o no de cumplir con su función, dibujando una rama ascendente cuando tiene éxito, una rama descendente cuando tiene falla, u omitiendo la ramificación cuando su función se ha vuelto irrelevante. De esta forma, se hacen fallar cuantos sistemas sean necesarios para llegar a una condición de accidente, o bien, suficientes éxitos para tener una condición segura y estable. Los Árboles de Eventos suelen representarse de forma secuencial de izquierda a derecha o a veces también de manera vertical, con el evento inicial debajo del evento secuencial. En la Figura 2.4.c. se muestra un árbol de eventos típico.

Los pasos básicos para llevar a cabo este método son:

- i) Identificar la necesidad de realizar un Árbol de Eventos, definir su alcance, reunir la información disponible y determinar la información adicional requerida.
- ii) Identificar el o los eventos iniciadores.
- iii) Identificar el estado final o evento no deseado.
- iv) Construir el Árbol de Eventos (diagrama).
- v) Describir la secuencia de accidentes resultante.

- vi) Determinar los Conjuntos Mínimos de Corte (Minimal Cut Sets o MCS en inglés) del accidente, lo cual consiste en analizar las combinaciones mínimas de sucesos básicos que produzcan el evento no deseado.
- vii) Documentar los resultados, incluyendo los diagramas realizados, lista de secuencia de accidentes MCS, una discusión sobre las consecuencias de las diferentes secuencias de accidentes y las acciones recomendadas.

Figura 2.4.c. Ejemplo de Árbol de Eventos



En el ejemplo anterior, las siglas SA hacen referencia a las diferentes Secuencias de Accidentes, y la letra S se refiere a los Sistemas de Mitigación.

c. Árbol de Fallas

El Árbol de Fallas es un método deductivo, pues hace uso de símbolos lógicos booleanos (compuertas lógicas AND y OR). Los árboles de fallas se utilizan para obtener la probabilidad de falla de los sistemas de mitigación, así a cada encabezado del árbol de eventos corresponderá un árbol de fallas del sistema o dispositivo involucrado. De esta manera se obtiene un modelo gráfico que ilustra las combinaciones de fallas que causarán una falla específica, llamado evento tope, que puede identificarse mediante el uso de técnicas como

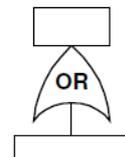
¿Qué pasa si?, HAZOP, FMEA, entre otras. Las fallas deben desglosarse en términos de componentes primarios, por ejemplo bombas o válvulas, ya que existe mayor información sobre estos. Para el presente trabajo se utilizó el análisis HAZOP como método de identificación de eventos tope.

Después de identificar el evento tope, el analista deduce las fallas de componentes o combinaciones de fallas de componentes que pueden llevar a dicho evento tope, denominada conjunto de corte. El conjunto mínimo de corte (Minimal Cut Set o MCS) es la menor combinación de fallas que de ocurrir o existir simultáneamente conducirán al evento tope. De esta manera se representan todas las maneras en las que el evento tope puede ocurrir en términos de fallas de equipos, errores humanos y circunstancias asociadas.

En la construcción del árbol se emplean principalmente tres tipos de símbolos:

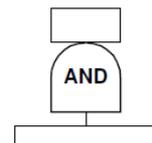
i) Compuerta OR

Se cumple cuando ocurre CUALQUIERA de sus entradas; representa los distintos modos de falla del sistema.



ii) Compuerta AND

Se cumple cuando ocurren TODAS sus entradas; sirve para representar la redundancia de componentes.



iii) Evento Básico

Es una falla o suceso para la cual se puede obtener una probabilidad. Incluyen fallas del componente, indisponibilidad por mantenimiento y factores humanos.



iv) Evento No Desarrollado

Existen sucesos en el árbol de fallos cuyo proceso de descomposición no se prosigue, bien por falta de información, o bien porque no se considera necesario hacerlo. Se representan mediante un rombo y se tratan como sucesos básicos.

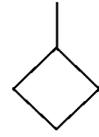
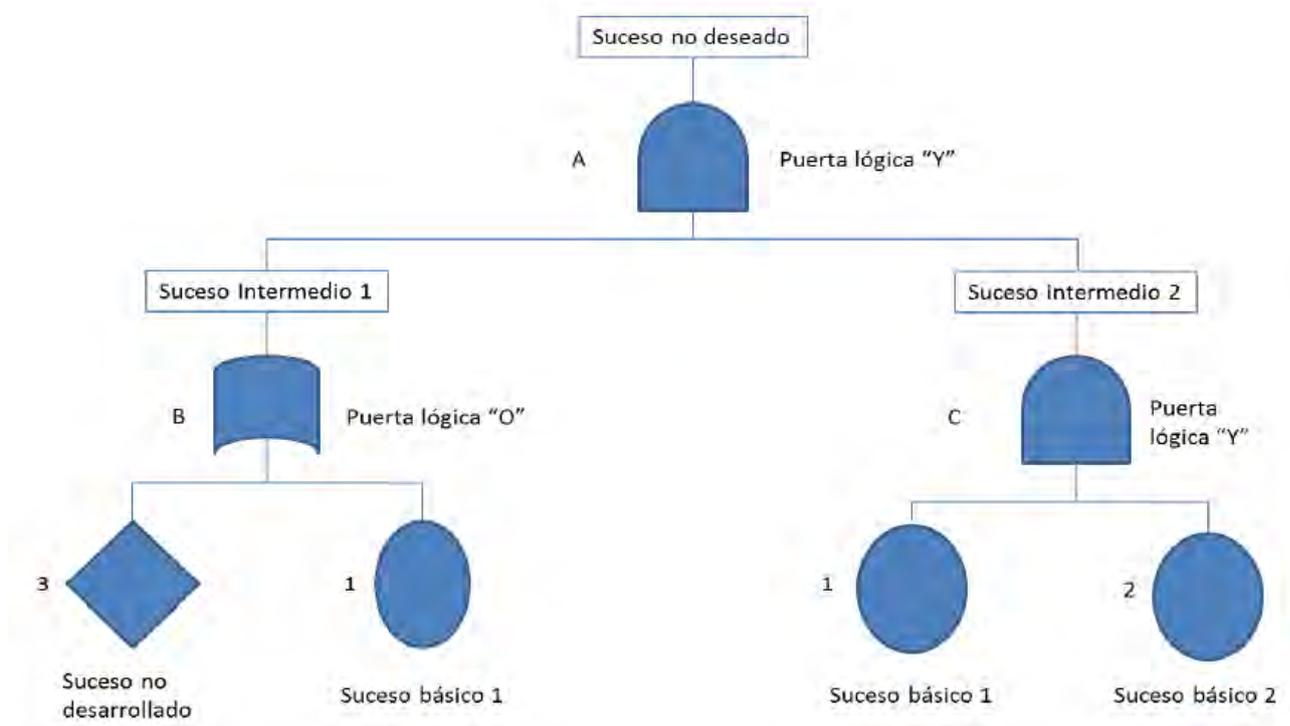


Figura 2.4.d. Ejemplo de Árbol de Fallas



Fuente: Juárez Pastrana

2.5 Normatividad

La normativa ambiental mexicana requiere estudios de riesgo para las industrias que realizan actividades altamente riesgosas. Esto se hace a través de la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas (DGGIMAR), encargada de aplicar la política general sobre materiales y residuos peligrosos, sitios contaminados con estos y la realización de actividades altamente riesgosas.

a. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

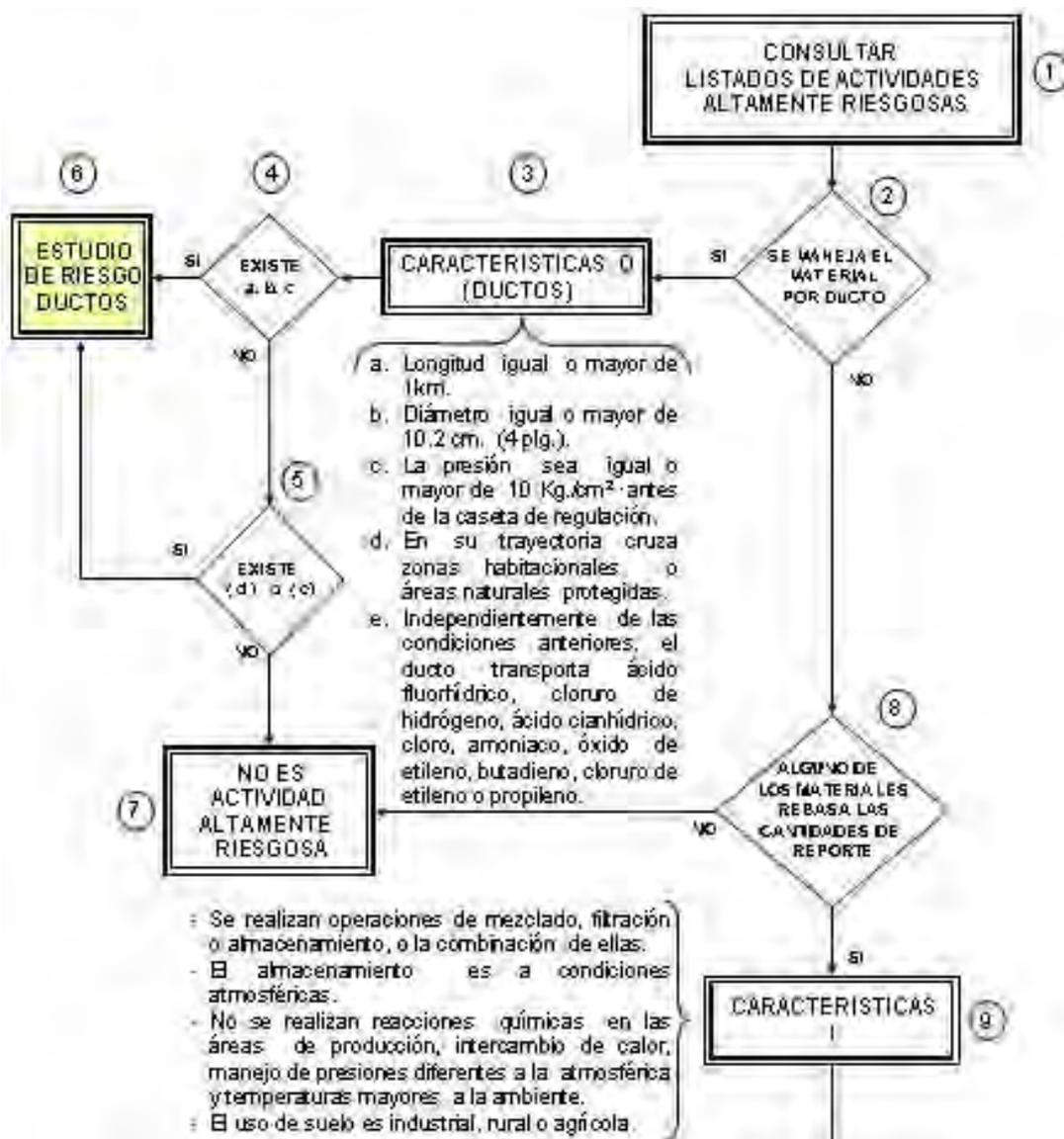
En el Artículo 147 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) se establece que “Quienes realicen actividades altamente riesgosas en los términos del Reglamento correspondiente, deberán formular y presentar a la Secretaría un estudio de riesgo ambiental, así como someter a la aprobación de dicha dependencia y de las Secretarías de Gobernación, de Energía, de Comercio y Fomento Industrial, de Salud y del Trabajo y Previsión Social, los programas para la prevención de accidentes en la realización de tales actividades, que puedan causar graves desequilibrios ecológicos”.

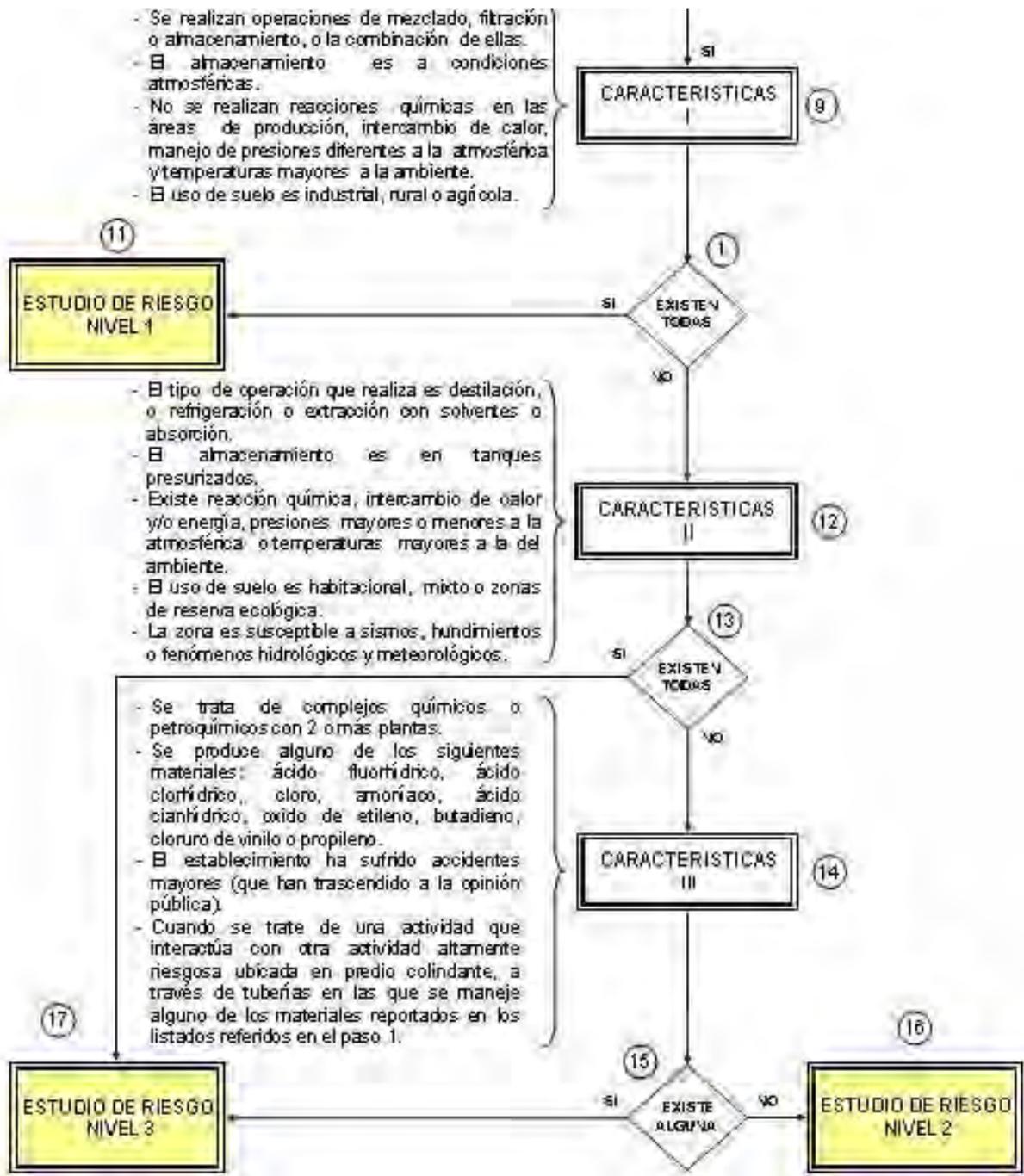
El estudio de riesgo se aplica a instalaciones en operación y consiste en hacer una evaluación técnica y cuantitativa de los posibles riesgos a los que está sometida una instalación industrial y la determinación de las consecuencias en caso de ocurrir un accidente.

En este contexto se entiende como accidente de alto riesgo ambiental: una explosión, incendio, fuga o derrame súbito que resulte de un proceso en el curso de las actividades de cualquier establecimiento, así como en ductos, en los que intervengan uno o varios materiales o sustancias peligrosos y que suponga un peligro grave (de manifestación inmediata o retardada, reversible o irreversible) para la población, los bienes y al ambiente. A este tipo de accidentes se les considera también como accidentes mayores (Serrano, 2014).

El nivel de complejidad del estudio de riesgo estará en función de la actividad que realice la instalación y esto se determina de acuerdo con un diagrama elaborado por SEMARNAT. Existen tres niveles de información para el Estudio de Riesgo (Nivel 1, 2 y 3) y un nivel específico para el caso de ductos terrestres (Nivel 0). A partir del Estudio de Riesgo se elaborará un Programa de Prevención de Accidentes (PPA), también de carácter obligatorio.

Figura 2.5.a. Diagrama para la determinación del Nivel del Estudio de Riesgo





Fuente: SEMARNAT

En el caso de centrales de CC en operación, el Estudio de Riesgo correspondiente sería un Estudio de Riesgo Nivel 2 (ERN 2), ya que el gas natural rebasa las cantidades umbral mencionadas en la NOM-028-STPS-2012 “Sistemas para la administración del trabajo – seguridad en los procesos y equipos críticos que manejen sustancias químicas peligrosas”. De acuerdo con SEMARNAT, para un ERN 2 se requiere “con base en los DTI’s de la

ingeniería de detalle, identificar los riesgos en áreas de proceso, almacenamiento y transporte, mediante la utilización de alguna de las siguientes metodologías: Análisis de Riesgo y Operabilidad (HAZOP); Análisis de Modo Falla y Efecto (FMEA) con Árbol de Eventos; Árbol de Fallas, o alguna otra con características similares a las anteriores y/o la combinación de éstas, debiéndose aplicar la metodología de acuerdo a las especificaciones propias de la misma. En caso de modificar dicha aplicación, deberá sustentarse técnicamente.”

En contraste, un Estudio de Riesgo Nivel 3 (ERN 3) requeriría aplicar metodologías como Análisis de Riesgo y Operabilidad (HAZOP) y Árbol de Fallas, Análisis de Modo Falla y Efecto (FMEA) y Árbol de Fallas; o la combinación de dos metodologías con características similares a las anteriores; es decir, se requiere de un elemento cuantitativo.

Se puede encontrar mayor información al respecto en la página de SEMARNAT referente al trámite SEMARNAT-07-008 Presentación del Estudio de Riesgo para empresas que realizan Actividades Altamente Riesgosas.

b. NOM-028-STPS-2012

La NOM-028-STPS-2012 Sistemas para la administración del trabajo – seguridad en los procesos y equipos críticos que manejen sustancias químicas peligrosas, aplica en los centros de trabajo que manejan sustancias químicas tóxicas, explosivas o inflamables, y en cantidades que son consideradas altamente riesgosas, tanto para los trabajadores, como para las instalaciones, el medio ambiente y la comunidad en la que se encuentran, por las fugas incontroladas, explosiones o incendios que pueden generar. En el caso de centrales de CC aplica esta norma dado que se manejen más de 4,600 kg de gas natural.

Figura 2.5.b. Sustancias químicas peligrosas según NOM-028-STPS-2012

No.	Sustancia	No. CAS	Cantidad Umbral (kg)
75.	Furano	110-00-9	300
76.	Gas Amargo (Azufroso)	-	4,600
77.	Gas Dulce Seco (Gas Natural)	-	4,600
78.	Gasolina Regular	86290-81-5	4,600

Fuente: STPS

El patrón deberá contar con un análisis de riesgos de todos los equipos críticos y procesos del centro de trabajo, el cual deberá actualizarse por lo menos cada cinco años o cuando se realicen modificaciones a los procesos o se investigue un accidente mayor. No se determina qué tipo de análisis de riesgo debe emplearse, pero se debe contar con análisis de causas y consecuencias, recomendaciones para reducir o eliminar un riesgo, identificación de la frecuencia de ocurrencia, entre otros. Cabe mencionar que estas características son cumplidas por al emplear el análisis HAZOP en conjunto con Árboles de Eventos y Árboles de Fallas.

c. Otros

El cumplimiento de muchas otras normas de la STPS podría facilitarse de contar con estudios de riesgo adecuados. Por ejemplo, según la NOM-017-STPS-2008, el patrón está obligado a realizar un análisis de riesgo para poder determinar qué equipo de protección necesitan sus trabajadores. Contar con un buen análisis de riesgos del proceso puede mejorar la seguridad de los trabajadores.

Capítulo III. Análisis y Recomendación

3.1 Descripción y Justificación del Nodo Elegido

Para realizar los análisis de riesgo se eligió al Sistema de Suministro de Gas de una planta de ciclo combinado que actualmente opera en Estados Unidos. Como se menciona en los objetivos del presente trabajo, se pretende realizar el análisis de riesgos de un nodo de una central de CC en operación para mostrar la magnitud de la información y recursos requeridos para realizar los análisis de riesgo; así como mostrar los potenciales beneficios de realizarlos. Las técnicas a utilizar serán HAZOP, árbol de eventos y árbol de fallas con análisis probabilístico.

Se ha omitido el análisis de los riesgos por eventos externos, como pueden ser las condiciones climatológicas o desastres naturales, para concentrar la atención sólo en los riesgos por eventos internos. Sin embargo, para una planta típica de CC en México habría que considerar el efecto de riesgos externos tales como sismos, inundaciones y temperaturas extremas, que son algunos de los eventos externos con mayor probabilidad de ocurrencia.

En las industrias este tipo de análisis debe ser realizado por equipos multidisciplinarios y gente con la experiencia y conocimiento necesarios del proceso. El alcance del presente trabajo es mostrar cómo se aplican estas metodologías y analizar los potenciales beneficios de implementarlas; no así la realización de los análisis con la profundidad requerida para la industria. Asimismo, se han tomado ciertas consideraciones y simplificaciones del proceso, que se mencionarán más adelante. Sin embargo, se espera que este trabajo pueda servir como una guía preliminar para aquellos profesionistas que se vean en la necesidad de realizar este tipo de análisis.

a. Justificación de Elección de la Unidad de Proceso

Como se menciona en el marco teórico, una de las causas más comunes para el paro de una central de CC es el fallo en la alimentación del combustible. El Sistema de Suministro de Gas, el cual incluye a la Estación de Regulación y Medición de Gas (ERM), se encarga de asegurar un suministro de gas de

calidad en términos de presión, temperatura y limpieza, así como de monitorear el flujo de gas y su poder calorífico para ajustar las condiciones de operación en caso de ser necesario. Dentro de este sistema se encuentra también la válvula maestra del suministro, que en caso de un incidente, es de gran importancia para evitar llegar a consecuencias mayores. Por lo anterior, resulta conveniente realizar un análisis de riesgos cuantitativo para el Sistema de Suministro de Gas.

b. Características Generales de la Central de CC

La planta estudiada en los análisis se ubica en Estados Unidos de América y es una central de CC cuyo combustible primario es el gas natural. La planta tiene una configuración 2x1 (dos turbinas de gas y una turbina de vapor) y tiene una capacidad instalada de 657 MW.

c. Características Generales y Componentes del Sistema de Suministro de Gas

El cabezal principal de gas se encuentra conectado a la descarga de la estación de medición de flujo. La estación de medición de flujo no pertenece a la misma compañía que la central, pero se incluye en la descripción para describir completamente las funciones requeridas del sistema. El Sistema de Suministro de Gas comprende todos los equipos y componentes que van del cabezal principal de gas hasta el punto terminal de los usuarios de gas (Turbina de Combustión y Quemador del sistema HRSG). Para mayores detalles pueden consultarse los diagramas contenidos en el Apéndice E.

El cabezal principal se divide después de la Estación de Control de Presión para suministrar gas tanto a las Turbinas de Combustión (TC) como a los quemadores de los HRSG. Cada TC cuenta con un ensamble de medición de flujo y un patín de acondicionamiento de gas que consta de un filtro absoluto de gas, un calentador de rendimiento, un calentador eléctrico de arranque, un depurador de gas y un tanque de drenado. Cada HRSG cuenta con un

ensamble de medición de flujo, un patín de reducción de presión y un patín de suministro de gas para el quemador.

A continuación se mencionan a detalle los componentes del Sistema de Suministro de Gas:

- i) Válvula maestra con venteo
La válvula maestra se encuentra en el cabezal principal de suministro de la planta. Esta válvula se conecta con una válvula de venteo.
- ii) Filtro separador
- iii) Estación de control de presión
Cuenta con control de rango dividido.
- iv) Válvula de seguridad
Con una presión establecida de 550 psig para proteger al sistema de un fallo en las válvulas de reducción de presión.
- v) Patín consolidado para acondicionamiento de gas, 1 por Turbina de Combustión (TC)
- vi) Separadores absolutos de gas combustible, 2 por TC
Se trata de un separador de dos etapas en vertical, donde se emplean multiclones para separar inercialmente las gotas y partículas más grandes en la primera etapa y filtros coalescentes en la segunda.
- vii) Calentadores de rendimiento, 2 por TC
Calientan el gas hasta 365°F durante operación normal. Este calentador emplea agua caliente de la sección de Presión Intermedia (IP) del HRSG.
- viii) Calentador eléctrico de arranque para gas combustible, 1 por TC; de tipo tubular.
- ix) Depurador de gas, 1 por TC
Provee protección contra arrastre de líquidos en el caso de una fuga de agua en el calentador.
- x) Tanque de drenado del patín para acondicionamiento de gas combustible, 1 por TC
Colecta líquidos a través de desagües de operación manual y a su vez se drena manualmente hacia un contenedor especial.

- xi) Sistema de medición de flujo de gas en la Turbina de Combustión (TC), 1 por TC
- xii) Estación de reducción y control de presión de gas del HRSG, 1 por HRSG
Se cuenta con una válvula de seguridad ajustada a una presión de 75 psig para proteger los quemadores de ducto.
- xiii) Medidor de flujo de HRSG, 1 por HRSG

3.2 Análisis HAZOP

Es importante mencionar que un análisis HAZOP detallado requiere de un equipo multidisciplinario para obtener la opinión de expertos sobre las desviaciones identificadas y posiblemente identificar más desviaciones con base en su experiencia. Dada la cantidad de recursos disponibles, en el presente análisis se consideran solamente las situaciones más relevantes o probables, esperando que dicho análisis sirva como un ejemplo de los resultados que pueden obtenerse de un estudio HAZOP.

Para realizar el análisis HAZOP se identificaron los siguientes nodos dentro del Sistema de Suministro de Gas: Línea de Suministro de Gas (Fuel Supply Line), Filtro Separador (Filter 561-SKD-9002), Estación de Regulación de Presión (Pressure Regulating Station), Patín Consolidado para Acondicionamiento de Gas para la TC (Consolidated Fuel Gas Conditioning Skid for CT) y Línea de Suministro al Quemador de Ducto del HRSG (HRSG Duct Burner Supply Line).

A continuación se muestra el análisis HAZOP para el primer nodo del Sistema de Suministro de Gas: la Línea de Suministro. Los análisis para los nodos restantes pueden consultarse en las Tablas 3.2.b-e del Apéndice B.

Tabla 3.2.a. Análisis HAZOP Nodo 1: Línea de Suministro de Gas

No. SECTION/NODE: Fuel supply line (including flow meter section) to FILTER 561-SKD-9002

System Description/Procedures: SD-561-0001

INTENTION: Supply fuel gas at 50-130°F, 600-925 psig, 211532 Lbm/h

Parameter	Guide word	Deviation	Consequences	Causes	Safeguards	Recommendations
Pressure	No/Low	No/Low Pressure	Plant shutdown	No/low pressure supply gas (previous installation)	Flowmeter section	Low Pressure Alarm in fuel gas system or additional measurement instrument.
				Master valve (561-ABV-9001-1) fail-close	Emergency Shutdown pushbutton (ESD-9001-1). The Master Shut-Off valve and the vent valve are interlocked to prevent both being open at the same time.	
			Flammable cloud with explosion potential	Leak after master valve (561-ABV-9001-1)		Verify inspection and maintenance records. Perform corrosion tests periodically.
	High	High Pressure	Explosion potential	Obstruction of downstream pipe/equipment	Automatic Master Shut-Off valve closure on high pressure. Emergency Shutdown pushbutton (ESD-9001-1)	Verify inspection and maintenance records.
				Vent valve (561-ABV-9002-1) fails-closed	Double block and bleed is provided to isolate any system capable of being serviced while the fuel gas system is pressurized.	Verify communication protocol with gas suppliers.
				High gas pressure (previous installation)	Automatic master Shut-Off valve closure on high pressure. Emergency Shutdown pushbutton (ESD-9001-1).	PRV

Tabla 3.2.a. (Continuación) Análisis HAZOP Nodo 1: Línea de Suministro de Gas

Parameter	Guide word	Deviation	Consequences	Causes	Safeguards	Recommendations
Temperature	Low	Low Temperature	Damage in pipeline or equipment (ice blockage)	Climate conditions (snow, hail, wind)	Performance heater (downstream), temperature and pressure indicators.	Monitor climate conditions and forecast.
Containment	No	Loss of Containment	Gas Leak	Pipe/equipment hit by something (hail, tree, car, person)	Double block and bleed is provided to isolate any system capable of being serviced while the fuel gas system is pressurized. Emergency Shutdown pushbutton ESD-9001-1	Verify inspection and maintenance records. Perform corrosion tests periodically.
					Security (fence, watchmen)	
				Corrosion	Chemical Feedwater System	Perform corrosion tests periodically.

El análisis HAZOP es una técnica flexible, por poder aplicarse a numerosas industrias, y sencilla de aprender, por su carácter metodológico. Para un análisis preliminar me parece posible realizar el estudio sin contar con conocimientos técnicos muy profundos; sin embargo resulta primordial contar con expertos en diferentes áreas para realizar un análisis adecuado y completo, de lo contrario podrían dejarse de lado situaciones de riesgo y detalles importantes propios de cada área. A continuación se muestran algunas de sus ventajas y desventajas.

Tabla 3.3.a. Algunas ventajas y desventajas del análisis HAZOP

Ventajas	Desventajas
Extremadamente útil durante la fase de desarrollo de ingeniería de un proyecto, por su carácter preventivo.	Es una técnica cualitativa; no hay una valoración real de la frecuencia de las causas que producen una consecuencia grave ni tampoco del alcance de la misma
Técnica sistemática que puede crear hábitos metodológicos útiles desde el punto de vista de seguridad	Las modificaciones a la planta surgidas de las recomendaciones deben analizarse con mayor detalle y otros criterios (económicos)
El coordinador mejora su conocimiento del proceso	Los resultados obtenidos son muy dependientes de la calidad del equipo
Como recursos sólo se requieren tiempo y dedicación	Altamente dependiente de la información disponible; puede omitirse un riesgo si los datos de partida son erróneos o están desactualizados.

El análisis presentado fue realizado por una sola persona, lo cual fue posible gracias a que se contó con la asesoría de personas con experiencia en realizar este tipo de análisis y a que se tuvo comunicación con trabajadores de la planta para resolver dudas y preguntas sobre los procesos. Es importante reiterar que la profundidad y detalle necesarios para este tipo de análisis se logran sólo mediante equipos multidisciplinarios con experiencia y dedicando el tiempo suficiente al análisis. De este análisis HAZOP en particular, las recomendaciones fueron la parte más complicada por no contar con experiencia suficiente ni conocer de cerca el proceso. Por lo demás, el carácter sistémico de la técnica la hace fácil de seguir.

La duración de un estudio HAZOP depende mucho de la complejidad de la instalación, pudiendo ser desde un día hasta varias semanas. De acuerdo con Guzmán & Vugdelija, el análisis de un nodo en una central de CC puede requerir unas 160 horas de trabajo para un equipo con experiencia. Típicamente cada sesión dura unas 3 horas, con los mismos integrantes, para mantener la continuidad y objetivos del análisis (Juárez Pastrana, 2014). El análisis HAZOP presentado tomó aproximadamente 21 horas de trabajo.

3.3 Árbol de Eventos

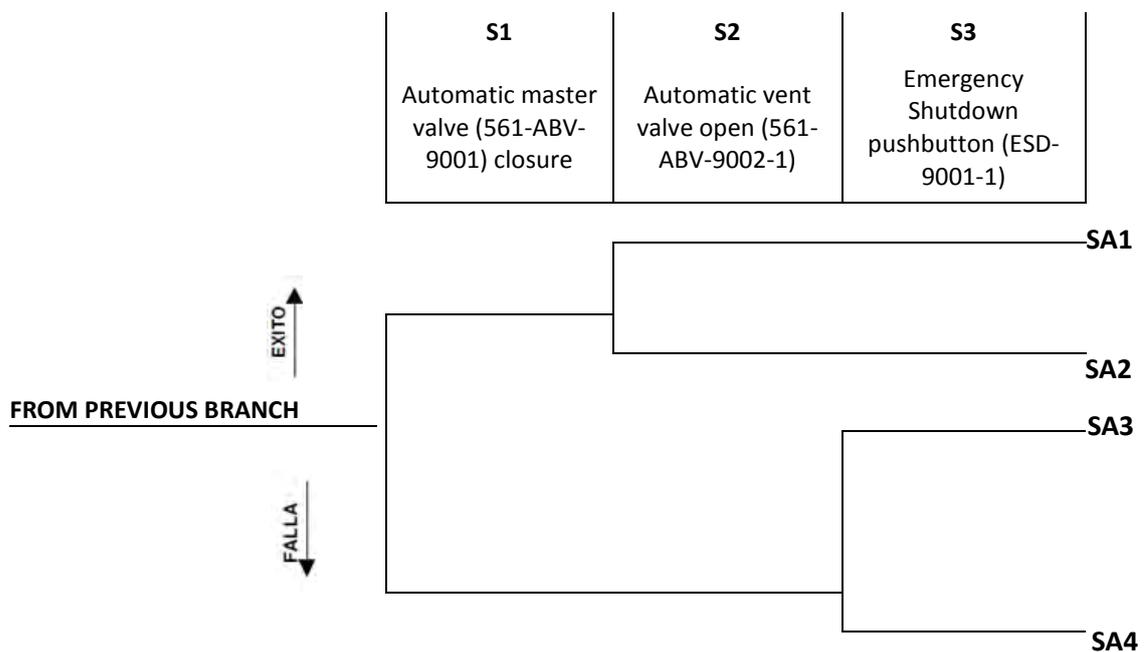
El árbol de eventos permite mirar de una forma secuencial las salvaguardias existentes en el caso de una situación no deseada. En mi opinión, si previamente se cuenta con un análisis HAZOP, este será de gran ayuda para generar el árbol de eventos, aunque puede ser complicado determinar la secuencia que siguen las salvaguardias cuando no se conoce de cerca o minuciosamente el proceso. Asimismo, puede ser un poco difícil determinar los límites (inicio y fin) del árbol, ya que los eventos iniciadores pueden provenir de la consecuencia de otro árbol de eventos. El desarrollo de los árboles de eventos para los 5 nodos del sistema tomó aproximadamente 15 horas de trabajo. A continuación se mencionan algunas ventajas y desventajas de los árboles de eventos.

Tabla 3.3.b. Algunas ventajas y desventajas de los Árboles de Eventos

Ventajas	Desventajas
Permite preparar un análisis cuantitativo si se toman en cuenta probabilidades y frecuencias de falla.	Puede requerir mucho tiempo si no se cuenta con software adecuado (sobre todo cuando el análisis es cuantitativo).
Los analistas ganan conocimiento detallado del equipo y del proceso.	Puede omitir algún sistema que se puede usar en caso de emergencia. Por ello debe presentarse el árbol de eventos con el personal.
Genera recomendaciones de mejora muy concretas (y de alcance medible si se hace el análisis cuantitativo)	Puede haber errores en la lógica del árbol por la dificultad de establecer causas-consecuencias o relaciones entre los componentes.

A lo largo de los distintos nodos del sistema se encontraron secuencias de salvaguardias muy parecidas para diversos eventos iniciadores, lo que facilitó el análisis. Por ejemplo, los árboles de eventos de Fuga de Gas (Gas Leak) y Obstrucción de Líneas Aguas Abajo (Obstruction of Downstream Lines) comparten la secuencia final, en la cual se cierra la válvula maestra y se abre la de venteo, como se muestra a continuación.

Figura 3.3.b. Secuencia para activación de válvula maestra y válvula de venteo



Los árboles de eventos para los nodos 1 a 5 pueden consultarse en las Figuras 3.3.1-27 en el Apéndice C.

Cabe mencionar que al analizar los árboles de eventos originados por el evento de Baja Calidad de Gas (Figuras 3.3.7, 3.3.20 y 3.3.26), se determinó con base en la información consultada, que no existe un protocolo de ajuste del proceso en caso de que los filtros fallen, dejando al sistema vulnerable. Esta podría ser un área de oportunidad a tomar en cuenta para un estudio posterior; podrían revisarse los registros de mantenimiento para ver con qué frecuencia se cambian los filtros o implementar un protocolo de ajuste a las variables del proceso.

3.4 Árbol de Fallas

Se eligió el primer nodo del sistema de suministro de gas para realizar el árbol de fallas: Línea de Suministro de Gas. El análisis se realizó con base en los árboles de eventos de dicho nodo (Apéndice C - Nodo 1), utilizando el software *Saphire 7*.³ El desarrollo de los árboles de falla para el Nodo 1 tomó aproximadamente 5 horas de trabajo.

Se utilizó información de falla de componentes del Center for Chemical Process Safety tomando en cuenta la ecuación de cálculo de probabilidad de falla durante operación continua irreparable: $Q = 1 - e^{-\lambda T_M}$, donde λ es la tasa de falla y T_M el tiempo de misión (se consideró de 24 horas). Los siguientes criterios fueron usados para la tasa de falla cuando no se contaba con información: 10^{-5} por año para componentes pasivos y 10^{-2} por año para componentes activos (CCPS, 1989).

En la Tabla 3.4.a. del Apéndice D se muestra la probabilidad de falla para cada árbol de fallas creado. En la Tabla 3.4.b. del Apéndice D se muestra la lógica de cada árbol de falla con la probabilidad de ocurrencia de sus eventos básicos.

Las dos secuencias con la frecuencia de falla más alta en este análisis se relacionan con el fallo en la operación de la válvula de venteo (561-ABV-9001-1) cuando el sistema de control envía la señal de cierre automático. El evento "VENT" (92.7% de las fallas) es el modo de falla en el cual no se produce cambio en la posición de la válvula al recibir la señal, mientras que "VENT1" (3.6% de las fallas) hace referencia a una operación espuria o errónea cuando se cierra la válvula. Ambas fallas producen una secuencia cuyo estado final es "GAS LEAK THROUGH VALVE", que hace referencia a una fuga de gas con potencial de explosión.⁴ Podría decirse que esta válvula es el componente que más contribuye al riesgo en cuánto a frecuencia de ocurrencia, ya que el método empleado no considera la magnitud de las consecuencias.

³ Saphire, Systems Analysis Programs for Hands-on Integrated Reliability Evaluations, Idaho National Laboratory, <https://saphire.inl.gov/>.

El siguiente conjunto de corte con mayor frecuencia es el relacionado con la falla del instrumento de presión 561 PI 9001-1, lo que causa que no se detecte el gas en el caso del evento iniciador Fuga de Gas (GAS-LEAK). El estado final del sistema en este caso es Potencial de Explosión (EXPLOSION-POTENTIAL)⁴. Una explosión tendría implicaciones graves para la planta, pues produciría daño en equipos críticos, contaminación y daños en el medio ambiente; así como el riesgo de producir lesiones o incluso la muerte de trabajadores.

Otros conjuntos de corte analizados conducen al estado final de Apagado de la Planta (PLANT SHUTDOWN), el cual tiene implicaciones económicas y de desgaste para los componentes de la planta, así como el posible incumplimiento de obligaciones contractuales. En la página siguiente se muestran todos los conjuntos de corte para el Nodo 1 del Sistema de Suministro de Gas.

A continuación se mencionan algunas ventajas y desventajas de los Árboles de Fallas.

Tabla 3.3.c Algunas ventajas y desventajas de los Árboles de Fallas

Ventajas	Desventajas
Permite preparar un análisis cuantitativo detallado	Puede llevar un tiempo considerable si no se cuenta con software adecuado.
Los analistas obtienen conocimiento profundo sobre el proceso así como de los puntos fuertes y débiles en cuanto a seguridad	Las fallas se consideran totales, no parciales.
Genera recomendaciones de mejora concretas (y de alcance medido si se hace el análisis cuantitativo).	Pueden darse errores en la lógica del árbol: no considerar fallos intermedios, relaciones-causa-efecto y/o puertas incorrectas, etc.
Facilita el establecimiento de prioridades para proponer y ejecutar mejoras. Permite comparar alternativas.	No se toma en cuenta la velocidad a la que puedan producirse los acontecimientos, lo que podría determinar que un evento sea peligroso o no.

⁴ Para que se produzca una explosión, se requieren un conjunto de condiciones en el sistema, por ejemplo ventilación inadecuada del área o la presencia de una chispa. Las consecuencias también dependerán de la magnitud de la fuga.

Tabla 3.4.c1. Conjuntos de Corte para Nodo 1

Cut Set No.	Frequency per Year	% Total	Events
1	1.72E-03	92.67	IE->VENT_V-O, VENT (NO CHANGE OF POSITION)
2	6.50E-05	3.63	IE->VENT_V-O, VENT1 (SPURIOUS OPERATION)
3	2.63E-05	1.47	IE->GAS-LEAK, P-INSTR-DET-LEAK
4	2.56E-05	1.43	IE->NO_PRESSURE, FLOWMETER
5	8.99E-06	0.50	IE->OBSTRUCTION, OBSTR-HP-DET
6	5.11E-06	0.29	IE->HIGH-GAS-PRESSURE, P-INSTR-DETECTS-HP
7	1.67E-07	0.01	IE->VENT_V-O, FAIL-FUNCT, NO-CHANGE
8	3.43E-08	0.002	IE->VENT_V-O, NO-CHANGE, NO-SIGNAL
9	6.55E-09	3.66E-04	IE->VENT_V-O, FAIL-FUNCT, SPURIOUS-OP
10	5.96E-09	3.33E-04	IE->MASTER-V-C, MASTER, SPURIOUS-OP2
11	3.65E-09	2.04E-04	IE->MASTER-V-C, MASTER, NO-CHANGE1
12	2.22E-09	1.24E-04	IE->HIGH-GAS-PRESSURE, FAIL-FUNCT, VENT
13	2.22E-09	1.24E-04	IE->HIGH-GAS-PRESSURE, FAIL-FUNCT, NO-CHANGE
14	1.72E-09	9.60E-05	IE->GAS-LEAK, FAIL-FUNCT, VENT (NO CHANGE)
15	1.72E-09	9.60E-05	IE->GAS-LEAK, FAIL-FUNCT, NO-CHANGE
16	1.34E-09	7.49E-05	IE->VENT_V-O, NO-SIGNAL, SPURIOUS-OP
17	9.11E-10	5.09E-05	IE->OBSTRUCTION, FAIL-FUNCT, VENT (NO CHANGE)
18	9.11E-10	5.09E-05	IE->OBSTRUCTION, FAIL-FUNCT, NO-CHANGE
19	4.54E-10	2.53E-05	IE->HIGH-GAS-PRESSURE, NO-CHANGE, NO-SIGNAL
20	4.54E-10	2.53E-05	IE->HIGH-GAS-PRESSURE, NO-SIGNAL, VENT
21	3.52E-10	1.97E-05	IE->GAS-LEAK, NO-CHANGE, NO-SIGNAL
22	3.52E-10	1.97E-05	IE->GAS-LEAK, NO-SIGNAL, VENT
23	2.33E-10	1.30E-05	IE->MASTER-V-C, MASTER-1, SPURIOUS-OP2
24	2.12E-10	1.19E-05	IE->GAS-LEAK, GAS-DETCOR
25	1.87E-10	1.04E-05	IE->OBSTRUCTION, NO-CHANGE, NO-SIGNAL
26	1.87E-10	1.04E-05	IE->OBSTRUCTION, NO-SIGNAL, VENT
27	1.43E-10	7.99E-06	IE->MASTER-V-C, MASTER-1, NO-CHANGE1
28	8.68E-11	4.85E-06	IE->HIGH-GAS-PRESSURE, FAIL-FUNCT, VENT1
29	8.68E-11	4.85E-06	IE->HIGH-GAS-PRESSURE, FAIL-FUNCT, SPURIOUS-OP
30	6.73E-11	3.76E-06	IE->GAS-LEAK, FAIL-FUNCT, VENT1
31	6.73E-11	3.76E-06	IE->GAS-LEAK, FAIL-FUNCT, SPURIOUS-OP
32	3.57E-11	1.99E-06	IE->OBSTRUCTION, FAIL-FUNCT, VENT1
33	3.57E-11	1.99E-06	IE->OBSTRUCTION, FAIL-FUNCT, SPURIOUS-OP
34	1.78E-11	9.93E-07	IE->HIGH-GAS-PRESSURE, NO-SIGNAL, VENT1
35	1.78E-11	9.93E-07	IE->HIGH-GAS-PRESSURE, NO-SIGNAL, SPURIOUS-OP
36	1.38E-11	7.70E-07	IE->GAS-LEAK, NO-SIGNAL, VENT1
37	1.38E-11	7.70E-07	IE->GAS-LEAK, NO-SIGNAL, SPURIOUS-OP

Tabla 3.4.c2. Conjuntos de Corte por Estado Final

Final State - EXPLOSION POTENTIAL			
Cut No.	% Cut Set	Frequency per Year	Cut Sets
1	65.12	2.63E-05	IE->GAS-LEAK, P-INSTR-DET-LEAK
2	22.22	9.99E-06	IE->OBSTRUCTION, OBSTR-HP-DET
3	12.63	5.11E-06	IE->HIGH-GAS-PRESSURE, P-INSTR-DETECTS-HP
4	0.01	2.22E-09	IE->HIGH-GAS-PRESSURE, FAIL-FUNCT, VENT
5	0.01	2.22E-09	IE->HIGH-GAS-PRESSURE, FAIL-FUNCT, NO-CHANGE
6	0.00	1.72E-09	IE->GAS-LEAK, FAIL-FUNCT, VENT (NO CHANGE)
7	0.00	1.72E-09	IE->GAS-LEAK, FAIL-FUNCT, NO-CHANGE
8	0.00	9.11E-10	IE->OBSTRUCTION, FAIL-FUNCT, VENT
9	0.00	9.11E-10	IE->OBSTRUCTION, FAIL-FUNCT, NO-CHANGE
10	0.00	4.546E-10	IE->HIGH-GAS-PRESSURE, NO-CHANGE, NO-SIGNAL
11	0.00	4.54E-10	IE->HIGH-GAS-PRESSURE, NO-SIGNAL, VENT
12	0.00	3.52E-10	IE->GAS-LEAK, NO-CHANGE, NO-SIGNAL
13	0.00	3.52E-10	IE->GAS-LEAK, NO-SIGNAL, VENT
14	0.00	2.12E-10	IE->GAS-LEAK, GAS-DECTOR
15	0.00	1.87E-10	IE->OBSTRUCTION, NO-CHANGE, NO-SIGNAL
16	0.00	1.87E-10	IE->OBSTRUCTION, NO-SIGNAL, VENT
17	0.00	8.68E-11	IE->HIGH-GAS-PRESSURE, FAIL-FUNCT, VENT1
18	0.00	8.68E-11	IE->HIGH-GAS-PRESSURE, FAIL-FUNCT, SPURIOUS-OP
19	0.00	6.73E-11	IE->GAS-LEAK, FAIL-FUNCT, VENT1
20	0.00	6.73E-11	IE->GAS-LEAK, FAIL-FUNCT, SPURIOUS-OP
21	0.00	3.57E-11	IE->OBSTRUCTION, FAIL-FUNCT, VENT1
22	0.00	3.57E-11	IE->OBSTRUCTION, FAIL-FUNCT, SPURIOUS-OP
23	0.00	1.78E-11	IE->HIGH-GAS-PRESSURE, NO-SIGNAL, VENT1
24	0.00	1.78E-11	IE->HIGH-GAS-PRESSURE, NO-SIGNAL, SPURIOUS-OP
25	0.00	1.38E-11	IE->GAS-LEAK, NO-SIGNAL, VENT1
26	0.00	1.38E-11	IE->GAS-LEAK, NO-SIGNAL, SPURIOUS-OP

Final State - PLANT SHUTDOWN			
Cut No.	% Cut Set	Frequency per Year	Cut Sets
1	99.96	2.56E-05	IE->NO_PRESSURE, FLOWMETER
2	0.02	5.96E-09	IE->MASTER-V-C, MASTER, SPURIOUS-OP2
3	0.01	3.65E-09	IE->MASTER-V-C, MASTER, NO-CHANGE1
4	0.00	2.33E-10	IE->MASTER-V-C, MASTER-1, SPURIOUS-OP2
5	0.00	1.43E-10	IE->MASTER-V-C, MASTER-1, NO-CHANGE1

Final State - GAS LEAK THROUGH VALVE			
Cut No.	% Cut Set	Frequency per Year	Cut Sets
1	96.23	1.72-03	IE->VENT_V-O, VENT (NO CHANGE)
2	3.77	6.50E-05	IE->VENT_V-O, VENT1 (SPURIOUS OP)
3	0.01	1.67E-07	IE->VENT_V-O, FAIL-FUNCT, NO-CHANGE
4	0.00	3.43E-08	IE->VENT_V-O, NO-CHANGE, NO-SIGNAL
5	0.00	6.55E-09	IE->VENT_V-O, FAIL-FUNCT, SPURIOUS-OP
6	0.00	1.34E-09	IE->VENT_V-O, NO-SIGNAL, SPURIOUS-OP

A continuación se realiza una propuesta preliminar e hipotética para reducir la frecuencia de ocurrencia de algunos de los conjuntos de corte antes mencionados.

a. Cut Set 1 – Alta Presión por Obstrucción no Detectada

Este conjunto se origina al producirse el evento iniciador Alta Presión (HIGH-PRESSURE) que no se detecta debido a una falla en el instrumento de presión 561 PI 9001-1. El estado final sería Potencial de Explosión (EXPLOSION POTENTIAL) debido a la alta presión, lo cual podría tener consecuencias graves para los operadores, o en el mejor escenario, daños a los equipos que ocasionen el apagado temporal o permanente de la planta.

Es importante señalar que se cuenta con diversas salvaguardias que pueden detectar y proteger al sistema contra altas presiones en los nodos subsecuentes; sin embargo por ahora sólo se analiza el primero (Línea de Suministro de Gas) para realizar un análisis preliminar y aprender a aplicar las metodologías.

Si se añade un dispositivo de reducción de presión antes de la sección de medición, como una válvula de seguridad para reducción de presión (PRV), se reduce la frecuencia anual de falla de la secuencia de 8.99×10^{-6} hasta 2.06×10^{-8} , una disminución del 99.98%. Considerando que una PRV para una tubería de 12" ronda los \$15,000 USD (FLOMATIC, 2016), esta inversión representaría apenas el 0.08% de los costos variables anuales, o menos del 1% de los mensuales, de la planta (Ver Tabla 3.4.e. - Costos Estimados para Plantas de CC).

Figura 3.4.d1. Árbol de Eventos Original – Cut Set 1

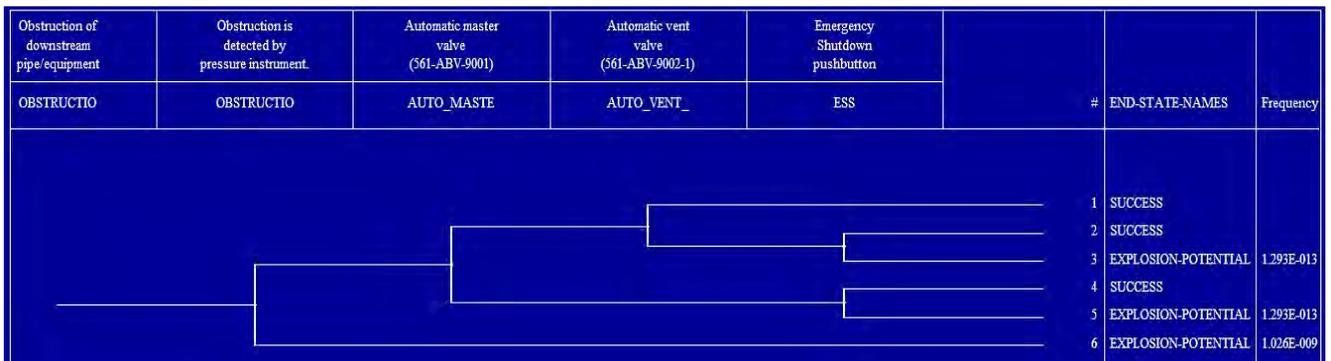


Figura 3.4.d2. Árbol de Eventos con Salvaguardia Propuesta – Cut Set 1

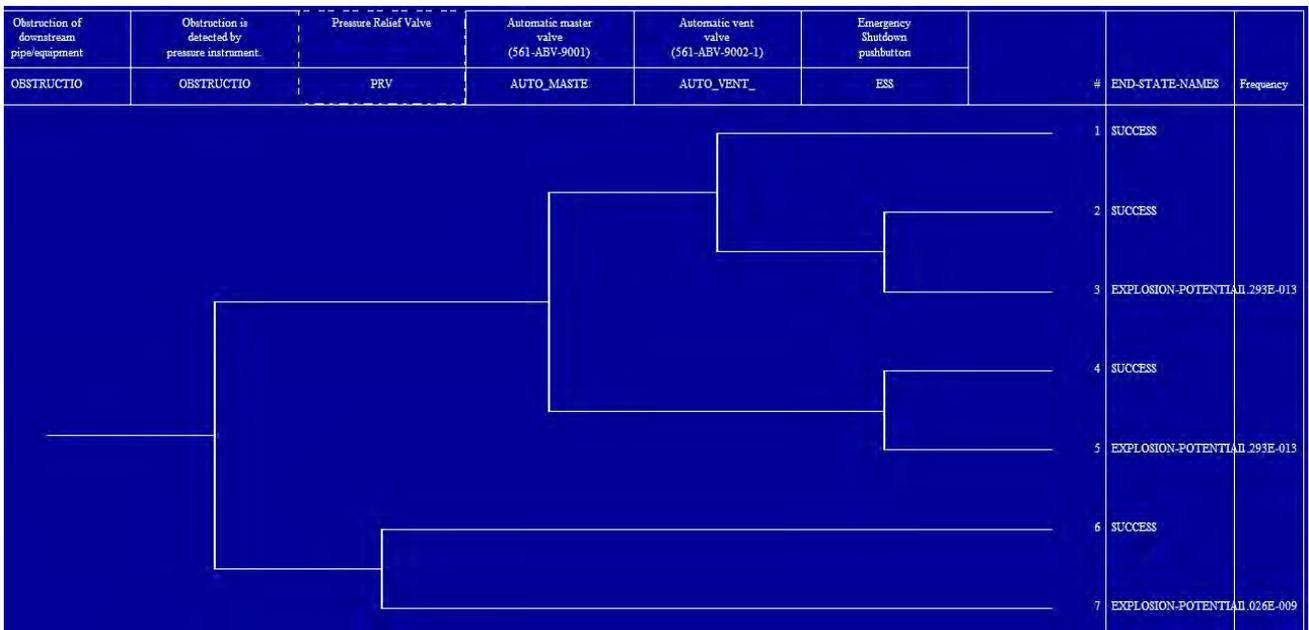


Figura 3.4.d3. Árbol de Fallas de la Salvaguardia Propuesta – Cut Set 1

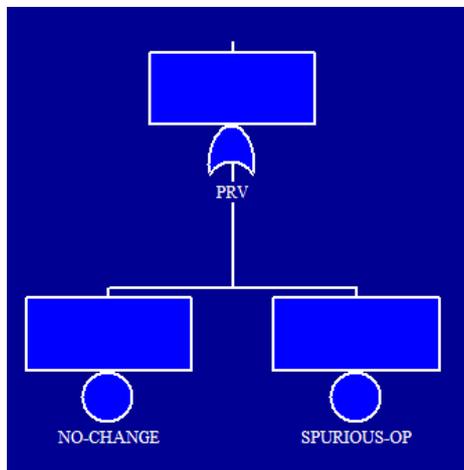


Tabla 3.4.d4. Lógica y Probabilidad de Falla para la Salvaguardia Propuesta – Cut Set 1

PRV OR (Pressure Relief Valve)	
. NO-CHANGE	(2.200E-003)
. SPURIOUS-OP	(8.616E-005)

Tabla 3.4.e. Costos Estimados para Plantas de CC

Estimated costs for conventional CC plants as of 2012 (EIA, 2013)			Estimated costs for a 657MW CC plant		
Overnight Cap. Cost (\$/kw)	Fixed O&M Cost (\$/kW-yr)	Variable O&M Cost (\$/MWh)	Overnight Cap. Cost (\$)	Fixed O&M Cost (\$/yr)	Variable O&M Cost (\$/yr)
917	13.17	3.6	602,469,000	8,652,690	18,921,600

b. Cut Set 2 – Baja (o Nula) Presión no Detectada

Este conjunto se origina al producirse el evento iniciador de Baja o Nula Presión de Gas (NO-PRESSURE) que no se detecta debido a una falla en el instrumento de presión 561 PI 9001-1. Las consecuencias serían el apagado súbito de las turbinas por falta de gas, lo cual conduce al estado final PLANT-SHUTDOWN, que hace referencia al apagado abrupto de la planta. Es importante señalar que se cuenta con diversas salvaguardias que pueden detectar y proteger al sistema contra bajas presiones en los nodos subsecuentes; sin embargo por ahora sólo se analiza el primer nodo (Línea de Suministro de Gas) para realizar un análisis preliminar y aprender a aplicar las metodologías.

Si se agrega como salvaguardia un instrumento de presión adicional capaz de detectar la baja o nula presión, entonces la frecuencia de falla de la secuencia disminuye de 2.565×10^{-5} a 1.31×10^{-8} , una disminución de 99.95%. Considerando que un medidor de presión industrial para las características de la planta puede rondar los \$200USD (WIKA, 2013), éste representaría una inversión baja comparada con los costos típicos de una planta de CC con características similares a la que se analizó (Ver Tabla 3.4.e. - Costos Estimados para Plantas de CC).

Figura 3.4.f1. Árbol de Eventos Original – Cut Set 2

No/low supply gas pressure (previous installation)	Flow meter section detects lack of pressure			END-STATE-NAMES	Frequency
NO_PRESSUR	NO-P-DETEC		#		
			1	@CONTROLLED-PLANT-SHUTDO	2.926E-009
			2	PLANT-SHUTDOWN	

Figura 3.4.f2. Árbol de Eventos con la Salvaguardia Propuesta – Cut Set 2

No/low supply gas pressure (previous installation)	Flow meter section detects lack of pressure	Additional Pressure Instrument		END-STATE-NAMES	Frequency
NO_PRESSUR	NO-P-DETEC	P-INSTR-AD	#		
			1	@CONTROLLED-PLANT-SHUTDO	1.496E-012
			2	SUCCESS	
			3	PLANT-SHUTDOWN	

Figura 3.4.f3. Árbol de Fallas de la Salvaguardia Propuesta – Cut Set 2

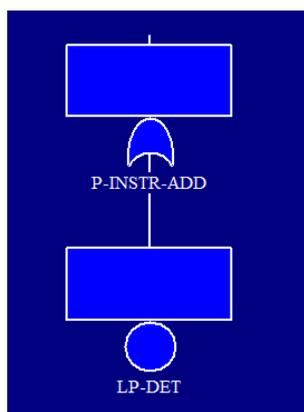


Tabla 3.4.f4. Lógica y Probabilidad de Falla para la Salvaguardia Propuesta – Cut Set 2

P-INSTR OR (Pressure Instrument Detects Low Pressure)	
. P-INSTR-DETECTS-LP	(5.111E-004)

c. Cut Set 3 – Falla en Válvula de Venteo al Recibir Señal de Cierre

Al producirse el evento iniciador “Válvula de Venteo Falla – Abierta” (VENT_V-O) puede llegarse a una secuencia cuyo estado final es Fuga de Gas a Través de Válvula (GAS LEAK THROUGH VALVE) si se da una falla en la válvula de venteo. Esta válvula puede fallar de dos formas: por operación errónea o por nulo cambio de posición al recibir la señal de cierre. Como ambos modos de falla conducen a la misma secuencia, se propondrá una sola mejora para ambas.

Si se agrega como salvaguardia el cierre manual en sitio de la válvula de venteo, entonces la frecuencia de falla anual de la secuencia disminuye de 1.72×10^{-3} a 4.72×10^{-8} , una disminución de más de 99.9%.

Antes de implementar la salvaguardia mencionada, sería muy importante evaluar también los riesgos asociados al manejo manual de la válvula cuando se está venteando gas.

Figura 3.4.g1. Árbol de Eventos Original – Cut Set 3

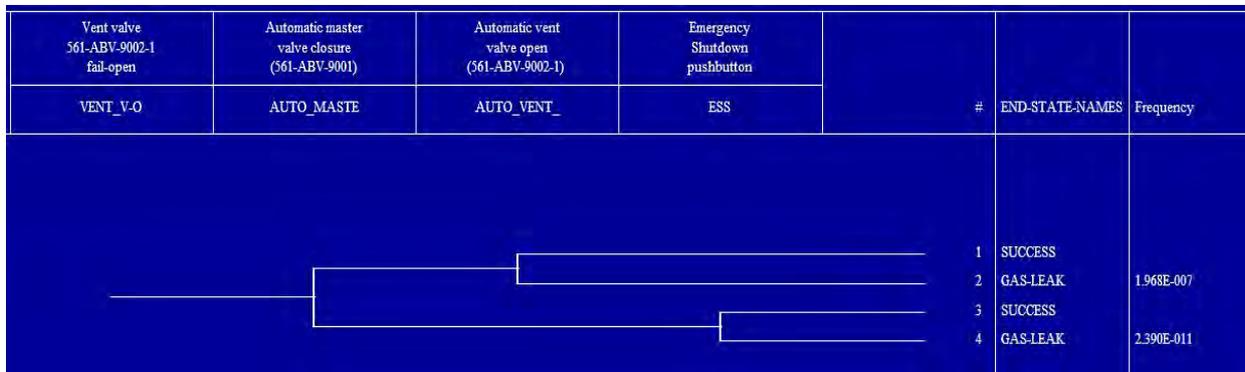


Figura 3.4.g2. Árbol de Eventos con Salvaguardia Propuesta – Cut Set 3

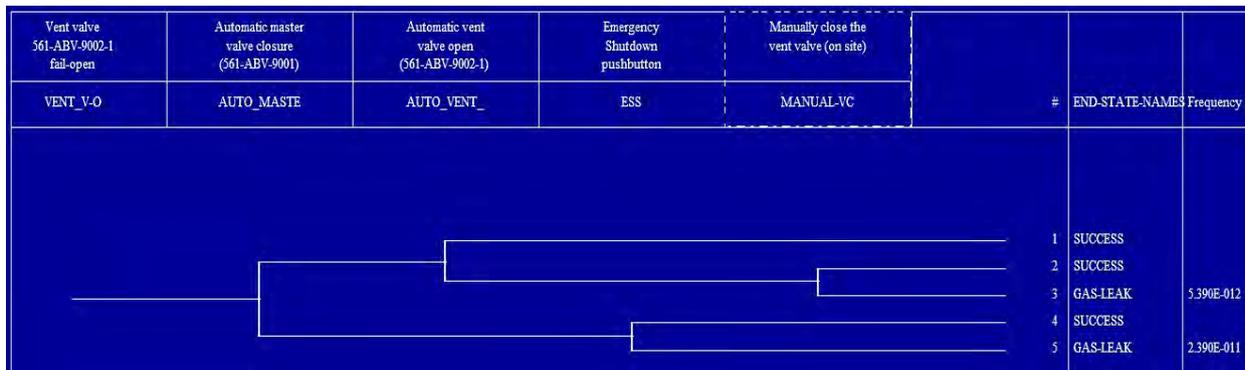


Figura 3.4.g3. Árbol de Fallas de Salvaguardia Propuesta – Cut Set 3

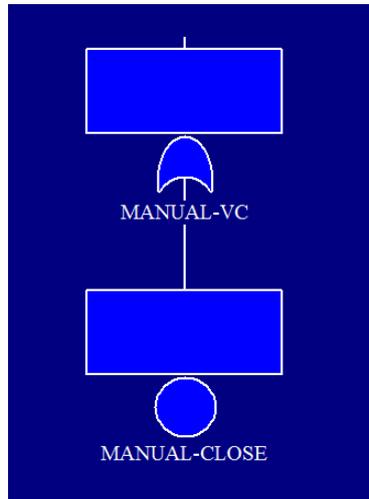


Tabla 3.4.g4. Lógica y Probabilidad de Falla para Salvaguardia Propuesta – Cut Set 3

MANUAL-VC OR (Manual Closure of Vent Valve)	
MANUAL-CLOSE	(2.738E-005)

3.5 Implicaciones y Recomendación

La aplicación de análisis de riesgo como el HAZOP y los árboles de eventos y fallas puede tener implicaciones positivas en lo económico, ambiental, seguridad y salud.

El uso del árbol de fallas combinado con el árbol de eventos es muy útil para darse cuenta cuál es la contribución al riesgo de los componentes del sistema, de esta manera pueden priorizarse acciones y administrar los recursos de una mejor manera. También puede estimarse el costo-beneficio de incluir o modificar componentes que actúen como salvaguardias y se reduzca el riesgo.

a. Impacto Económico

De acuerdo con Kumar & al. (2012), el arranque en frío para una central de CC tiene una duración de entre 5 y 40 horas y un costo con una mediana de \$79 USD por MW de capacidad instalada, lo que representa \$51,903 USD para una planta de 657 MW. Este es un costo importante, que representa 3.29% de los costos variables mensuales de la planta (Ver Tabla 3.4.e. - Costos Estimados para Plantas de CC). De evitarse paros constantes de la planta con la implementación o mejora de salvaguardias, puede obtenerse un ahorro substancial en los costos de operación.

Por ejemplo, con la adquisición de un medidor de presión industrial y una válvula de reducción e presión, como se propone en este trabajo, se invertirían un total de \$15,200 USD. Esta cantidad representa poco menos del 30% de los \$51,903 USD que costaría un arranque en frío tras un apagado inesperado, por lo que el costo-beneficio se puede apreciar.

También se evitaría incurrir en los costos de incumplimiento de contratos en el caso de un paro imprevisto de la planta. Lo anterior sin mencionar los gastos en los que incurriría la compañía si se presenta una consecuencia catastrófica como una explosión o la pérdida de vidas (indemnizaciones, costos de las reparaciones, demandas, remediación ambiental).

Otra aplicación de estos análisis es la de administrar adecuadamente los programas de mantenimiento y los inventarios de componentes de repuesto, lo que puede ahorrar tiempo y dinero a la compañía. Si se conocen las frecuencias de falla y la contribución al riesgo de los componentes dentro del sistema, se puede evitar tener un exceso de repuestos en la planta que requieren espacio de almacenamiento y limpieza periódica. Otro riesgo de un exceso de piezas de repuesto es que estas podrían ser robadas o deteriorarse si permanecen almacenadas demasiado tiempo.

Se debe recordar que al analizar el costo-beneficio de las recomendaciones surgidas de los análisis, se debe tomar también en cuenta el costo de realizar los análisis (costos, contratación de analistas, tiempo).

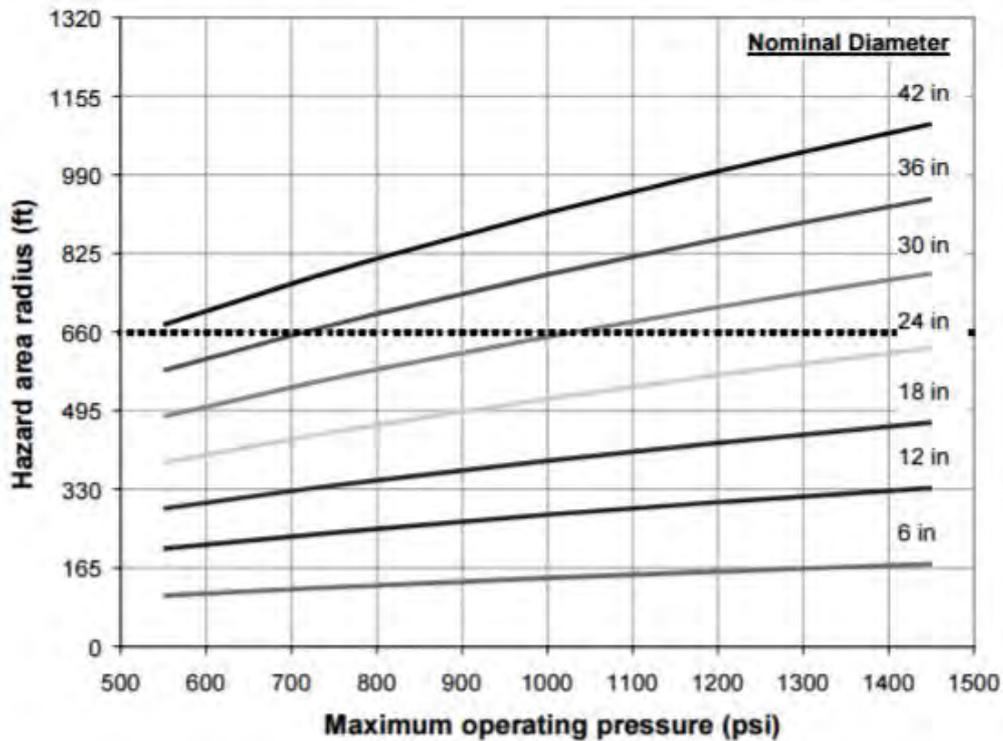
b. Impacto en Seguridad

Muchas veces se debe evaluar el costo-beneficio, ya que no siempre resulta rentable o posible para los negocios aplicar las mejores medidas en seguridad. Sin embargo, la pérdida de vidas o la generación de lesiones para trabajadores o población en general es algo cuyo valor sería difícil cuantificar. Por lo tanto, cualquier mejora substancial para reducir la probabilidad de que esto suceda tiene un impacto positivo en cuanto a seguridad.

Por ejemplo, en la planta analizada típicamente hay 3 personas en la planta durante el turno nocturno, momento en el que la capacidad de respuesta ante un suceso no deseado puede verse disminuida. Durante este turno uno de los operadores ingresa a las instalaciones para realizar rondas. En caso de que se produjera una explosión en el momento en el que el operador se encuentra dentro de la planta, podría tener graves lesiones o incluso perder la vida. Por ello es sumamente importante la realización de análisis de riesgos para reducir la probabilidad de que esto suceda.

De acuerdo con Stephens (2000), en el caso de una explosión en la línea de suministro de la planta (12 in, 925 psig), el área afectada sería de aproximadamente 250 ft de radio. Lo anterior podría afectar no sólo a los operadores, sino también a equipos críticos para el funcionamiento de la planta. Es importante mencionar que el área afectada mencionada es tan sólo una aproximación para estimar el alcance de una explosión. Para hacer una estimación adecuada se requiere realizar un análisis de consecuencias, por ejemplo mediante software como PHAST; sin embargo este queda fuera del alcance de la tesis.

Figura 3.5.a. Radio del área afectada como función del diámetro y la presión



Fuente: Stephens

c. Impacto Ambiental y Regulación

En cuanto a las implicaciones ambientales, el realizar análisis de riesgos puede contribuir a tener mejores salvaguardias para proteger el ambiente, por ejemplo reduciendo la frecuencia de emisiones fuera de límites permisibles (NO_x , SO_x , partículas suspendidas, NH_3 , CO , CO_2), fugas de combustible y aceites lubricantes, uso de combustibles alternos durante el arranque (diésel, gasoil) y explosiones.

En el ámbito regulatorio, incumplir con las disposiciones de seguridad por parte de la STPS puede tener consecuencias bastante negativas para el negocio, como se muestra en la Figura 3.5.b. Asimismo, la cuestión de seguridad puede llegar a tener un gran impacto sobre la opinión pública acerca de la empresa o negocio.

Figura 3.5.b. Fragmento del Reglamento Federal de Seguridad y Salud en el Trabajo

TÍTULO NOVENO

Sanciones Administrativas

Artículo 114. Las violaciones a los preceptos de este Reglamento y de las Normas serán sancionadas administrativamente por la Secretaría, sin perjuicio de las sanciones que proceda aplicar en términos de la Ley u otras disposiciones legales o reglamentarias.

Artículo 115. Se impondrá multa de 50 a 100 veces el salario mínimo general diario vigente en el Distrito Federal, al patrón que no acredite, ni exhiba dentro del plazo que al efecto fije la Secretaría, de conformidad con las especificaciones dispuestas en las Normas, las documentales siguientes:

- I. El Diagnóstico de Seguridad y Salud en el Trabajo, que comprenda los estudios y análisis de Riesgos requeridos por los artículos 7, fracción I; 19, fracción I; 20, fracción I; 22, fracción I; 24, fracción I; 25, fracción I; 26, fracciones I y II; 30, fracción I; 31, fracciones I y II; 36, fracción I; 39, fracción I; 40, fracción I; 41, fracción I; 42, fracción I; 43, fracciones I y II; 48, fracción I; 51, fracciones I y II; 53, fracción I; 54, fracción I, y 55, fracción III del presente Reglamento;
- II. El Programa de Seguridad y Salud en el Trabajo, a que aluden los artículos 7, fracción II, y 48, fracción II de este Reglamento, o
- III. Los programas específicos, manuales y procedimientos que establecen los artículos 7, fracción III; 18, fracción VI; 19, fracciones III a V, VII y XI; 20, fracciones II y III; 21, fracciones I, II y IX; 22, fracciones II, III y XVI; 23, fracción I; 24, fracciones II a IV; 25, fracciones II a V; 26, fracciones III a V; 30, fracciones II y III; 31, fracciones III a VI; 33, fracción I; 34, fracción I; 35, fracción I; 36, fracción II; 45, fracción V; 51, fracción VI; 54, fracciones II y IV a VI, y 55, fracción I del presente Reglamento.

Fuente: STPS

Cabe mencionar que el incumplimiento de la normativa ambiental puede ocasionar sanciones importantes, como se muestra a continuación.

“Las violaciones a los preceptos de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), sus reglamentos y las disposiciones que de ella emanen serán sancionadas con una o más de las siguientes sanciones:

-Multa

-Clausura temporal o definitiva, total o parcial, cuando

a) No haya cumplimiento de las medidas correctivas o de urgente aplicación ordenadas

b) En casos de reincidencia cuando las infracciones generen efectos negativos al ambiente

c) Se trate de desobediencia reiterada, en tres o más ocasiones

-Arresto administrativo hasta por 36 horas

-El decomiso de los instrumentos, ejemplares, productos o subproductos directamente relacionados

-La suspensión o revocación de las concesiones, licencias, permisos o autorizaciones.

Multas: El equivalente de 20,000 a 50,000 días de salario mínimo en el Distrito Federal al momento de imponer la sanción.

Podrán imponerse multas por cada día que transcurra sin obedecer el mandato, sin que excedan los 20 mil días de salario mínimo, hasta por dos veces el monto originalmente impuesto.

En el caso de reincidencia, el monto de la multa podrá exceder el doble del máximo permitido, así como consistir en una clausura definitiva”
(PROFEPA)

d. Recomendación

Es importante recordar, como se menciona en el Capítulo II, que los ciclos combinados son la tecnología preponderante en la matriz energética nacional (Figura 2.1.g.) y que hoy en día hay numerosos proyectos para adaptar viejas centrales eléctricas para funcionar con gas natural mediante ciclos combinados, con lo cual resulta fundamental realizar análisis de riesgos para evitar las situaciones indeseadas que se mencionaron anteriormente.

Actualmente en México basta con realizar un análisis cualitativo como el HAZOP para cumplir con el análisis de riesgos ante SEMARNAT y la STPS; sin embargo se dejarían de lado los beneficios y detalles derivados de un análisis de tipo cuantitativo, como las mencionadas anteriormente. Me parece crucial y recomiendo que en las centrales de CC de México se apliquen, además de los análisis HAZOP, métodos de análisis cuantitativo como árboles de eventos y árboles de fallas para mejorar la seguridad de los trabajadores, proteger al ambiente, evitar el desgaste innecesario de equipos y evitar pérdidas económicas.

Capítulo IV. CONCLUSIONES

La competitividad y la experiencia no son suficientes para alcanzar los estándares de confiabilidad requeridos hoy en día; para ello se requieren estudios sistemáticos como los análisis de riesgo de tipo HAZOP, Árboles de Eventos y Árboles de Fallas. El empleo de este tipo de estudios en centrales de CC puede tener un impacto positivo en

A pesar del tiempo y esfuerzo involucrados en los análisis mencionados, éstos resultan muy útiles económicamente y en cuestión de seguridad si con ellos se logra evitar una consecuencia mayor, como puede ser el paro de la planta o un accidente. Subsecuentemente, cualquier otro beneficio derivado del estudio será benéfico para el negocio, por ejemplo en aspectos como lo ambiental, cuestiones regulatorias o de imagen pública.

. Tan sólo en los 3 conjuntos de corte analizados se logró disminuir la frecuencia de cada secuencia de accidente en más de 99% añadiendo una salvaguardia en cada caso. También se mostró el costo-beneficio que tendría otra de las acciones propuestas gracias a los análisis realizados: la inversión de \$15,200 USD en instrumentos de proceso para evitar una pérdida de casi \$52,000 USD por un paro inesperado de la planta. También se logró identificar como área de oportunidad en el 2do nodo del sistema la falta de un protocolo de ajuste del proceso en caso de que los filtros de gas fallen cuando se presenta el evento iniciador Baja Calidad de Gas.

Actualmente para cumplir con la normatividad mexicana basta con realizar un estudio cualitativo como el HAZOP; sin embargo, una vez contando con este análisis, se facilita el desarrollo de los análisis cuantitativos gracias a la identificación de causas y consecuencias. Los resultados de los análisis cuantitativos pueden ser positivos y de gran impacto, como se muestra en el presente trabajo, y su aplicación en las centrales de Ciclo Combinado en México podría beneficiar al país en gran medida, ya que esta es la tecnología más usada para la generación de electricidad en México. Por lo anterior resulta recomendable para la industria mexicana realizar los análisis de Árbol de Fallas y Árbol de Eventos en las centrales de Ciclo Combinado.

Trabajo Futuro

Para reducir la frecuencia de eventos no deseados en el nodo, se puede actuar sobre las salvaguardias para que fallen menos (mediante el Árbol de Fallas), o trabajando sobre las secuencias incluyendo salvaguardias adicionales o modificando su arreglo para disminuir la frecuencia total de la secuencia de accidente (mediante el Árbol de Eventos). Otra manera de reducir el riesgo en el caso estudiado, y que puede ser la base para un trabajo posterior, sería reduciendo la severidad de los eventos en vez de su frecuencia, por ejemplo mediante algún tipo de protección.

Es importante tener en cuenta la incertidumbre generada al emplear el valor promedio para las tasas de falla, pues los datos son en realidad una distribución de tasas de falla, donde existe varianza. Para un trabajo posterior podría realizarse el análisis probabilístico empleando las distribuciones de falla en vez de los promedios. También sería recomendable investigar datos de falla para los componentes en diferentes bases de datos⁵, así como implementar los datos de falla específicos de la planta analizada en los cálculos, cuando se cuente con esta información.

Por último, y para ampliar el trabajo realizado, considero oportuno llegar a desarrollar los subsistemas restantes de la central, así como considerar las fallas que se originan por errores humanos.

⁵ NUREG/CR-6928 Industry-Average Performance for Components and Initiating Events at U.S. Commercial Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-478 Component Reliability Data for use in Probabilistic Safety Assessment, OREDA, T-book version 6 Reliability Data of Components in Nordic Nuclear Power Plants 6th edition TUD Office 2005, por mencionar algunas.

Insights

A continuación se mencionan brevemente algunos *insights* (o ideas) adquiridos durante el trabajo realizado.

La experiencia de un equipo multidisciplinario es necesaria en los análisis HAZOP para desarrollarlos con el detalle suficiente y para lograr determinar cuándo pueden ignorarse ciertas causas por ser poco probables, lo que ahorrará tiempo valioso. Asimismo, la experiencia será de gran ayuda para emitir recomendaciones útiles y factibles para mitigar los riesgos y para establecer las secuencias y determinar los límites (inicio y fin) de los árboles de eventos de manera adecuada.

Es conveniente contar con herramientas de análisis de riesgos como *Saphire 7* que permitan acoplar árboles de fallas a cada componente o encabezado de los árboles de eventos. Esto ahorrará tiempo valioso al “dibujar” los árboles y al calcular las frecuencias de falla. Con este tipo de software también es relativamente sencillo elaborar los árboles de fallas una vez obtenidos los datos de falla de componentes, pues se calculan automáticamente tanto las frecuencias de falla para cada secuencia como los conjuntos mínimos de corte.

Como comentario adicional, fue muy interesante realizar este trabajo, pues el revisar las estadísticas y los datos más actualizados disponibles sobre energía en México me ha permitido aprender bastante acerca de la infraestructura energética del país y darme cuenta del potencial que México tiene para desarrollarse en este aspecto. Es interesante conocer los proyectos tan grandes que se tienen contemplados (o que ya se están llevando a cabo) para el corto y mediano plazo en materia energética, y en especial para el gas natural. Creo que esto representa enormes oportunidades para estudiantes, profesionistas e inversionistas que estén interesados en el tema, no sólo de análisis de riesgos, sino también en otras áreas relacionadas, ya que se requiere de recursos humanos altamente capacitados y en algunos casos de capital privado para llevar a cabo estos proyectos.

APÉNDICE A – TABLAS MARCO TEÓRICO

Tabla 2.1.a. Resumen de principales sustancias empleadas en centrales de CC, riesgos e impacto ambiental.

Proceso	Sustancia	Composición Química	Uso/Origen	Impacto Ambiental y Principales Riesgos
Combustibles	Gas Natural	CH ₄	Combustible principal	Gas inflamable, riesgos de fuga, gas de efecto invernadero.
	Diesel (gasoil)	Parafinas	Combustible alterno	Líquido inflamable, altamente volátil, tóxico, irritante. Riesgo de contaminación para agua y suelos.
	Propano	C ₃ H ₈	Combustible de arranque	Líquido inflamable, riesgo de asfixia. Riesgo de contaminación para agua y suelos.
	Butano	C ₄ H ₁₀	Combustible de arranque	
Emisiones	Dióxido de carbono	CO ₂	Combustión de hidrocarburos	Gas de efecto invernadero.
	Óxidos de azufre	SO _x	Combustión de azufre	Causante de lluvia ácida y smog. Irritante para los seres vivos.
	Óxidos de nitrógeno	NO _x	Combustión de nitrógeno	Causante de lluvia ácida y ozono troposférico.
	Partículas Suspendidas	NH ₃	Producidas por el sistema de SCR	Irritación a las mucosas; daño pulmonar o alveolar, dependiendo del tamaño de partícula. Altamente explosivo en contacto con el aire.
	Monóxido de carbono	CO	Combustión incompleta de hidrocarburos	Gas tóxico, puede ocasionar muerte por envenenamiento.
Generador Eléctrico	Dióxido de carbono	CO ₂	Gas de purga	Los mencionados anteriormente.
	Hidrógeno	H ₂	Refrigerante	Explosivo al contacto con el aire, riesgo de asfixia al inhalarlo.
PTA	Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄	Regeneración de resinas de intercambio iónico. Neutralización de efluentes.	Afecta el pH de cuerpos acuíferos cercanos a la planta, lo cual es nocivo para el ambiente. Riesgo de salpicaduras al añadirle agua; altamente irritante y corrosivo.
	Hidróxido de sodio (sosa)	NaOH		Altamente corrosivo e irritante. Libera gran cantidad de calor al mezclarse con agua. Aumenta el pH del agua.
	Sulfato de aluminio	Al ₂ (SO ₄) ₃	Coagulante/Floculante	Irritante y corrosivo, puede formar ácido sulfúrico al contacto con agua.
	AECs	Alquil Epoxi Carboxilatos	Anti-incrustante	Compuestos orgánicos no tóxicos.
	Hidrazina	N ₂ H ₄	Control de O ₂ disuelto	Altamente tóxica e inestable. Considerada como sustancia mutagénica. Irritante y corrosiva.
	Fosfatos	Na ₃ PO ₄ ⁺ y Na ₂ HPO ₄	Control de pH	Eutrofización de aguas superficiales.
	Hipoclorito de sodio	NaClO	Potabilización de agua	Fuerte oxidante y biocida. Peligroso al reaccionar con ácidos o amoníaco. Irritante.

Cromatógrafo	Hidrógeno	H ₂	Gas portador	Los mencionados anteriormente.
	Nitrógeno	N ₂		Gas inerte, pero en grandes cantidades puede causar asfixia.
	Helio	He		
Otros Usos	Aceites	Base de hidrocarburos	Lubricación de equipos; fluidos hidráulicos; aceites de motor, transmisión, y aislamiento o transmisión de calor.	Tóxicos, irritantes, posibles cancerígenos, baja biodegradabilidad, contaminación de aguas y suelos. Algunos son inflamables.
	Agua	H ₂ O	Generación de vapor y Refrigeración de equipos	Alta temperatura de los efluentes líquidos, que puede afectar al ecosistema.

Tabla 2.1.b. Centrales de ciclo combinado en operación al cierre de 2015 en México

No.	Central	Entidad Federativa	Región de Control	Esquema ^{1/}	Capacidad Efectiva Total (MW)	Capacidad en contrato de interconexión (MW) ^{2/}	Generación Bruta (GWh)
1	Altos Hornos de México	COAH	Noreste	AUT.	220	120	1103
2	Energía Azteca VIII	GTO	Occidental	AUT.	131	131	498
3	Energía Chihuahua	CHIH	Norte	AUT.	40	16	80
4	Energía San Luis de la Paz	GTO	Occidental	AUT.	220	220	442
5	Fuerza y Energía de Naco-Nogales	SON	Noroeste	AUT.	50	50	175
6	Fuerza y Energía de Tuxpan	VER	Oriental	AUT.	30	S/C	0
7	Iberdrola Energía La Laguna	DGO	Norte	AUT.	101	40	246
8	Iberdrola Energía Monterrey	NL	Noreste	AUT.	659	449	4,638
9	Iberdrola Energía Tamazunchale	SLP	Occidental	AUT.	80	80	0
10	Ingredion México	QRO	Occidental	AUT.	29	S/C	184
11	Magnelec	COAH	Norte	AUT.	16	0	50
12	México Generadora de Energía	SON	Noroeste	AUT.	530	500	2,632
13	Chihuahua II (El Encino)	CHIH	Norte	CFE	619	619	4,489
14	Dos Bocas	VER	Oriental	CFE	452	452	1,001
15	El Sáuz	QRO	Occidental	CFE	591	591	4,391
16	Gómez Palacio	DGO	Norte	CFE	240	240	939
17	Hermosillo	SON	Noroeste	CFE	227	227	1,596
18	Huinalá	NL	Noreste	CFE	378	378	1,870
19	Huinalá II	NL	Noreste	CFE	471	471	3,332
20	Manzanillo (Gral. Manuel Álvarez Moreno)	COL	Occidental	CFE	1,454	1,454	8,407
21	Presidente Juárez	BC	Baja California	CFE	773	773	4,980
22	Río Bravo (Emilio Portes Gil)	TAMS	Noreste	CFE	211	211	1,522
23	Samalayuca II	CHIH	Norte	CFE	522	522	4,129
24	San Lorenzo potencia	PUE	Oriental	CFE	382	382	2,813
25	Tula (Francisco Pérez Ríos)	HGO	Central	CFE	489	489	3,542
26	Valladolid (Felipe Carrillo Puerto)	YUC	Peninsular	CFE	220	220	760

27	Valle de México	MEX	Central	CFE	549	549	3,664
28	Celfimex	TLAX	Oriental	COG.	7	7	31
29	Mexichem Resinas Vinílicas	TAMS	Noreste	COG.	16	16	106
30	Papelera Industrial Potosina	SLP	Occidental	COG.	7	4	35
31	Pemex- Petroquímica, Complejo Petroquímico Cangrejera	VER	Oriental	COG.	164	S/C	684
32	Pemex- Petroquímica, Complejo Petroquímico Morelos	VER	Oriental	COG.	172	28	479
33	Procter & Gamble Manufactura	TLAX	Oriental	COG.	60	60	375
34	Productora de Papel	NL	Noreste	COG.	18	11	86
35	Tractebel Energía de Monterrey	NL	Noreste	COG.	284	284	1,889
36	Aes Mérida III	YUC	Peninsular	EXP.	15	S/C	0
37	Energía Azteca X	BC	Baja California	EXP.	219	219	1,138
38	Energía de Baja California	BC	Baja California	EXP.	337	S/C	1,867
39	Termoeléctrica de Mexicali	BC	Baja California	EXP.	680	S/C	3,906
40	Fuerza y Energía de Norte Durango	DGO	Norte	P.P.	30	30	115
41	Altamira II PIE	TAMS	Noreste	PIE	495	507	3,413
42	Altamira III y IV PIE	TAMS	Noreste	PIE	1,036	1,036	7,947
43	Altamira V PIE	TAMS	Noreste	PIE	1,121	1,121	7,863
44	El Sauz (PIE)	GTO	Occidental	PIE	495	507	3,572
45	Fuerza y Energía de Hermosillo PIE	SON	Noroeste	PIE	250	256	2,065
46	La Laguna II PIE	DGO	Norte	PIE	498	510	3,949
47	Mérida III PIE	YUC	Peninsular	PIE	484	496	1,827
48	Mexicali PIE	BC	Baja California	PIE	489	501	2,837
49	Monterrey III (Dulces Nombres) PIE	NL	Noreste	PIE	449	460	3,507
50	Naco Nogales PIE	SON	Noroeste	PIE	258	264	2,114
51	Norte Durango (PIE)	DGO	Norte	PIE	450	461	3,767
52	Norte II PIE	CHIH	Norte	PIE	433	444	3,546

53	Río Bravo II (Anáhuac) PIE	TAMS	Noreste	PIE	495	507	3,378
54	Río Bravo III PIE	TAMS	Noreste	PIE	495	507	3,907
55	Río Bravo IV PIE	TAMS	Noreste	PIE	500	513	3,715
56	Saltillo PIE	COAH	Noreste	PIE	248	254	1,883
57	Tamazunchale PIE	SLP	Noreste	PIE	1,135	1,163	8,562
58	Transalta Campeche PIE	CAMP	Peninsular	PIE	252	259	620
59	Transalta Chihuahua III PIE	CHIH	Norte	PIE	259	265	2,040
60	Tuxpan II (Tres Estrellas) PIE	VER	Oriental	PIE	495	507	3,386
61	Tuxpan III y IV PIE	VER	Oriental	PIE	983	1,008	7,282
62	Tuxpan V PIE	VER	Oriental	PIE	495	507	3,563
63	Valladolid III PIE	YUC	Peninsular	PIE	525	538	2,227
TOTAL^{3/}					24,043	22,434	155,185

^{1/} AUT: Autoabastecimiento; CFE: Comisión Federal de Electricidad; COG: Cogeneración; EXP: Exportación; PIE: Productor Independiente de Energía. ^{2/} Centrales con contrato de interconexión con el CENACE (S/C: sin contrato de interconexión).

^{3/} Los totales pueden no coincidir por redondeo. Se incluye la generación reportada por las centrales Agua Prieta II y Centro que se encuentran en construcción. Información preliminar al cierre de 2015. Fuente: Elaborado por SENER con información de CFE, CRE y CENACE.

APÉNDICE B - ANÁLISIS HAZOP

Tabla 3.2.b. Análisis HAZOP Nodo 2: Filtro 561-SKD-9002

No. SECTION/NODE: Filter 561-SKD-9002

System Description/Procedures: SD-561-0001

INTENTION: Remove liquid particles and small particulates from the gas at an efficiency of $99.98\% \geq 1.0\mu\text{m}$. Operating conditions: 600-925 psig; 50-130 °F; 211532 lbm/hr

Parameter	Guide word	Deviation	Consequences	Causes	Safeguards	Recommendations
Pressure	No/Low	No/Low Pressure	Flammable cloud	Drain valve fail open (561-LCV-9002)	Indication and trend in CR pressure in 561-PIT-9003-1,2,3.	Verify consistency between drawing to SD (LCV-9702)
			Decrease of electrical generation			
	High	High Pressure	Explosion Potential	Obstruction of downstream pipe/equipment	Double block and bleed is provided to isolate any system capable of being serviced while the fuel gas system is pressurized.	Verify inspection and maintenance records
			Send droplet to CT with potential of damage	High gas pressure (previous installation)		
Level (Drain Tank 561-TNK-9702)	High	High Level	Send droplet to CT with potential of damage	Low gas quality (high water, particles, and liquids content)	Subsequent filters/scrubbers	Verify inspection and maintenance records
			Overflow		High level alarm (561-LS-9702-4)	
Containment	No	Loss of Containment	Leak	Pipe/equipment hit by something (hail, tree, car, person)	Double block and bleed is provided to isolate any system capable of being serviced while the fuel gas system is pressurized.	Verify inspection and maintenance records
				Corrosion	Security (fence, watchmen)	
				Chemical Feedwater System		Perform corrosion tests periodically.

Tabla 3.2.c. Análisis HAZOP Nodo 3: Estación de Regulación de Presión

No. SECTION/NODE: Pressure regulating station (normal operation (open)): PCV-9003-1, PCV-9004-1 and PCV-9004-2.

System Description/Procedures: SD-561-0001

INTENTION: Lower the gas pressure from 590-925 psig to 510-550 psig; at 57294 lbm/hr for branch 1, 154238 lbm/hr branches 2 & 3; 100-130 °F

Parameter	Guide word	Deviation	Consequences	Causes	Safeguards	Recommendations
Pressure	No/Low	No/Low Pressure	Plant shutdown	No/low pressure	Indication and trend in CR pressure in 561-PIT-9003-1,2,3	Verify consistency between drawing to SD (PSET)
			Flammable cloud with explosion potential	Gas leak Safety valve (561-PSV-9006-1) fail- open		
	High	High pressure	Turbine fails to continue operating	Obstruction of downstream pipe/equipment		
			Explosion potential		High gas pressure (previous installation)	
Flow	Other than	Water or particles in stream	Damage in pipeline or equipment	Failure in Filter Skid / Low gas quality	Downstream absolute separator.	Verify inspection and maintenance records
	High	High Flow		Upstream valve failure - open	A third redundant branch is provided	
Temperature	Low	Low Temperature	Ice blockage	Climate conditions (snow, hail, wind)	Temperature and pressure indicators	Monitor climate conditions
Containment	No	Loss of Containment	Leak	Pipe/equipment hit by something (hail, tree, car, person)	Double block and bleed provided to isolate any system capable of being serviced while system is pressurized. Security (fence, watchmen)	Verify inspection and maintenance records
				Corrosion	Chemical Feedwater System	

Tabla 3.2.d. Análisis HAZOP Nodo 4: Patín Consolidado para Acondicionamiento de Gas

No. SECTION/NODE: Consolidated fuel gas conditioning skid for CT 561-SKD-1001/2001 (including a fuel gas absolute filter, performance heater, fuel gas electric startup heater, a fuel gas scrubber with drain tank, and a flow meter).

System Description/Procedures: SD-561-0001

INTENTION: Remove all liquid droplets and solid contaminants from the gas (efficiency of 100% \geq 5 μ m for absolute separator and 98% @ 8 μ m for gas scrubber) and adjust the gas temperature to the CT injection requirements (365°F), 77686 lbm/h

Parameter	Guide word	Deviation	Consequences	Causes	Safeguards	Recommendations
Level (fuel gas absolute separator/ filter)	High	High level	Fail to remove droplet and pollutants with possible CT damage	High water and particle content in gas/ failure in Inlet Filter (561-SKD-9002)	Subsequent gas scrubber	Indication and trend of level in CR
			Overflow		Alarm for high level in CR (561-LS-1702/2702-1)	
					Drain tank containment	
Level (gas scrubber)	High	High level	Overflow	Water leak in performance heater tube	High level switch, LS- 71GS-2A/ LS- 71GS-2A triggers and will send a signal to close the feed water motor operated valve, 20PH-3/20PH-4.	Verify inspection and maintenance records
Temperature (performance heater)	Low	Low Gas Temp.	Reduced Efficiency/ CT Shutdown	Feed water system failure (leak, fail to pumps, etc.)	Temperature cascaded flow control system using Temperature Control Valve, VA41-9 to control IP feedwater flow. / The Electric Heater has a self-contained control system, to regulate gas temperature and electric power (only start up)	Indication and trend of temperature (water/gas) in CR
			Formation of ice	Previous filters' failure		Alarm if filter fails, monitoring of temperature
	High	High Gas Temp	Damage to seals	IP Feedwater flow or temperature too high		
Reduction of system's efficiency						
			CT Trip			

Tabla 3.2.d. (Continuación) Análisis HAZOP Nodo 4: Patín Consolidado para Acondicionamiento de Gas

Parameter	Guide word	Deviation	Consequences	Causes	Safeguards	Recommendations
Flow (Performance Heater)	Other than	Flow other than gas	Water droplet in gas flow with possible CT damage	Leak in tube	Manual Bypass	Differential pressure indicator
					Gas scrubber	
				Broken filter	Subsequent separator	
Level (Drain Tank 561-TNK-1002/2002)	High	High level	Fail to remove droplet and contaminants with possible CT damage/ Overflow	High water content in gas/ Previous filters' failure	High level alarm (561-LS-1702-1/2702-1) is activated	Verify containment area.
					CT Trip on HH level.	
Pressure	No/Low	No/Low Pressure	Plant shutdown	No/low pressure supply gas (upstream)	Detect lack of pressure to perform a controlled shutdown	Verify pressure instruments and gas detectors
			Flammable cloud with explosion potential	Gas Leak	Indication and trend in CR. Shut-off valve for CTG header connection	
	High	High Pressure	Explosion	Failure in pressure reducing station (HP previous installation) / Obstruction of downstream pipe or equipment	Shut-off valve for CTG header connection	Verify pressure instruments and maintenance records
			Damage to components		Double block and bleed provided to isolate any system capable of being serviced while system is pressurized.	
			A pressure valve control, VA41-10, is installed to keep the feed water pressure inside the heater between 500 psig and 550 psig			
Containment	No	Loss of Containment	Gas Leak	Pipe/equipment hit by something (hail, tree, car, person)	Double block and bleed provided to isolate any system capable of being serviced while system is pressurized.	Verify pressure instruments and maintenance records
					Security (fence, watchmen)	
				Corrosion	Chemical Feedwater System	Perform corrosion tests periodically.

Tabla 3.2.e. Análisis HAZOP Nodo 5: Línea de Suministro a Sistema HRSG

No. SECTION/NODE: HRSG duct burner supply line (including a gas flow meter assembly with pressure and temperature compensation, a fuel gas duct burner pressure reducing skid, and a fuel gas burner skid)

System Description/Procedures: 561-SKD-1003 to 561-SKD-1004

INTENTION: Adjust gas pressure (35-75 psig) and temperature (63-130 °F) for the HRSG duct burners; measure gas flow (28080 lbm/h)

Parameter	Guide word	Deviation	Consequences	Causes	Safeguards	Recommendations
Pressure	No/Low	No/Low Pressure	Plant shutdown	No/low pressure	Pressure design	Verify pressure instruments and maintenance records
			Flammable cloud with explosion potential	Leak	Indication and trend in CR. Shut-off valve for HRSG header connection	
	High	High pressure	Explosion	Failure in pressure reducing station	PRV with set pressure 75 psig. Shut-off valve for HRSG duct burner header connection. Double block and bleed provided to isolate any system capable of being serviced while system is pressurized.	
			Damage to components			
Temperature	High	High Gas Temp	Damage to burner tubes and components	High gas flow or pressure (high TEG temperature or incorrect distribution)	CT Trip	Pressure or flow adjustment
Flow	High	High Gas Flow	Reduced GT efficiency	Valve failure-open	Control valves	Verify flow and pressure indicators; install safety valve if necessary
			Damage to critical HRSG components			
	Low	Low Gas Flow	Not enough steam generated	Leak	Electrical heater	
				Valve failure-open		
Other than	Flow other than gas		Condensation of water vapor in duct burner, causing corrosion or clogging	Fail in filter skid/ Low gas quality	Chemical Feedwater System	Isolate (valve) or continuously purge air when not in use
			Duct burner shut-off			

APÉNDICE C – ÁRBOLES DE EVENTOS

NODO 1 – Línea de Suministro de Gas

Figura 3.3.1. E11 Válvula de Venteo Falla - Abierta (con Frecuencia de Falla por Secuencia)

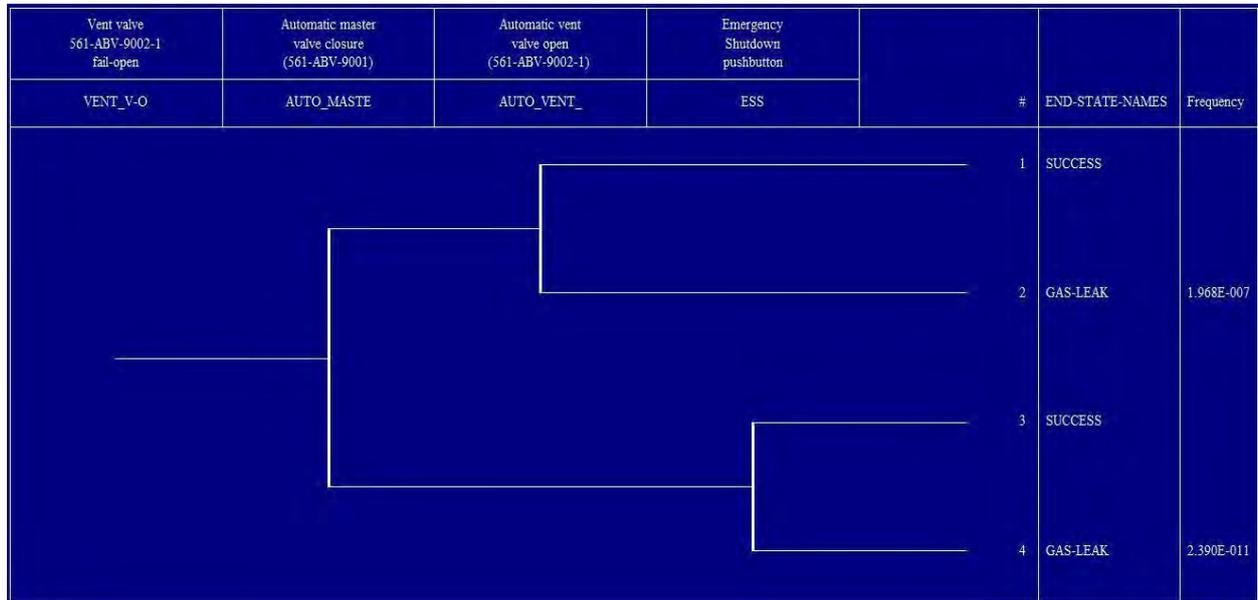


Figura 3.3.2. E12 Fuga de Gas (con Frecuencia de Falla por Secuencia)



Figura 3.3.3. E13 Alta Presión (con Frecuencia de Falla por Secuencia)

High gas pressure (previous installation)	High pressure detected by Flow Meter section	Automatic master valve (561-ABV-9001)	Automatic vent valve (561-ABV-9002-1)	Emergency Shutdown pushbutton		#	END-STATE-NAMES	Frequency
HIGH-GAS-P	HIGH_P_DET	AUTO_MASTE	AUTO_VENT_	ESS				
						1	SUCCESS	
						2	SUCCESS	
						3	EXPLOSION-POTENTIAL	3.168E-013
						4	SUCCESS	
						5	EXPLOSION-POTENTIAL	3.168E-013
						6	EXPLOSION-POTENTIAL	5.831E-010

Figura 3.3.4. E14 Válvula Maestra Falla – Cerrada (con Frecuencia de Falla por Secuencia)

Master valve 561-ABV-9001-1 fail-close	Automatically open master valve (561-ABV-9001-1)	Manual master valve (561-ABV-9001-1) open		#	END-STATE-NAMES	Frequency
MASTER-V-C	AUTO_MASTE	MANUAL_MAS				
				1	SUCCESS	
				2	SUCCESS	
				3	PLANT-SHUTDOWN	1.140E-012

Figura 3.3.5. E15 Baja/Nula Presión (con Frecuencia de Falla por Secuencia)

No/low supply gas pressure (previous installation)	Flow meter section detects lack of pressure	#	END-STATE-NAMES	Frequency
NO_PRESSUR	NO-P-DETEC			
		1	@CONTROLLED-PLANT-SHUTDO	2.926E-009
		2	PLANT-SHUTDOWN	

Figura 3.3.6. E16 Obstrucción de Líneas (con Frecuencia de Falla por Secuencia)

Obstruction of downstream pipe/equipment	Obstruction is detected by pressure instrument	Automatic master valve (561-ABV-9001)	Automatic vent valve (561-ABV-9002-1)	Emergency Shutdown pushbutton	#	END-STATE-NAMES	Frequency
OBSTRUCTIO	OBSTRUCTIO	AUTO_MASTE	AUTO_VENT_	ESS			
					1	SUCCESS	1.302E-013
					2	SUCCESS	
					3	EXPL-POT	
					4	SUCCESS	
					5	EXPL-POT	
					6	EXPL-POT	

NODO 2 - Filtro 561-SKD-9002

Figura 3.3.7. E21 Baja Calidad de Gas (alto contenido de agua, partículas y líquidos)

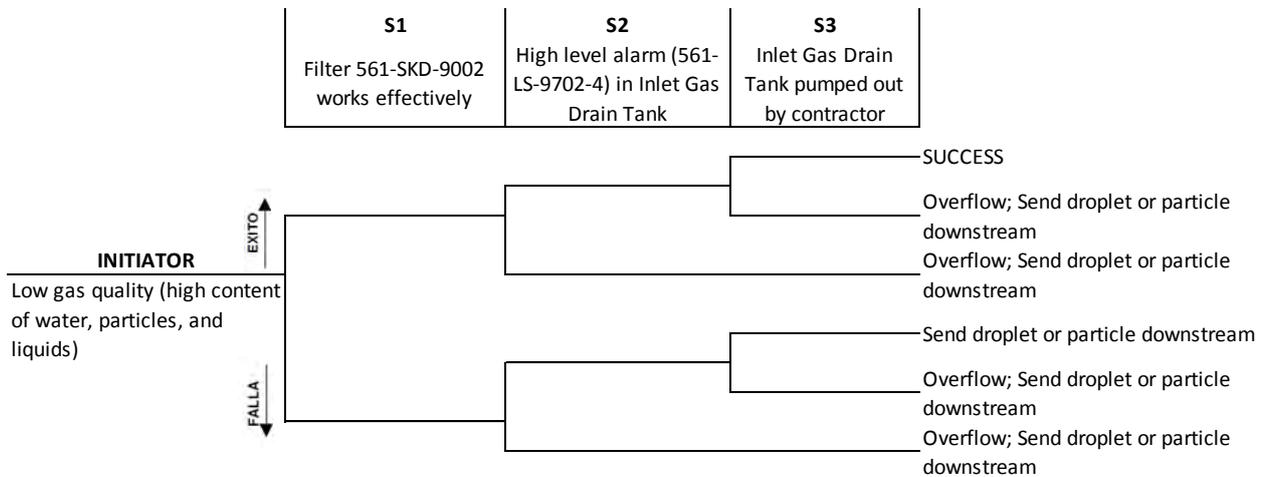


Figura 3.3.8. E22 Válvula de Drene (561-LCV-9002) Falla – Abierta

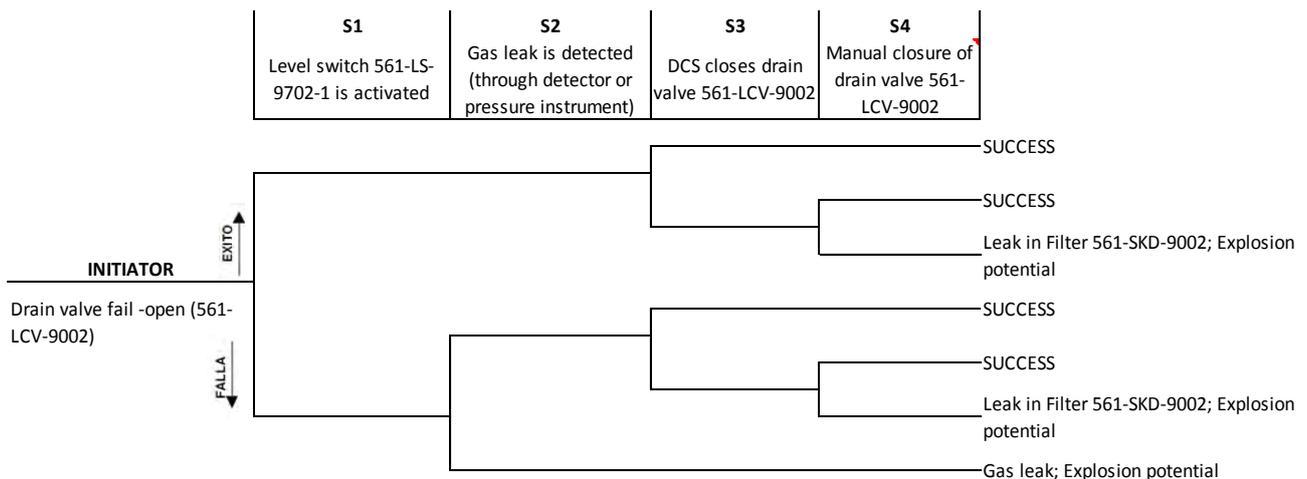


Figura 3.3.9. E23 Alta Presión (de instalación previa)

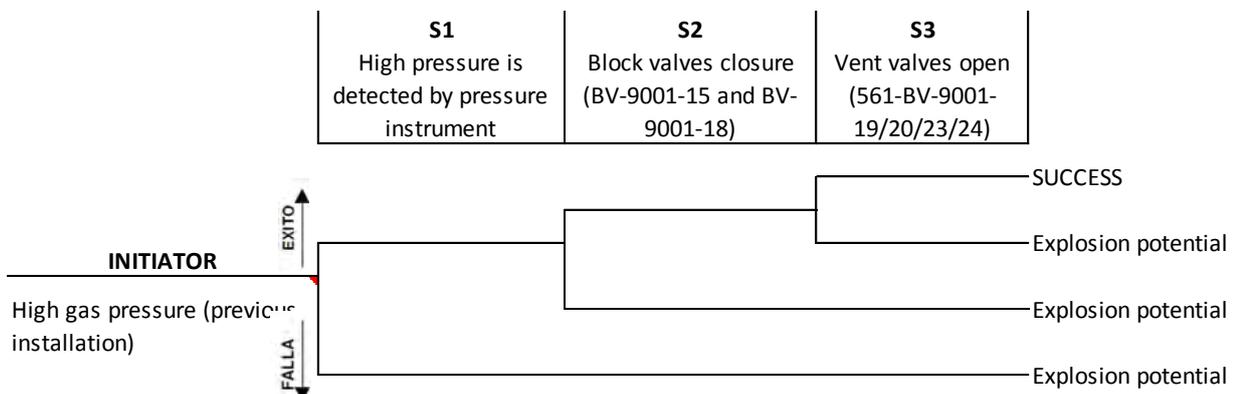


Figura 3.3.10. E24 Fuga de Gas en Filtro 561-SKD-9002

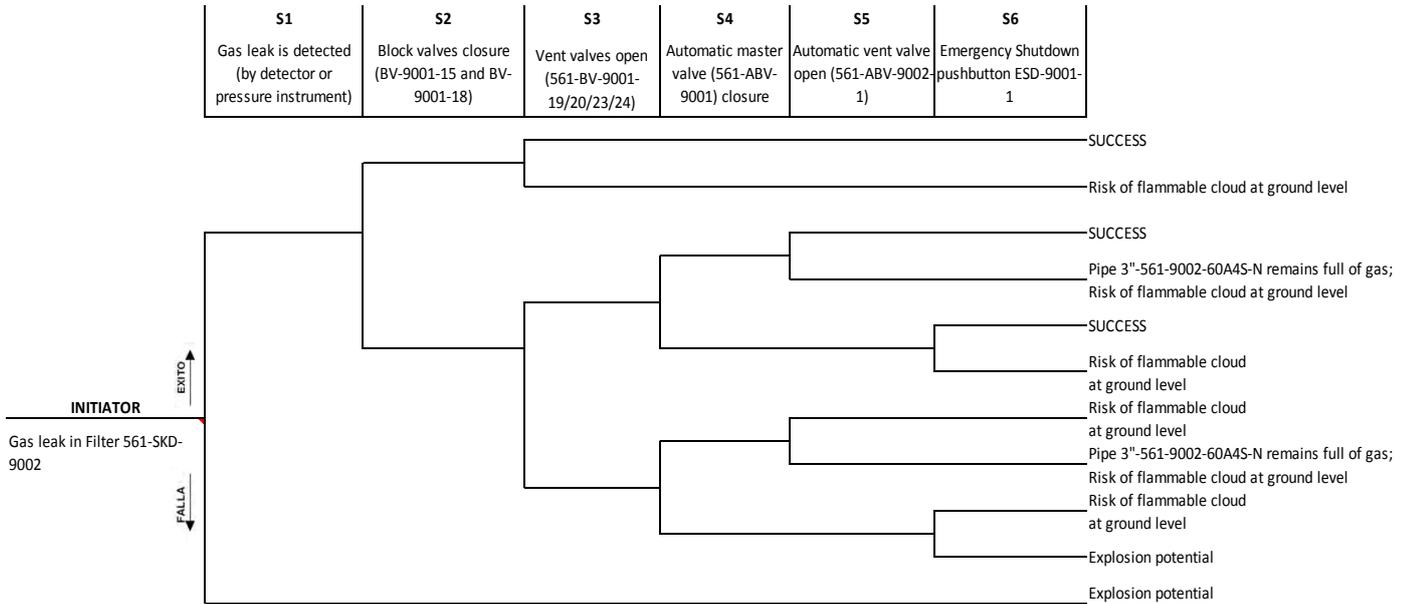
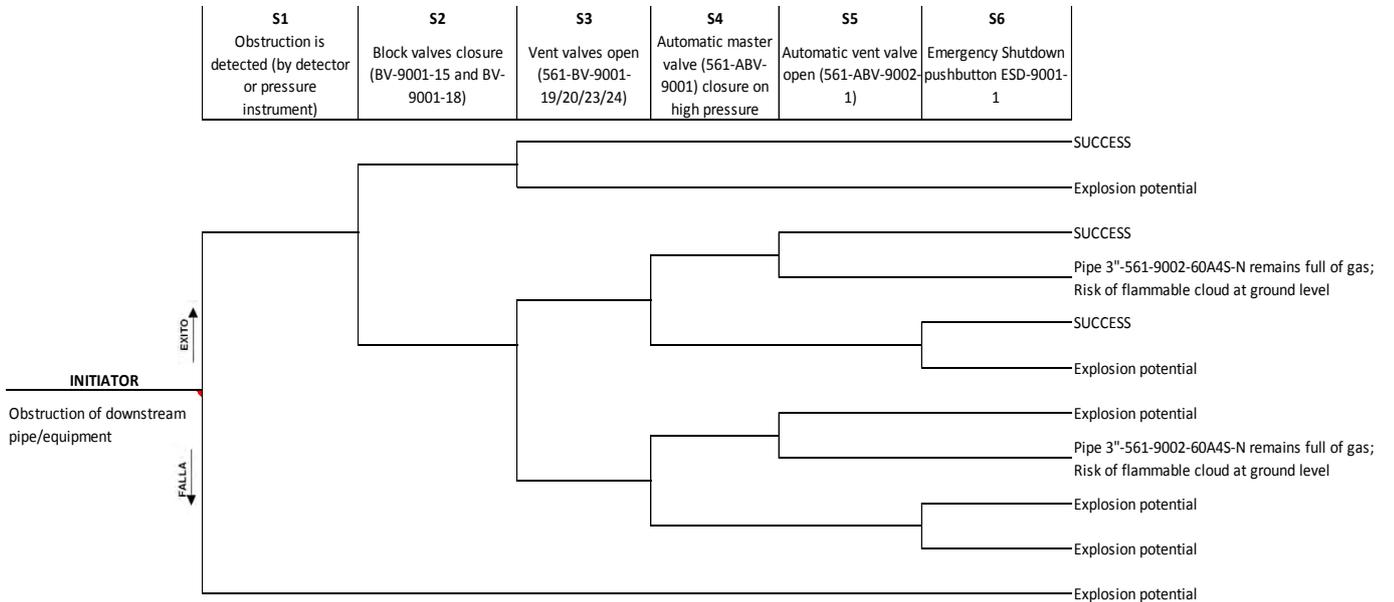


Figura 3.3.11. E25 Obstrucción de Líneas o Equipos



NODO 3 – Estación de Regulación de Presión

Figura 3.3.12. E31 Fuga de Gas en 1er Rama

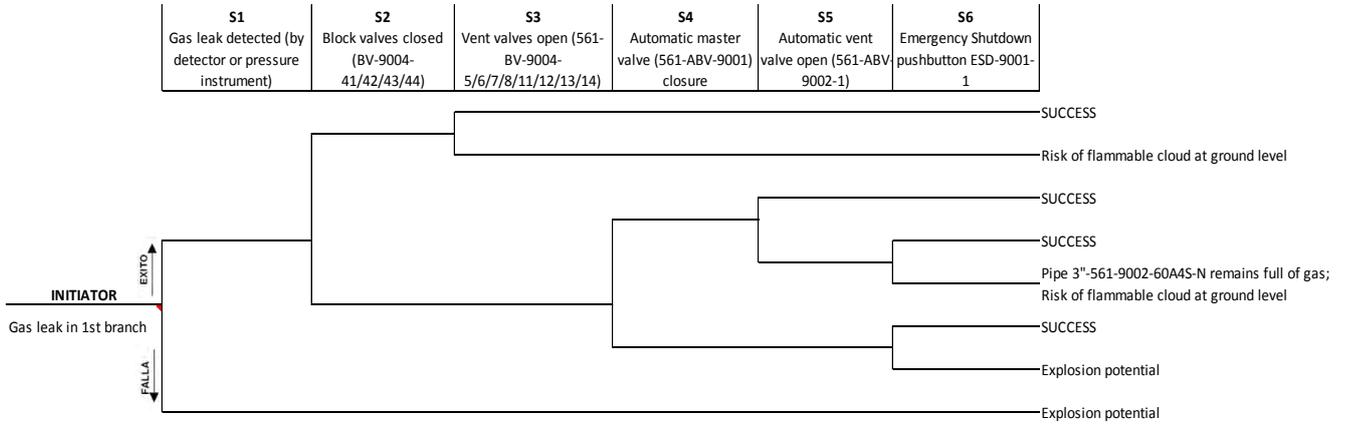


Figura 3.3.13. E32 Fuga de Gas en 2da Rama

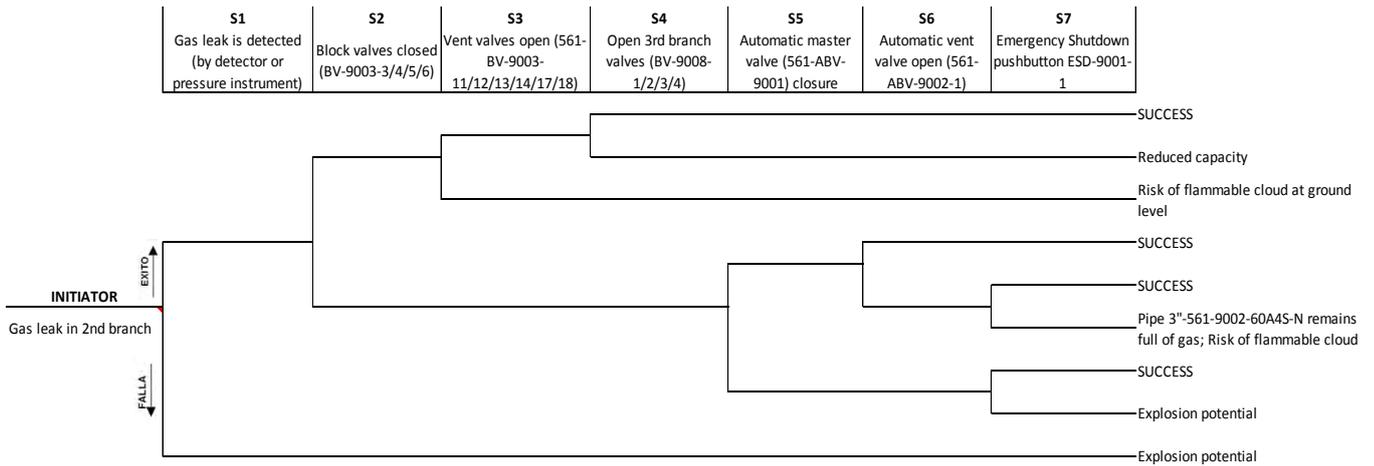


Figura 3.3.14. E33 Fuga de Gas en 3er Rama

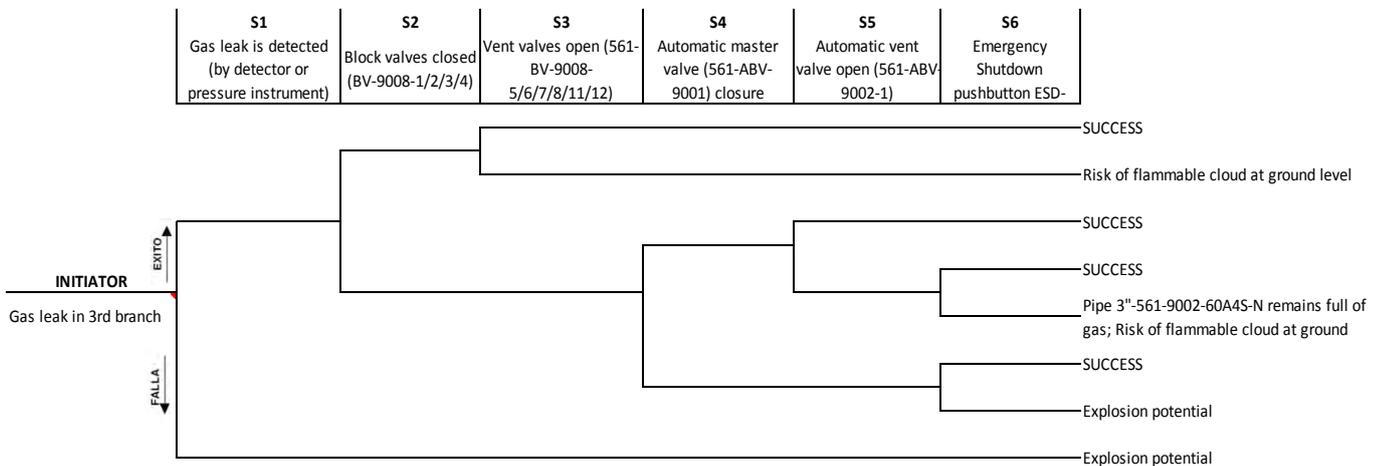


Figura 3.3.15. E34 Obstrucción de Líneas o Equipos

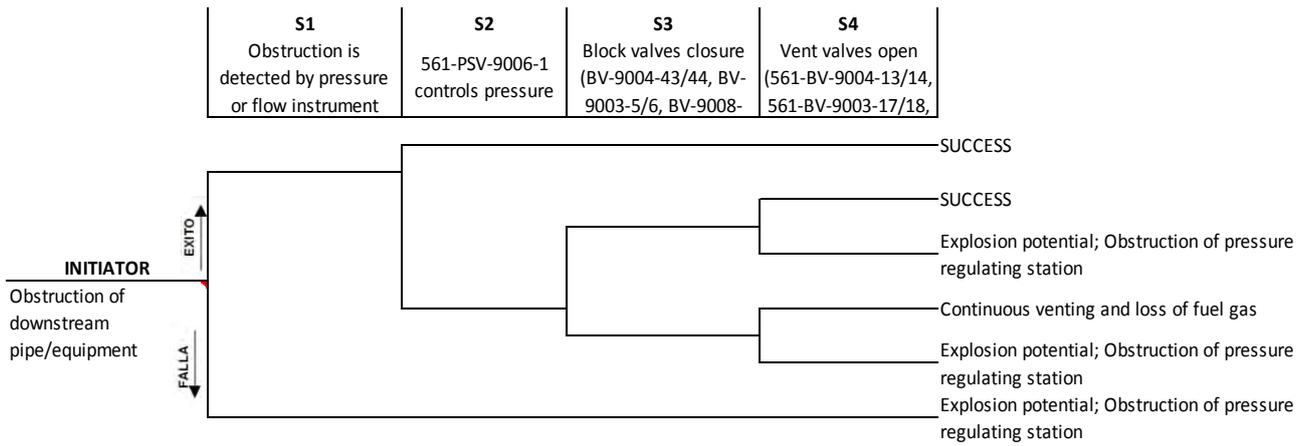


Figura 3.3.16. E35 Alta Presión (de sección previa)

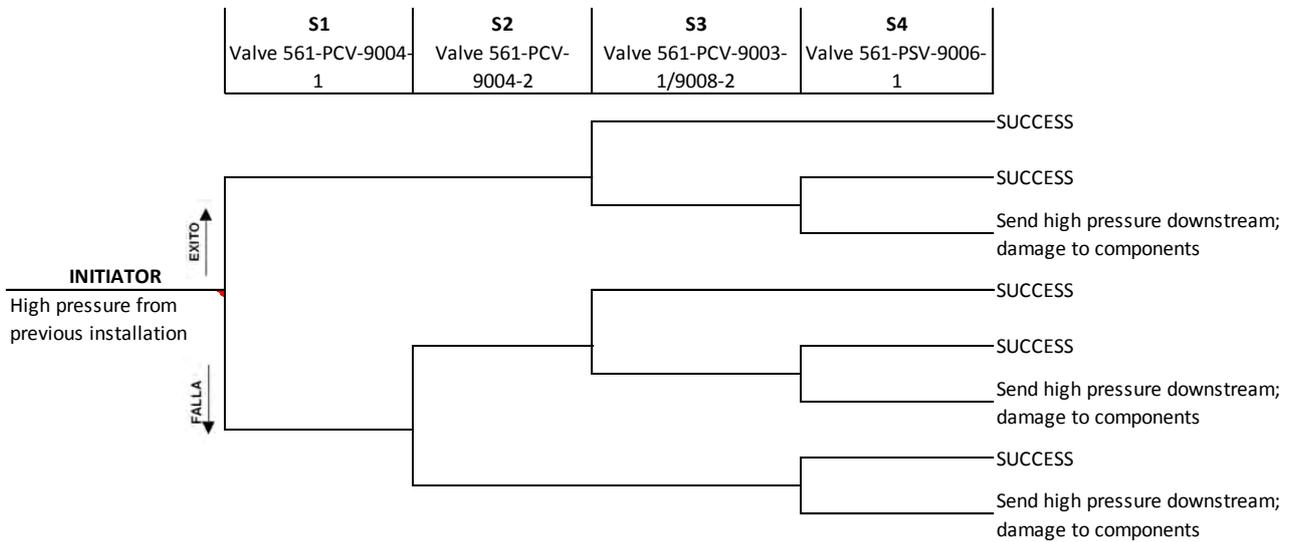
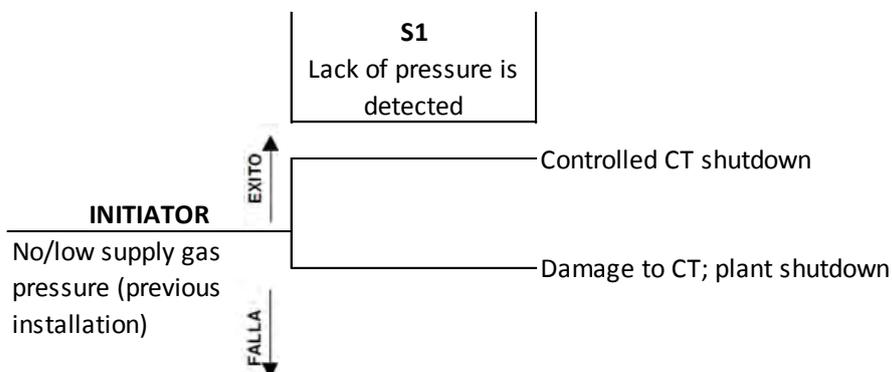


Figura 3.3.17. E36 Baja/Nula Presión (de sección previa)



NODO 4 – Patín Consolidado para Acondicionamiento de Gas

Figura 3.3.18. E41 Fuga de Agua en Tubo del Calentador de Desempeño

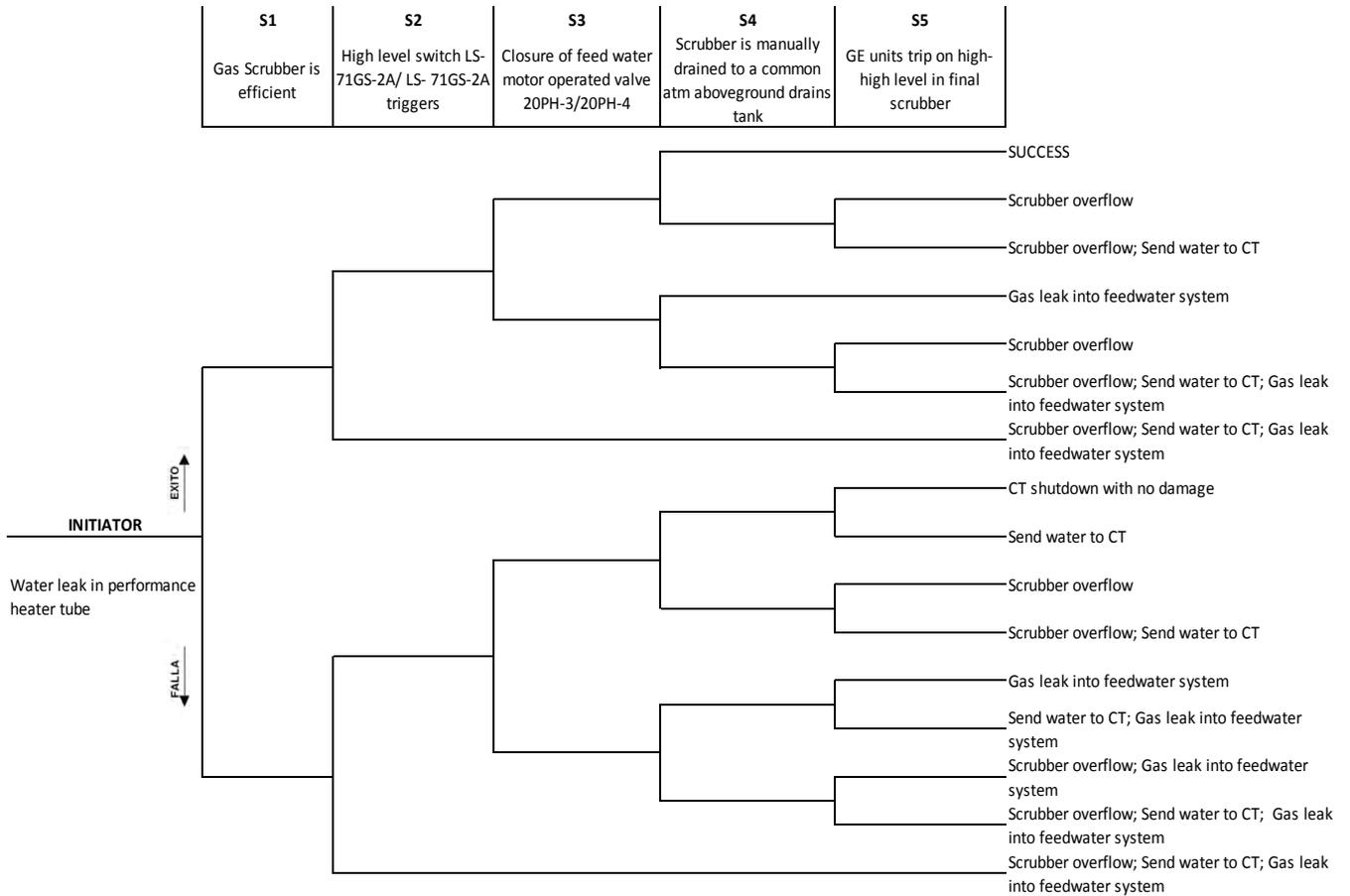


Figura 3.3.19. E42 Falla en Bomba de Alimentación de Agua de la Sección de Presión Intermedia (IP) o Baja Temperatura

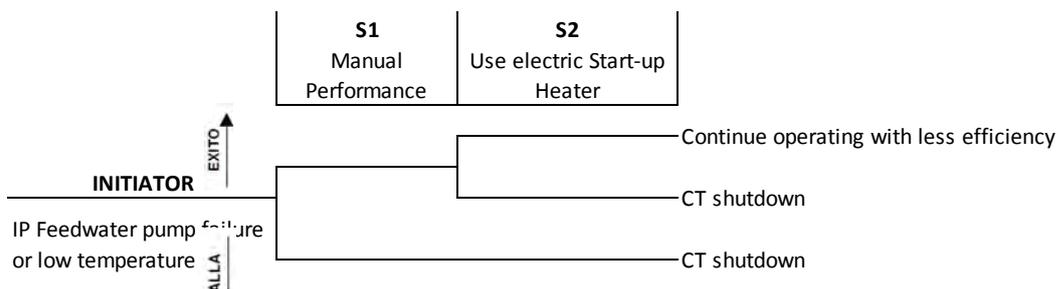


Figura 3.3.20. E43 Baja Calidad de Gas (alto contenido de agua, partículas y líquidos)

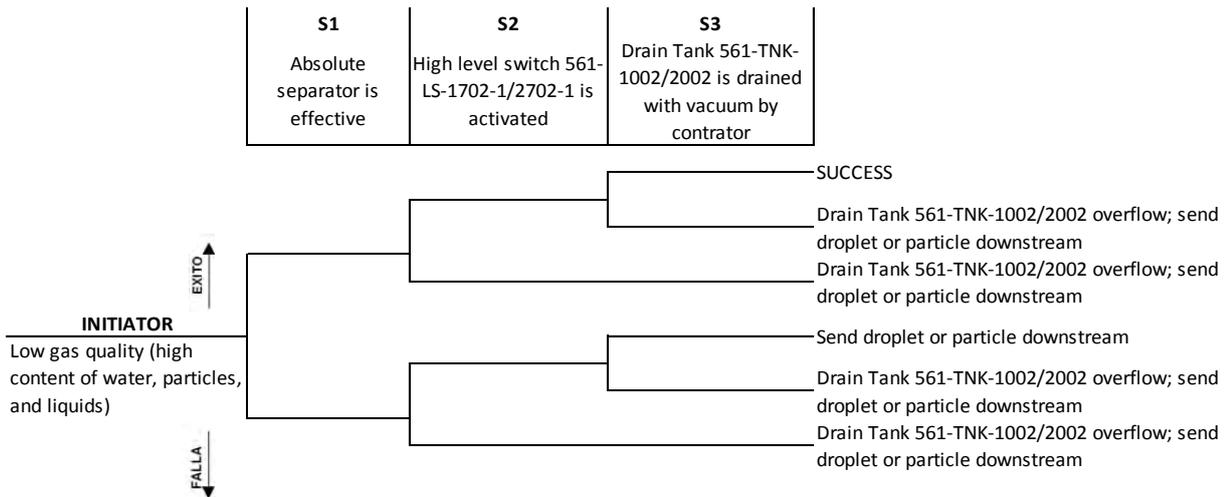


Figura 3.3.21. E44 Fuga de Gas en Patín de Acondicionamiento

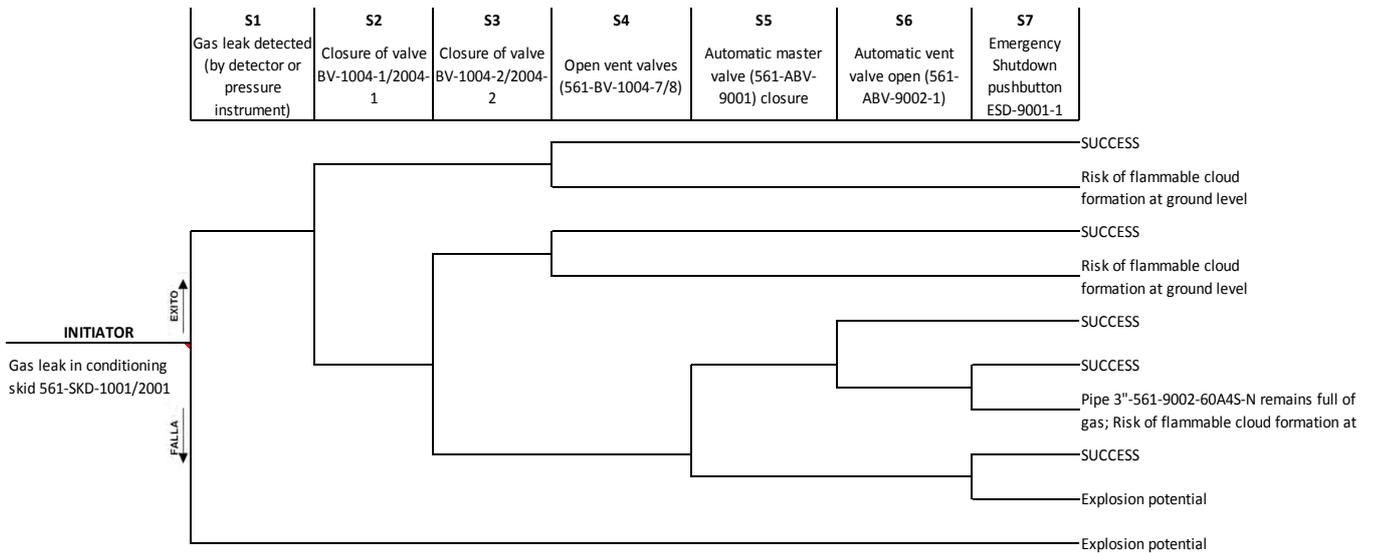


Figura 3.3.21. E44 Baja/Nula Presión de Gas

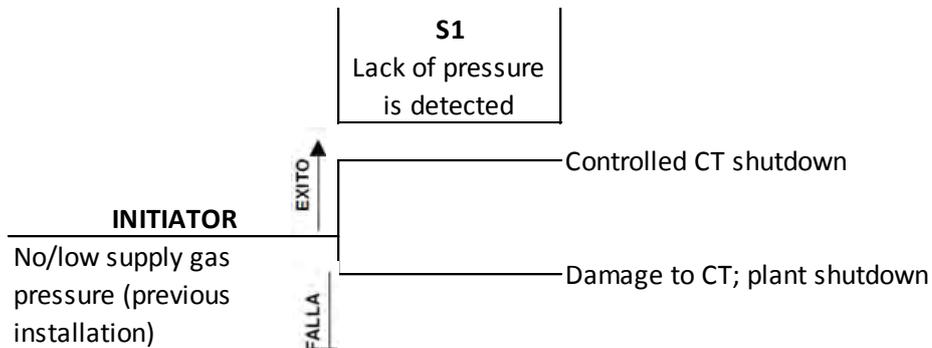


Figura 3.3.22. E45 Alta Presión de Gas

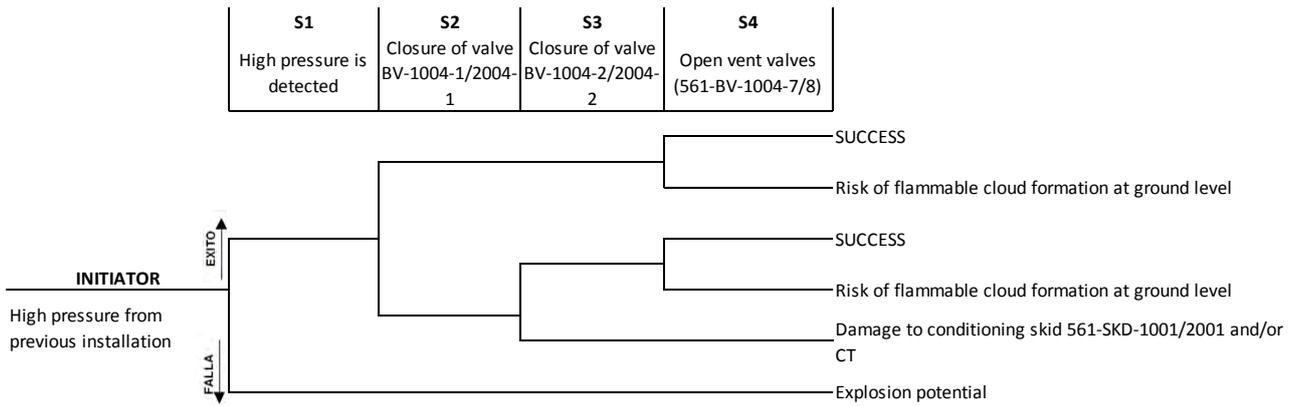


Figura 3.3.23. E46 Obstrucción de Líneas o Equipos

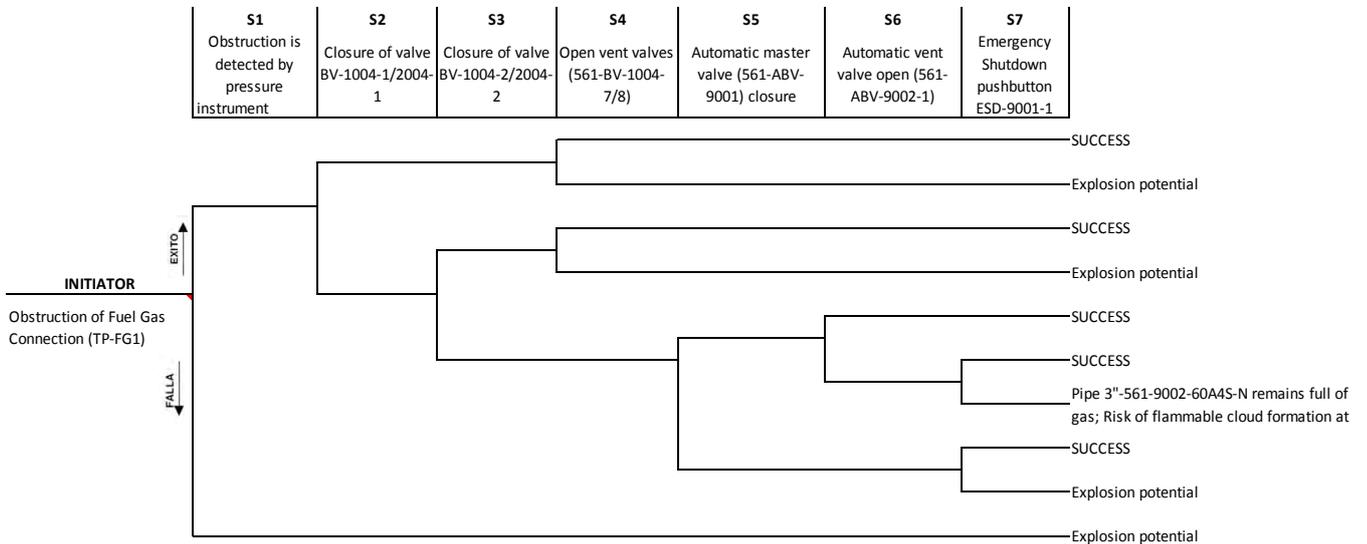
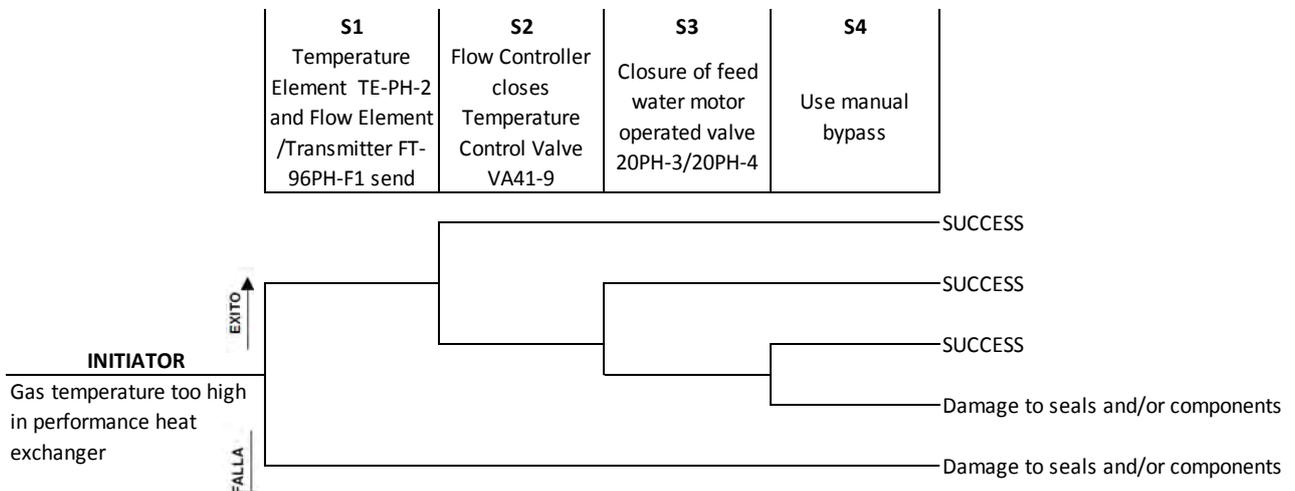


Figura 3.3.24. E47 Alta Temperatura de Gas en el Calentador de Desempeño



NODO 5 – Línea de Suministro de Gas a Sistema HRSG

Figura 3.3.25. E51 Fuga de Gas en Línea de Suministro a HRSG

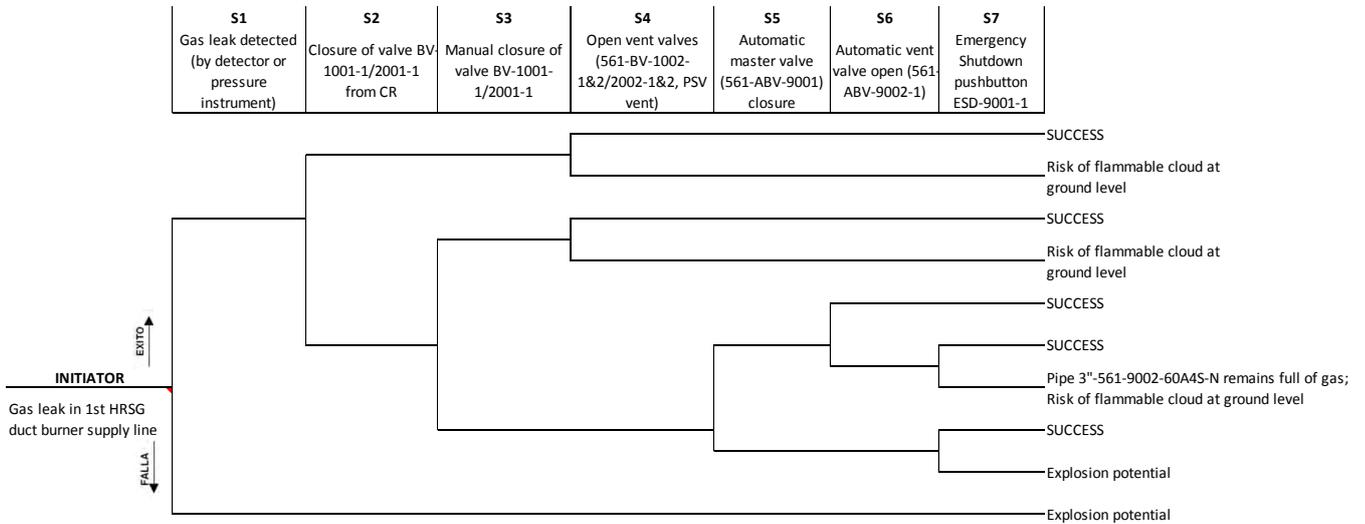


Figura 3.3.26. E52 Baja Calidad de Gas (alto contenido de agua, partículas y líquidos)

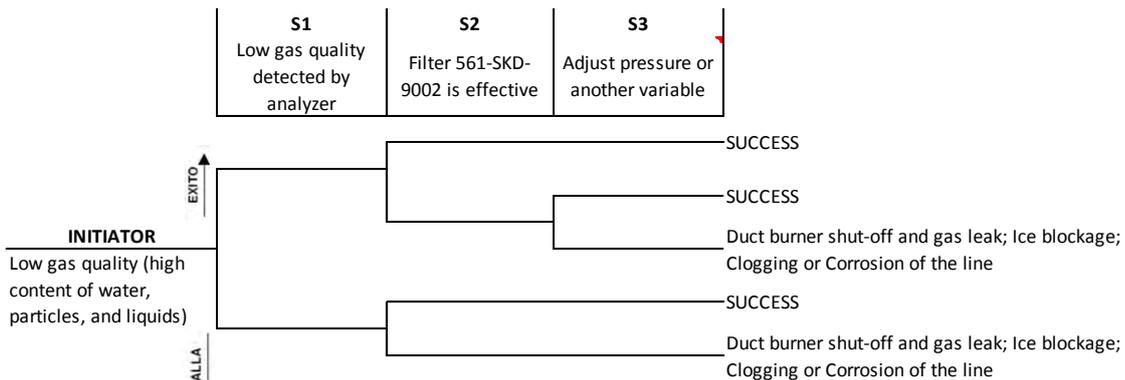
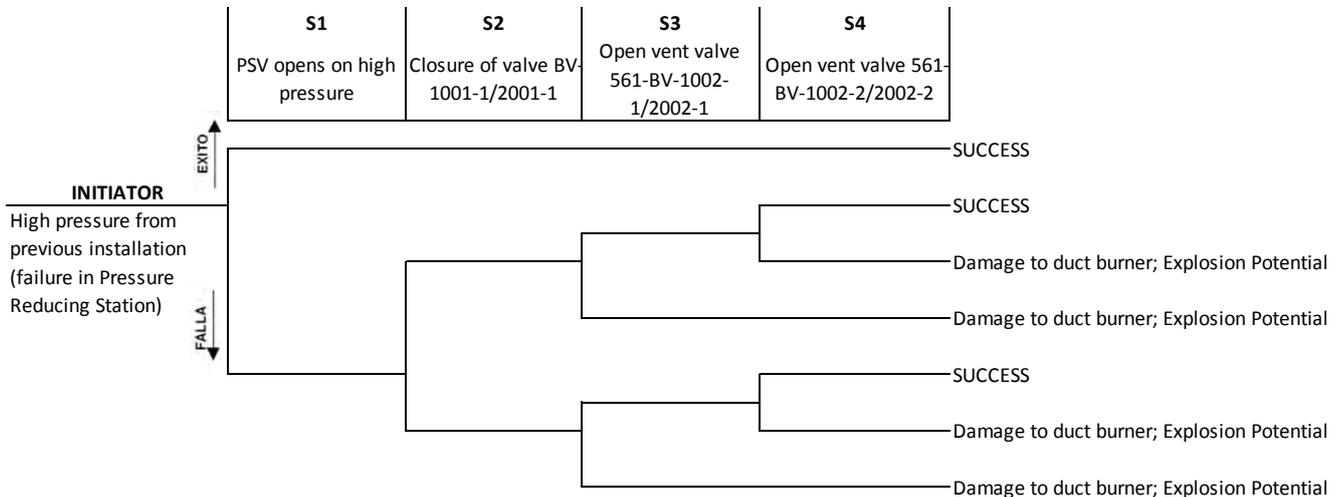


Figura 3.3.27. E53 Alta Presión (proveniente de sección previa)



APÉNDICE D – ÁRBOLES DE FALLAS

Tabla 3.4.a. Probabilidad de Falla por Árbol de Fallas

Fault Tree	Probability	No. Of Basic Events
AUTO_MASTER_V-C	2.286E-03	2
AUTO_MASTER_V-O	2.286E-03	2
AUTO_VENT_V-O	2.286E-03	2
ESS	1.214E-04	2
HIGH_P_DETECTED	5.111E-04	1
LEAK_DET	3.397E-03	2
MANUAL_MASTER_V-O	1.390E-04	2
NO-P-DETECTED	2.565E-03	1
OBSTRUCTION_DETECTED	2.189E-03	1

Tabla 3.4.b. Eventos Iniciaadores

Initiating Event	Frequency (yr ⁻¹)	Description
GAS-LEAK	7.750E-03	Leak of gas through a pipe
HIGH-GAS-PRESSURE	1.00E-02	High gas pressure originated from previous installation
MASTER-V-C	3.140E-02	Master valve closed when it should be open
NO_PRESSURE	1.141E-06	No (or low) pressure originated from previous installation
OBSTRUCTION	4.11E-03	Obstruction of a pipe or equipment located downstream
VENT_V-O	3.14E-02	Vent valve open when it should be closed

Tabla 3.4.c. Lógica de Árboles de Fallas con Probabilidad para Eventos Básicos

auto_master_v-c OR Automatic master valve (561-ABV-9001) closure. Pneumatic operated valve
. NO-CHANGE (2.200E-003)
. SPURIOUS-OP (8.616E-005)
auto_master_v-o OR Automatically open master valve (561-ABV-9001-1)
. MASTER (2.200E-003) No change of position on demand (CCPS)
. MASTER-1 (8.616E-005) Spurious Operation (CCPS)
auto_vent_v-o OR Automatic vent valve open (561-ABV-9002-1)
. VENT (2.200E-003) No change of position on demand (CCPS)
. VENT1 (8.616E-005) Spurious Operation (CCPS)
ess OR Emergency Shutdown pushbutton ESD-9001-1 (Electrical Switch-Flow)
. FAIL-FUNCT (1.008E-004) Failed to function when signaled
. NO-SIGNAL (2.064E-005) Functioned without signal (CCPS)
high_p_detected OR High pressure detected by Flow Meter section
. P-INSTR-DETECTS-HP (5.111E-004)
leak_det OR Leak detected (FT)
. GAS-DETCOR (2.738E-008) A gas detector/sensor detects the leak.
. P-INSTR-DET-LEAK (3.397E-003) P instrument detects the leak (FT)
manual_master_v-o OR Manual master valve (561-ABV-9001-1) open
. NO-CHANGE1 (5.280E-005) No change of position on demand (CCPS)
. SPURIOUS-OP2 (8.616E-005) Spurious Operation (CCPS)
no-p-detected OR Flow meter section detects lack of pressure
. FLOWMETER (2.565E-003) Flowmeter section detects lack of pressure, general average (CCPS)
obstruction_detected OR Obstruction is detected by pressure instrument. Pneumatic pressure transmitter (CCPS)
. OBSTR-HP-DET (2.189E-003) A pressure instrument detects the high pressure during an obstruction

APÉNDICE E – DIAGRAMAS DE PROCESO

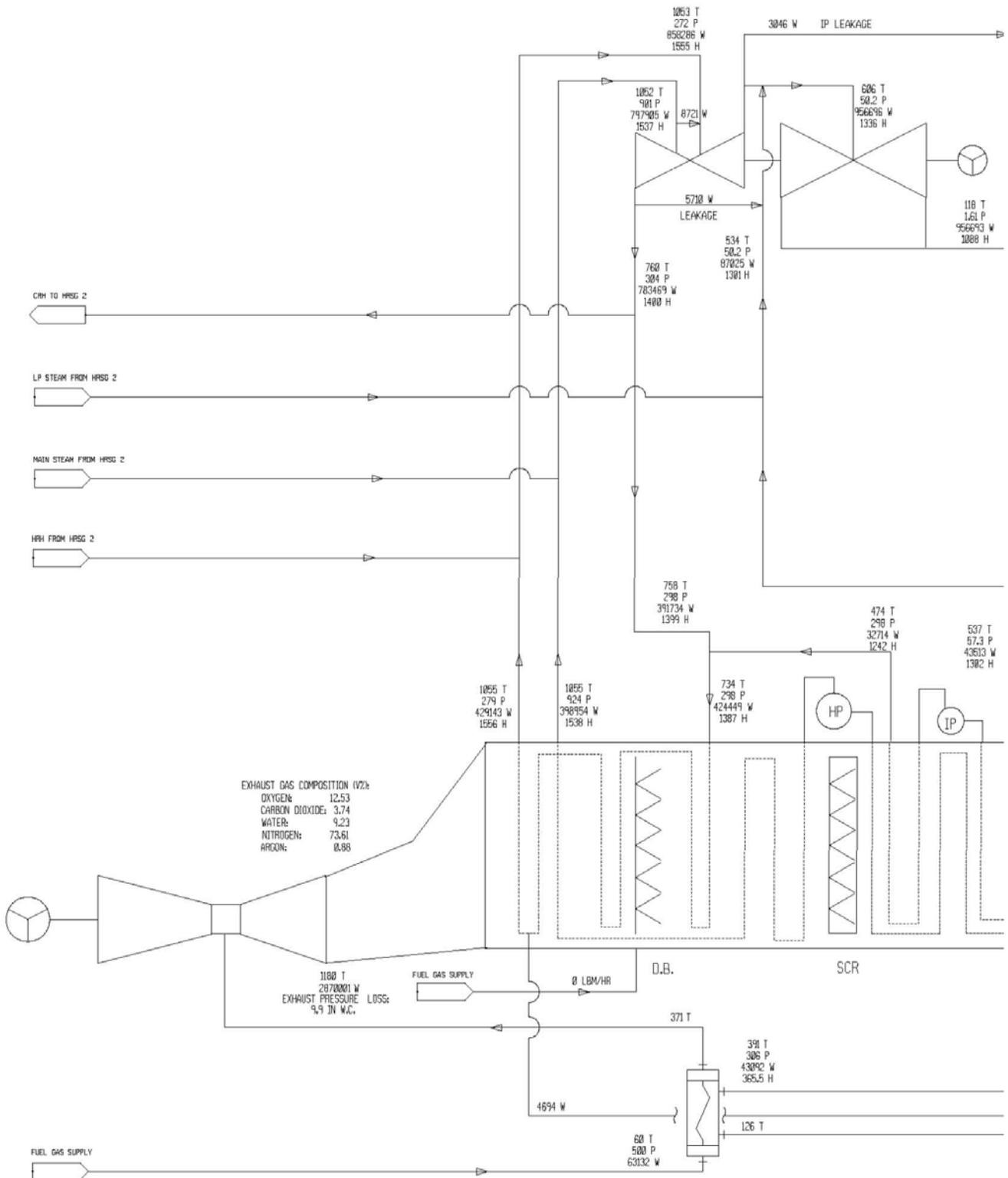
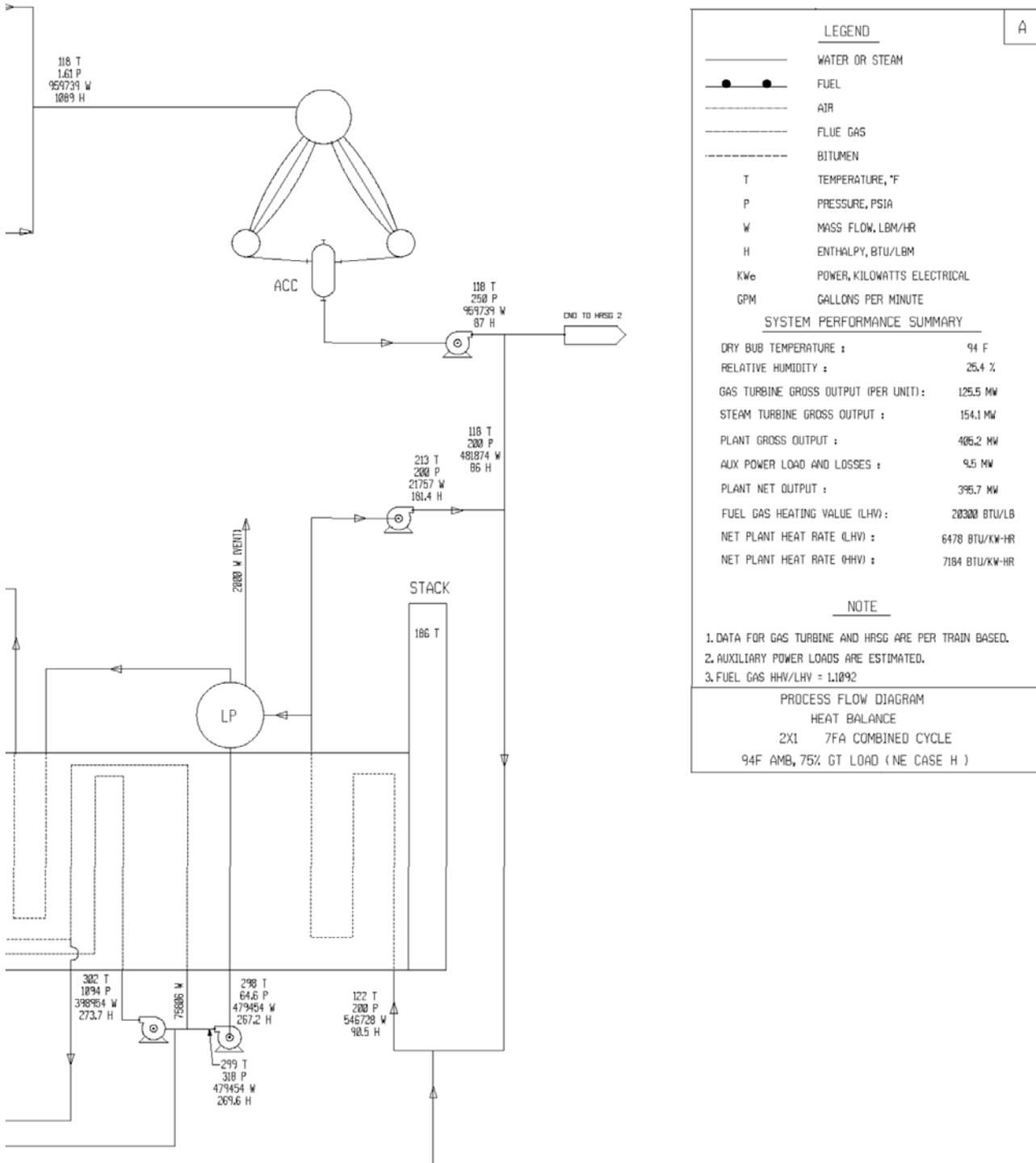
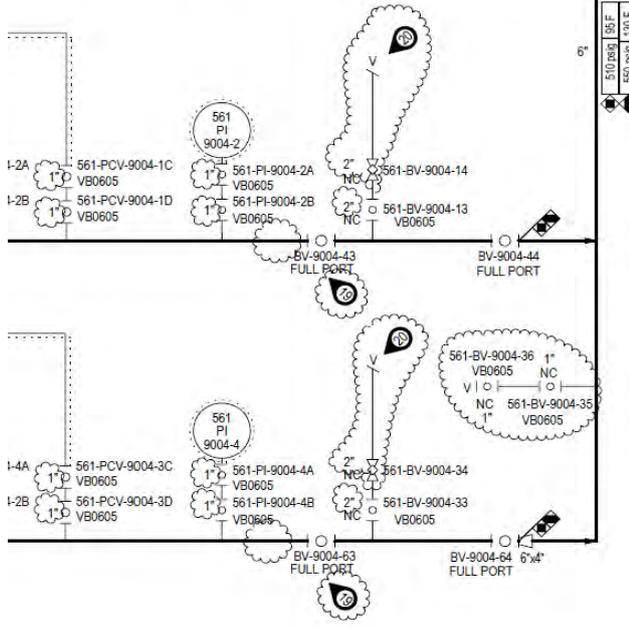
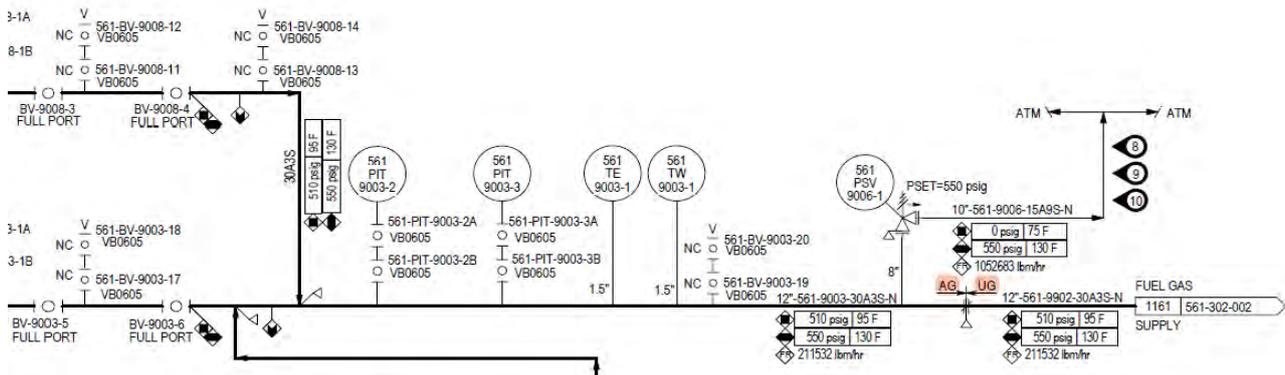


Figura 5.1. Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) de la Central de Ciclo Combinado





- NOTES:**
- FOR GENERAL NOTES, ABBREVIATIONS, AND SYMBOLS, SEE DRAWINGS DW-012-302-004, 005, AND 006.
 - SYSTEM CODE FOR VALVES AND PIPING SPECIALTIES IS THE SAME AS THE ASSOCIATED PIPING DESIGNATION.
 - ALL EQUIPMENT, VALVES, AND SPECIALTY ITEM TAG NUMBERS ARE PREFIXED WITH 1- UNLESS OTHERWISE NOTED.
 - ALL LOCAL VENTS AND DRAINS ARE TO HAVE A 4" LONG NIPPLE ONE END TERMINATED LOCALLY UNLESS OTHERWISE NOTED.
 - ALL INSTRUMENT ROOT VALVES, VENTS, AND DRAINS ARE 1.5" UNLESS OTHERWISE NOTED. ALL WATER AND STEAM PIPE RUNS LESS THAN 2.5" SHALL CONTAIN FREEZE PROTECTION (PF) AND LESS THAN 1.5" SHALL BE HEAT TRACED.
 - REFER TO DESIGN PROCEDURE DB-008-0001 FOR UNIVERSAL NUMBERING PROCEDURES.
 - FLOWRATES, NORMAL OPERATING CONDITIONS (GUARANTEED FIRED CASE), AND DESIGN CONDITIONS APPLY TO ALL DOWNSTREAM PIPING UNLESS OTHERWISE NOTED.
 - VENT TO SAFE LOCATION.
 - VENT TO HIGHEST STEEL STRUCTURE IN THE AREA.
 - ADD 1/2" MESH BIRD SCREEN ON OUTLETS.
 - NOT USED.
 - NOT USED.
 - FLOW COMPETER COMMUNICATES TO DCS BY MODBUS LINK.
 - EMERGENCY PUSH BUTTON TO BE LOCATED IN THE CONTROL ROOM.
 - OPERATOR TO VERIFY NO TANK RUPTURE/LEAK BEFORE DRAINING.
 - REGULATOR SENSING LINE TO BE CONNECTED AFTER A STRAIGHT RUN OF 6 TO 10 PIPE DIAMETERS FROM THE REGULATOR OUTLET.
 - PRESSURE CONTROLLERS VENT DURING NORMAL OPERATION. THE VENTS (TUBING) SHALL VENT TO A SAFE LOCATION, HAVE AS FEW ELBOWS AS POSSIBLE, AND BE PROTECTED FROM CONDENSATION, FREEZING, AND PLUGGING SUBSTANCES.
 - OPERATING REGULATOR SHALL BE LOCATED A MINIMUM OF 20 PIPE DIAMETERS DOWNSTREAM OF MONITOR REGULATOR.
 - ISOLATION VALVE SHALL BE LOCATED A MINIMUM OF 20 PIPE DIAMETERS DOWNSTREAM OF OPERATING REGULATOR.
 - VENT TO TERMINATE 12 FEET ABOVE GRADE LEVEL.

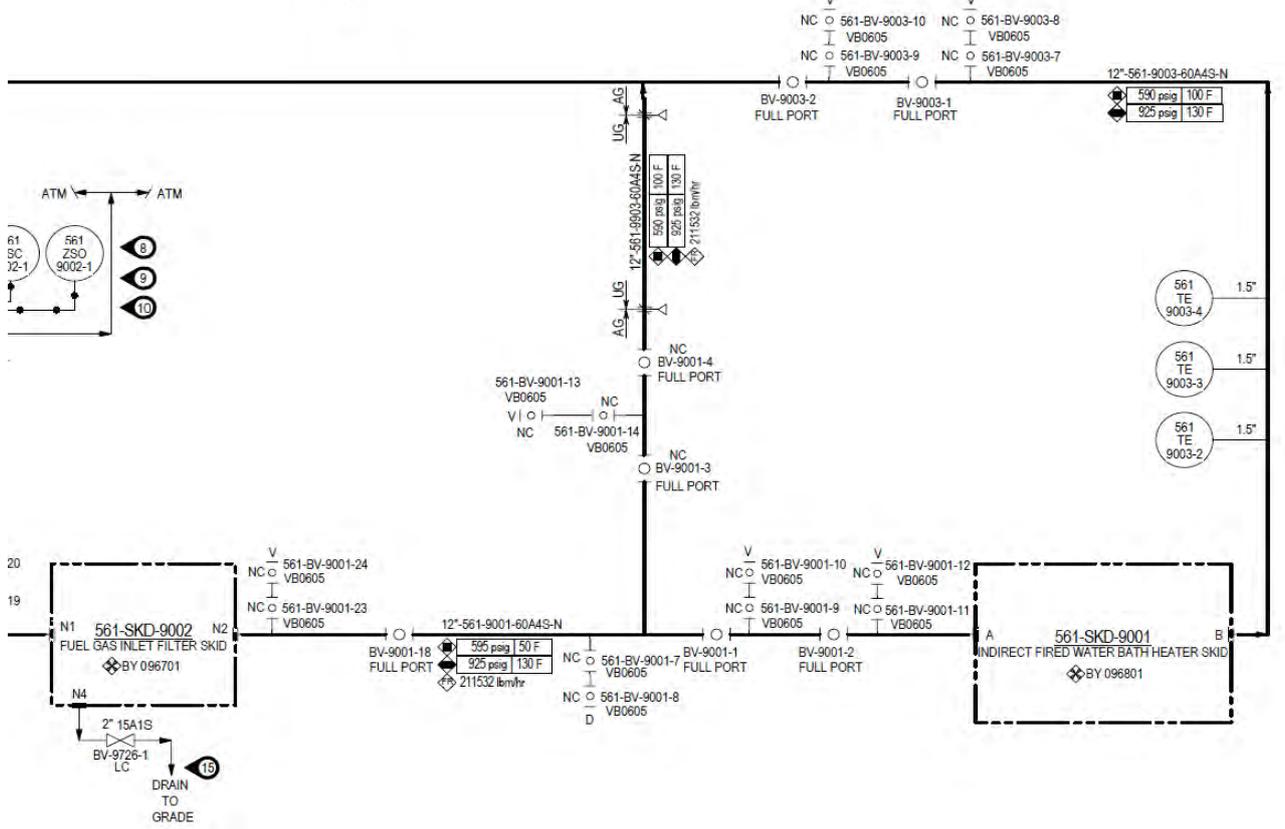
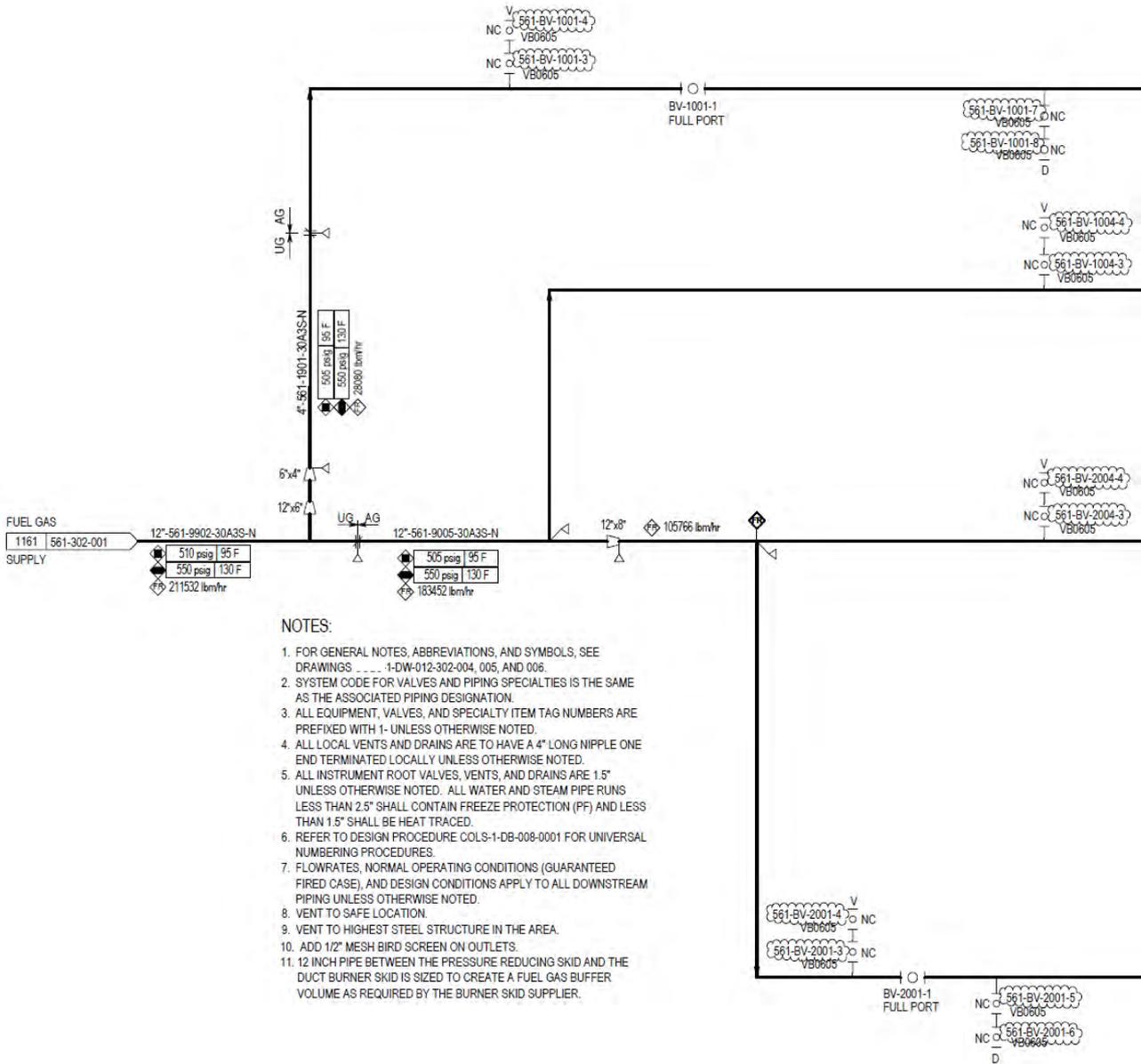


Figura 5.3. DTI del Sistema de Suministro de Gas (2 de 4)



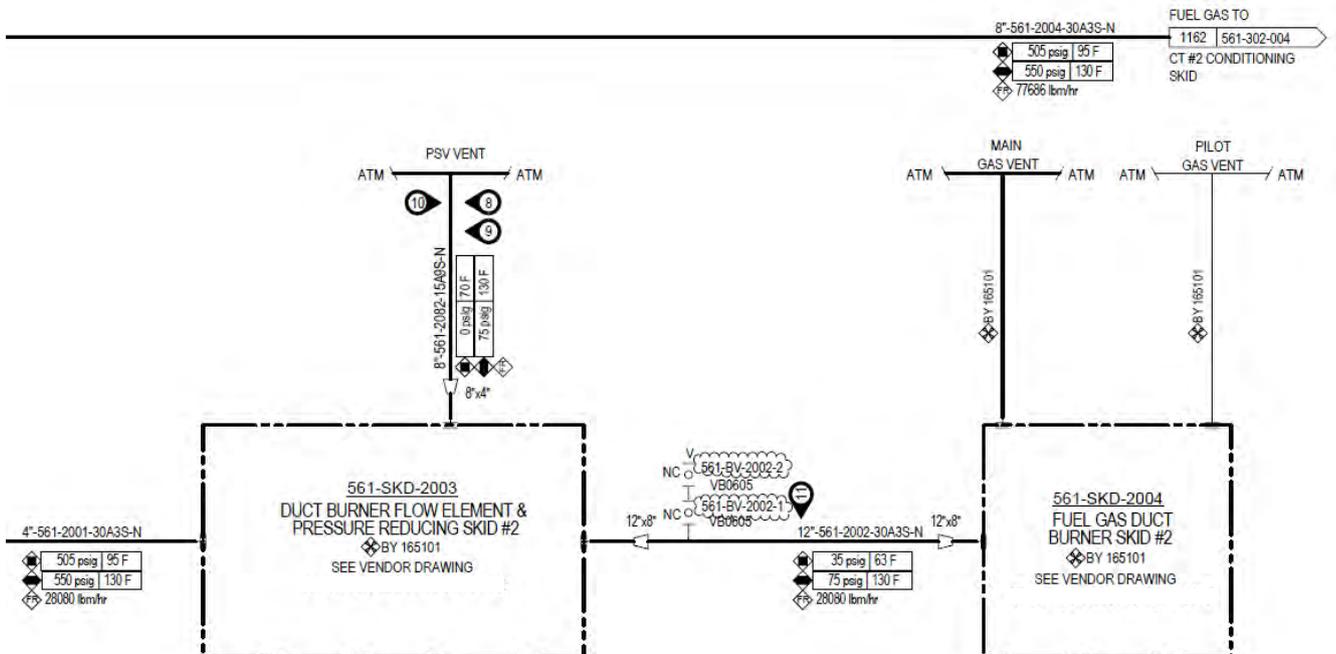
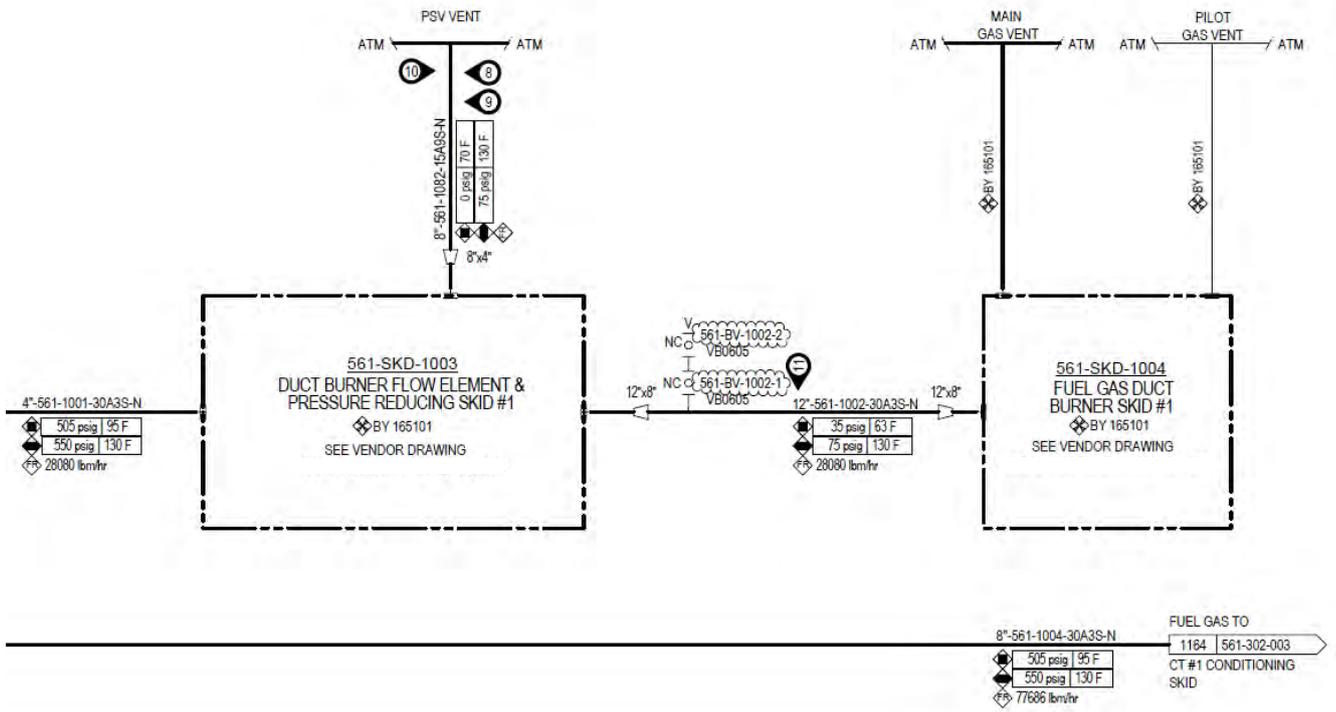
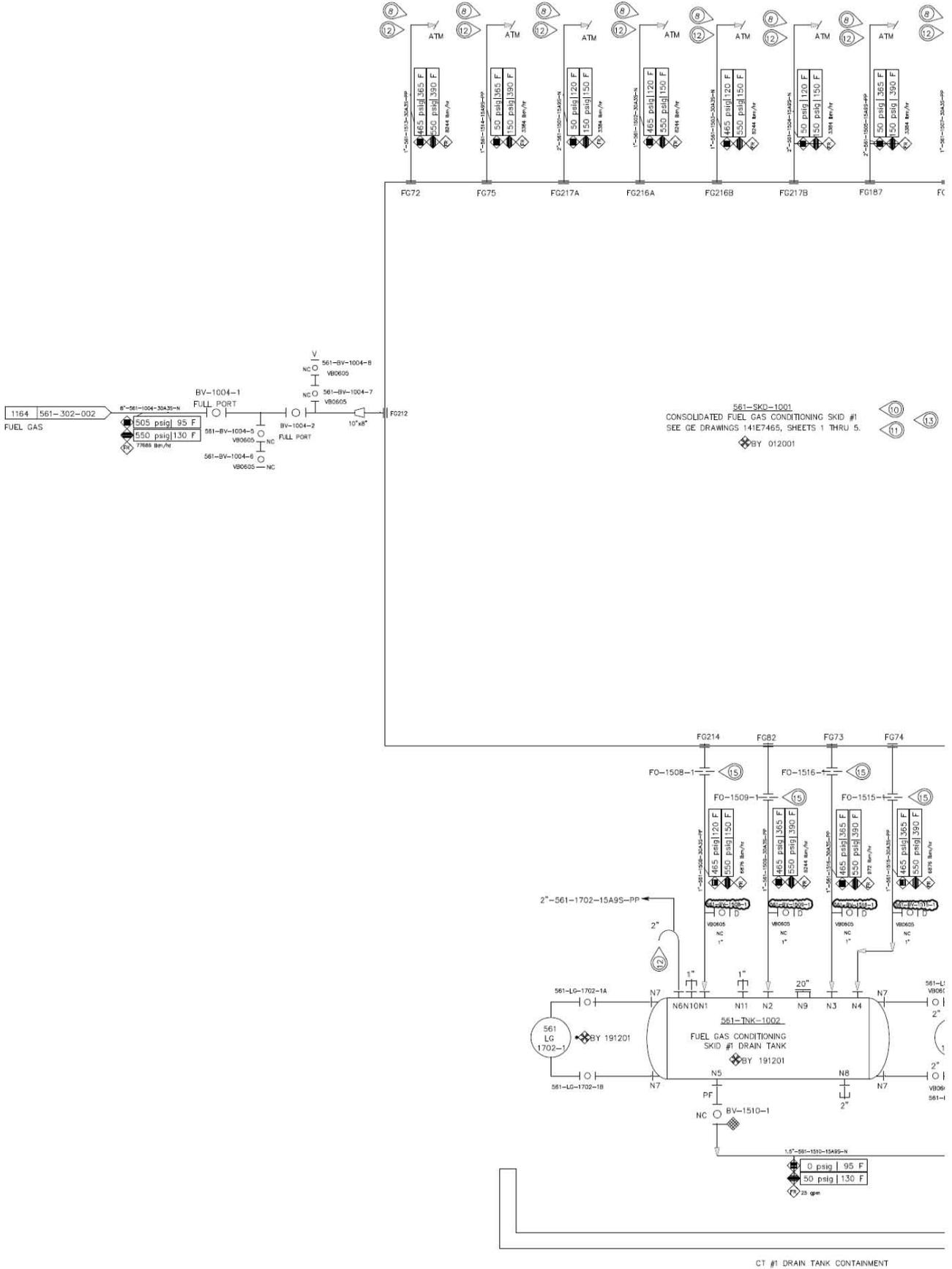
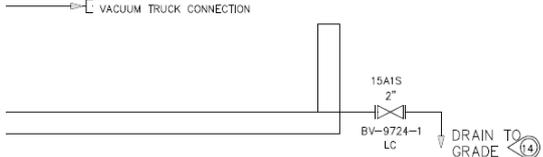
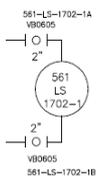
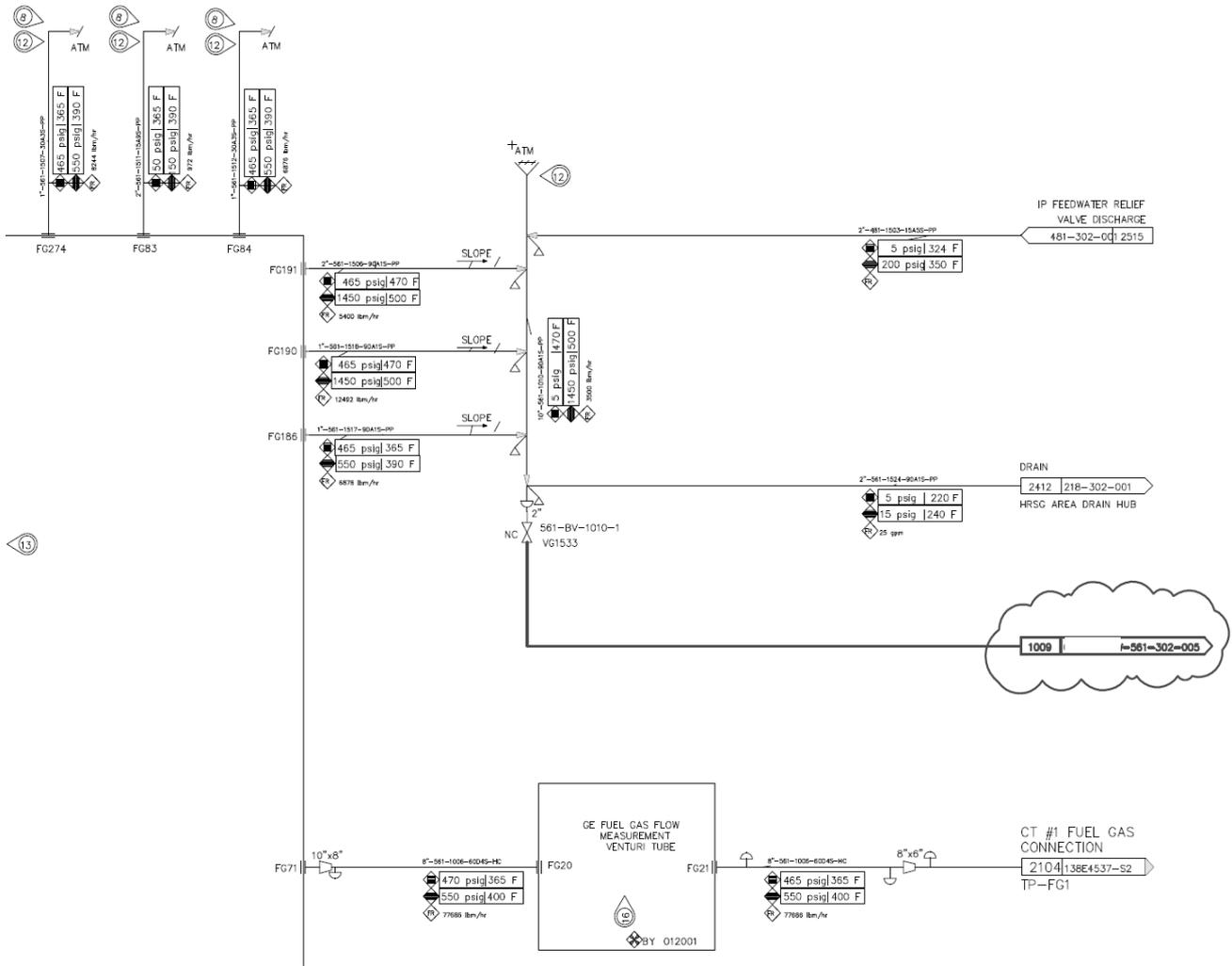


Figura 5.4. DTI del Sistema de Suministro de Gas (3 de 4)

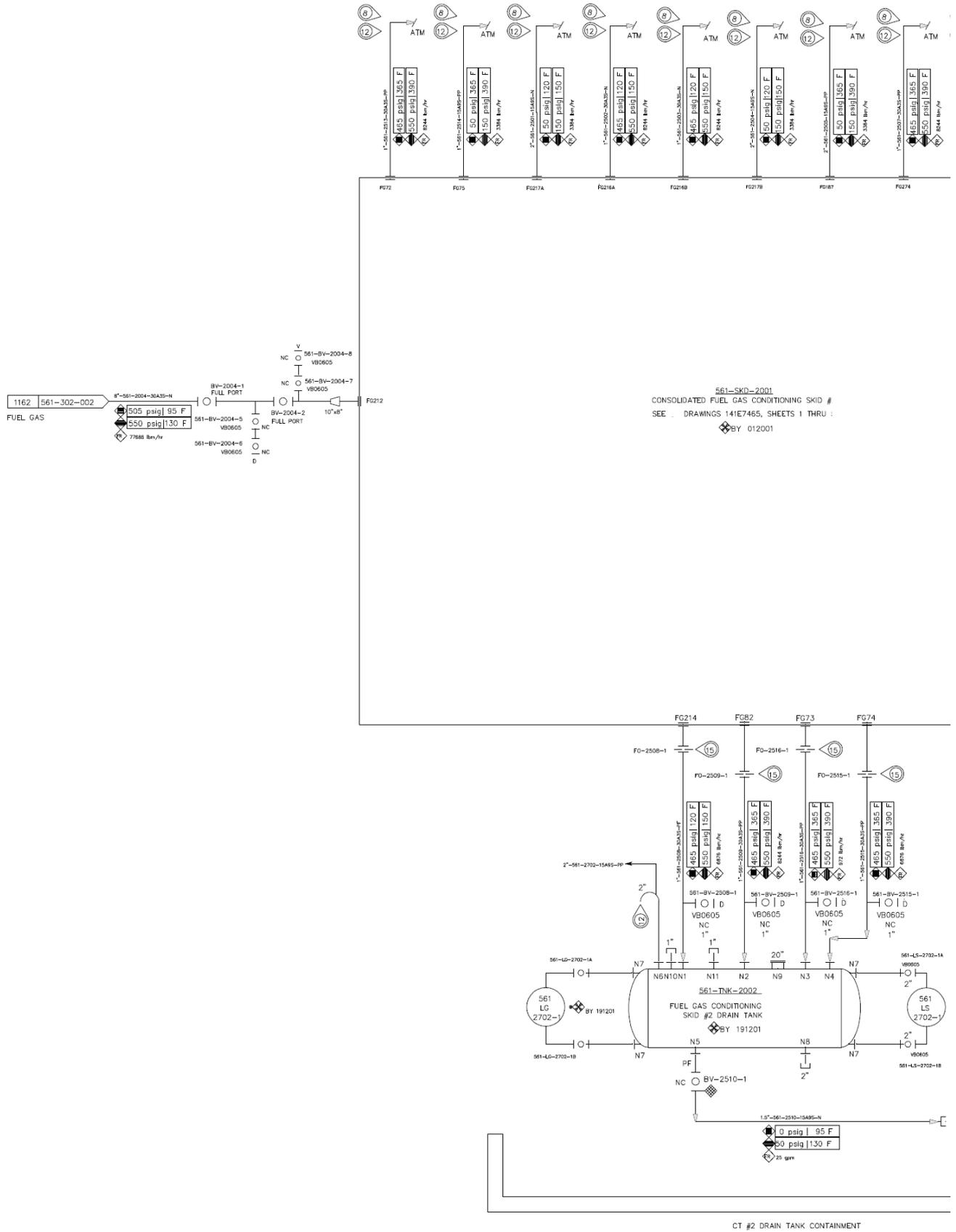


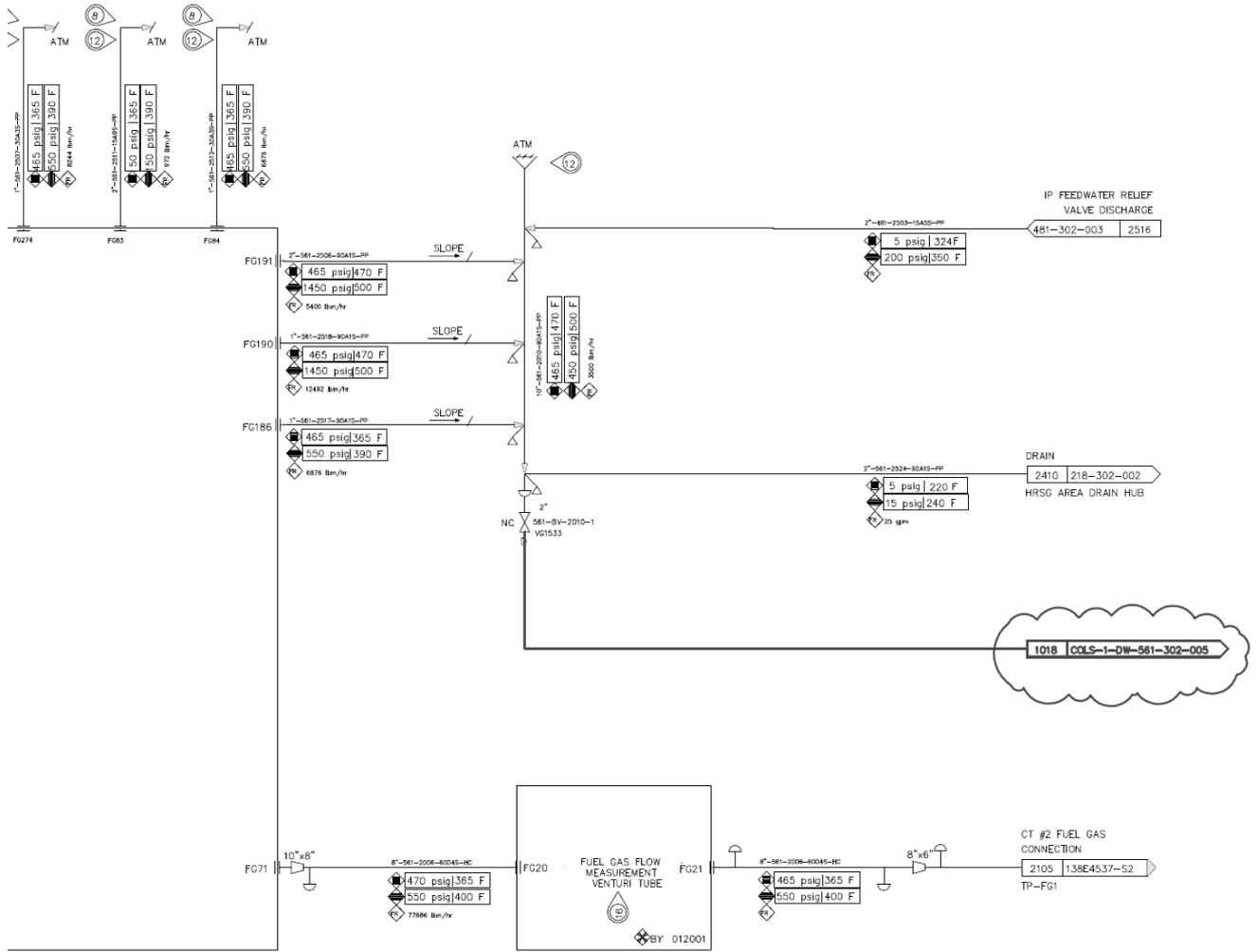


NOTES:

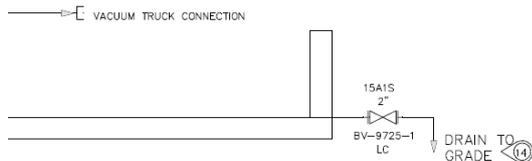
1. FOR GENERAL NOTES, ABBREVIATIONS, AND SYMBOLS, SEE DRAWINGS -012-302-004, 005, AND 006.
2. SYSTEM CODE FOR VALVES AND PIPING SPECIALTIES IS THE SAME AS THE ASSOCIATED PIPING DESIGNATION.
3. ALL EQUIPMENT, VALVES, AND SPECIALTY ITEM TAG NUMBERS ARE PREFIXED WITH 1- UNLESS OTHERWISE NOTED.
4. ALL LOCAL VENTS AND DRAINS ARE TO HAVE A 4" LONG NIPPLE ONE END TERMINATED LOCALLY UNLESS OTHERWISE NOTED.
5. ALL INSTRUMENT ROOT VALVES, VENTUREANS, DRAINS UNLESS OTHERWISE NOTED. ALL WATER AND STEAM PIPE RUNS LESS THAN 2.5" SHALL CONTAIN FREEZE PROTECTION (PF) AND LESS THAN 1.5" SHALL BE HEAT TRACED.
6. REFER TO DESIGN PROCEDURE COLS-1-DB-008-0000 FOR UNIVERSAL NUMBERING PROCEDURES.
7. FLOWRATES, NORMAL OPERATING CONDITIONS (GUARANTEED FIRED CASE), AND DESIGN CONDITIONS APPLY TO ALL DOWNSTREAM PIPING UNLESS OTHERWISE NOTED.
8. ALL VENTS AND DRAINS SHALL BE COLLECTED WITH A BUCKET TYPE CONTAINMENT.

Figura 5.5. DTI del Sistema de Suministro de Gas (4 de 4)





- NOTES:
- FOR GENERAL NOTES, ABBREVIATIONS, AND SYMBOLS, SEE DRAWINGS 1-DW-012-302-004, 005, AND 006.
 - SYSTEM CODE FOR VALVES AND PIPING SPECIALTIES IS THE SAME AS THE ASSOCIATED PIPING DESIGNATION.
 - ALL EQUIPMENT, VALVES, AND SPECIALTY ITEM TAG NUMBERS ARE PREFIXED WITH 1- UNLESS OTHERWISE NOTED.
 - ALL LOCAL VENTS AND DRAINS ARE TO HAVE A 4" LONG NIPPLE ONE END TERMINATED LOCALLY UNLESS OTHERWISE NOTED.
 - ALL INSTRUMENT ROOT VALVES, VENTURI TUBES, AND DRAINS UNLESS OTHERWISE NOTED. ALL WATER AND STEAM PIPE RUNS LESS THAN 2.5" SHALL CONTAIN FREEZE PROTECTION (PF) AND LESS THAN 1.5" SHALL BE HEAT TRACED.
 - REFER TO DESIGN PROCEDURE 1-DB-008-0001 FOR UNIVERSAL NUMBERING PROCEDURES.
 - FLOWRATES, NORMAL OPERATING CONDITIONS (GUARANTEED FIRED CASE), AND DESIGN CONDITIONS APPLY TO ALL DOWNSTREAM PIPING UNLESS OTHERWISE NOTED.
 - ALL VENTS AND DRAINS SHALL BE COLLECTED WITH A BUCKET TYPE CONTAINMENT.



ABREVIATURAS

AIChE American Institute of Chemical Engineers (Instituto Americano de Ingenieros Químicos)

CC Ciclo Combinado

CCPS Center for Chemical Process Safety (Centro para Seguridad de Procesos Químicos)

CFE Comisión Federal de Electricidad

CT Combustion Turbine (Turbina de Combustión)

DOF Diario oficial de la federación

EIA Energy Information Administration (Administración de Información Energética)

ERM Estación de Regulación y Medición

HAZOP Hazard and Operability (Estudio de Riesgo y Operatividad)

HRSG (GVRC) Heat Recovery and Steam Generator (Generador de Vapor por Recuperación de Calor)

lbm libra mol

LGEEPA Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente

MCS (CMC) Minimal Cut Sets (Conjuntos Mínimos de Corte)

MW mega watt

NOM Norma Oficial Mexicana

PEMEX Petróleos Mexicanos

PRODESEN Programa de Desarrollo del Sector Eléctrico Nacional

PROFEPA Procuraduría Federal de Protección al Ambiente

PRV Pressure Relief Valve (Válvula de Alivio de Presión)

psi libra por pulgada cuadrada

SEMARNAT Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

SENER Secretaría de Energía

STPS Secretaría de Trabajo y Previsión Social

REFERENCIAS

- Asociación Mexicana de Gas Natural. (s.f.). Consultado en octubre de 2016
<http://www.amgn.org.mx/regulacion.html>
- Carson, B. (2015). *Duct burner operation beyond original design*. Obtenido de Electric Power Research Institute: <https://goo.gl/UHqh0Q>
- Center for Chemical Process Safety (CCPS). (1989). *Guidelines for Process Equipment Reliability Data with Data Tables*. AIChE.
- Center for Chemical Process Safety (CCPS). (1995). *Guidelines for Process Safety Documentation*. NY: American Institute of Chemical Engineers.
- Conroy, J. (s.f.). *Improving Duct Burner Performance Through Maintenance and Inspection*. Obtenido de Electric Power Research Institute: <https://goo.gl/v0T2rSI>
- Creus, A. (2011). *Seguridad e Higiene en el Trabajo un Enfoque Integral*. Alfaomega.
- DOF. (2012). *LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE*. Obtenido de <http://conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/protocolo/LGEEPA.pdf>
- DOF. (Diciembre de 2013). *PROGRAMA Sectorial de Energía 2013-2018*. Obtenido de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5326587&fecha=13/12/2013
- EIA. (Abril de 2013). *Updated Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants*. Obtenido de EIA: https://www.eia.gov/forecasts/capitalcost/pdf/updated_capcost.pdf
- Fernández, I., & al., e. (2012). *Seguridad funcional en instalaciones de proceso. Sistemas instrumentados de seguridad y análisis SIL*. Díaz de Santos.
- FLOMATIC. (2016). Obtenido de <http://www.flomatic.com/>
- García Garrido, S. (2011). *Operación y mantenimiento de centrales de ciclo combinado*. Ediciones Díaz de Santos.
- González, C. (2011). *Explosión en la termoeléctrica de Tuxpan deja 2 muertos y 9 heridos*. Obtenido de Imagen del Golfo: <https://goo.gl/2Mdbc4>
- Guzmán, B., & Vugdeliya, J. (2013). *When "wait and see" isn't good enough: applying HAZOP at Genelba*. Obtenido de Modern Power Systems: <https://goo.gl/fE1tgw>
- Juárez Pastrana, M. A. (2014). *La metodología HAZOP aplicada al análisis de riesgos*. Tesis UNAM.
- Kumar, N., & al., e. (Abril de 2012). *Power Plant Cycling Costs*. Obtenido de National Renewable Energy Laboratory: <http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/55433.pdf>

- PROFEPA. (s.f.). *Sanciones y Multas*. Consultado en noviembre de 2016
http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/295/1/mx/sanciones_y-multas
- Sabugal García, S. (2006). *Centrales térmicas de ciclo combinado: teoría y proyecto*. Endesa.
- SEMARNAT. (s.f.). Obtenido en octubre de 2016 de www.semarnat.gob.mx
- SENER. (2016). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2016-2030*. Obtenido de <https://goo.gl/GiOU6V>
- SENER. (2016). *Prospectiva de Gas Natural y Gas L.P. 2015-2029*. Obtenido de <https://goo.gl/1BczLS>
- SENER. (2016). *Prospectiva del Sector Eléctrico 2015-2029*. Obtenido de <https://goo.gl/BQfcjc>
- SENER. (2015). *Balance Nacional de Energía 2014*. Obtenido de <http://www.gob.mx/sener/documentos/balance-nacional-de-energia>
- Serrano, M. (2014). *Identificación de peligros por almacenamiento de sustancias químicas en industrias de alto riesgo en México*. CENAPRED.
- Stephens, M. J. (Octubre de 2000). *A MODEL FOR SIZING HIGH CONSEQUENCE AREAS ASSOCIATED WITH NATURAL GAS PIPELINES*. Obtenido de PS Trust:
<http://pstrust.org/docs/C-FerCircle.pdf>
- Storch de Gracia, J. (2008). *Seguridad industrial en plantas químicas y energéticas. Fundamentos, evaluación de riesgos y diseño*. Díaz de Santos.
- STPS. (2008). *NOM-017-STPS-2008, Equipo de protección personal-Selección, uso y manejo en los centros de trabajo*. Obtenido de <http://www.stps.gob.mx/bp/secciones/dgsst/normatividad/normas/Nom-017.pdf>
- STPS. (2012). *NOM-028-STPS-2012, Sistema para la administración del trabajo-Seguridad en los procesos y equipos críticos que manejen sustancias químicas peligrosas*. Obtenido de <http://www.stps.gob.mx/bp/secciones/dgsst/normatividad/normas/Nom-028.pdf>
- WIKA. (2013). Obtenido de 2013 WIKA Price List Pressure and Temperature Measurement:
<https://goo.gl/3PdtID>