



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA**

**ANÁLISIS DE RIESGOS EN LA ETAPA DE
GASIFICACIÓN PARA EL PROCESO DE
PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE
CARBÓN MINERAL**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O Q U Í M I C O

P R E S E N T A:

MANUEL IVÁN LÓPEZ ARANA

DIRECTOR DE TESIS:

M. EN I. PABLO EDUARDO VALERO TEJEDA

CIUDAD DE MÉXICO

2018





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.

AGRADECIMIENTOS PROFESIONALES

Me gustaría comenzar agradeciendo a mi asesor, profesor Pablo Valero Tejeda, por apoyarme con la realización de esta tesis, por su forma de transmitir el conocimiento que ha adquirido dentro y fuera de la docencia; así como la manera de compartir la experiencia que posee, considero que es un gran profesor y me honra haber tenido el privilegio de haber tomado clase con usted. De la misma forma, agradezco enormemente a la profesora Alejandra Valentán González, gran persona y amiga, ella fue parte del inicio de mi carrera; es una excelente profesora, dotada de gran experiencia y, sobre todo, ayuda a encaminar a los nuevos estudiantes a entender, apreciar y querer a esta difícil licenciatura; todos los días llega con una sonrisa y motiva a los alumnos a continuar.

Me gustaría, también, agradecer al profesor Aldo Varela Martínez, por tomarse el tiempo de leer y comentar esta tesis, la cual es sumamente importante para mí; desgraciadamente no tuve el honor de tomar clases con él, aunque verdaderamente me hubiera gustado, ya que las referencias que se escuchan son, sin lugar a dudas excelentes. Por otra parte, agradezco a la profesora Elisa Viñas Reyes, por las clases, el tiempo y los conocimientos brindados; considero que es una excelente profesora ya que, como bien dicen, séptimo semestre es el más difícil y ella logra facilitar temas complejos, generando interés por parte de todos los alumnos, y eso es algo sumamente complicado de lograr. De la misma forma, quisiera agradecer al profesor Rodolfo Herrera Toledo por darme la oportunidad de cursar con él, a pesar de que no fue una clase teórica, es impresionante escucharlo hablar sobre temas ingenieriles, poseedor de un amplio conocimiento; además fue un completo honor tomar un curso inter-semestral con él, la forma de explicación de temas complejos es impecable; igualmente me hubiera gustado y hubiera sido un honor tomar una clase un poco más teórica con él.

Para concluir, quisiera dar un particular agradecimiento a todos los profesores que tuve a lo largo de la carrera, los cuales fueron parte de este logro personal, me siento afortunado por haber sido alumno de cada uno de ellos.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

Primeramente me gustaría agradecer infinitamente a mi madre, Sara Arana, modelo de perseverancia, por ser el pilar de la familia, sustento y ejemplo de vida para mi hermano y para mí; sobreponiéndose ante la adversidad y siempre salir adelante. Agradezco el motivarme a seguir adelante y superarme día a día; así como ser parte fundamental en mi educación, desde la educación básica hasta culminar con la presentación de este trabajo; asimismo espero nunca defraudarte y ser un apoyo para la familia, y me faltan palabras para agradecer todo lo que ha dado y hecho por nosotros. A mi hermano, Pedro López Arana, por ser un ejemplo, amigo y confidente; por escucharme y ayudarme cuando lo he necesitado; de la misma forma que me ha regañado cuando ha sido o considerado pertinente, siempre tratando de buscar que sea una mejor persona; agradezco enormemente el esfuerzo que ha hecho por la familia; por siempre preocuparse por mí y por siempre estar incondicionalmente. Del mismo modo, me gustaría agradecer a Mario Guillén por ser como un padre para mí, estando presente en muchas de las etapas más importantes de mi vida (siendo ésta una más en las que ha estado presente), además de siempre ser un ejemplo y un sobre todo amigo.

Igualmente un agradecimiento a mis tías Ivonne López e Ivania Arias por siempre dar su apoyo a la familia, por su cariño incondicional y por siempre motivarme a ser una mejor persona, por escuchar y siempre estar pendiente de nosotros. De la misma forma quisiera agradecer a María García Limón por ser una amiga excelente, por ayudar a la familia, por estar en las buenas y en las malas, por ser una persona sencilla, amorosa y sincera, en resumen, por ser una excelente persona. Igualmente, agradezco a Federico Fernández, Iker Beltrán, Alejandro Montes de Oca, Luis Cordero y Roberto Valdez por aceptarme siempre como un amigo más y después de tanto tiempo seguir presentes en mi vida.

Asimismo, me gustaría agradecer a Luis Enrique Gutiérrez, Mayra Karina Martínez, y Juan Carlos Ramos por siempre estar conmigo y por tantos años de amistad. Me siento afortunado de tenerlos en mi vida, son el claro ejemplo de que los amigos son la familia que cada uno escoge, son mis mejores amigos, son como hermanos

para mí; sé que puedo contar con ellos y ellos conmigo hoy y siempre y de manera incondicional; agradezco todos los momentos y recuerdos que hemos forjado a lo largo de los años y de antemano sé que todavía faltan muchas cosas por vivir. Del mismo modo, un agradecimiento a Yamila Garibay, excelente amiga y grandioso ser humano, comprensiva, atenta y siempre dispuesta a escuchar y a aconsejar a pesar de nuestras diferencias. Agradezco a Paulina Gaitán por tantos años de sincera amistad y apoyo, a pesar de los tiempos prolongados sin vernos ambos sabemos que podemos contar el uno con el otro hoy y siempre.

Agradezco a mis compañeros, colegas de profesión y amigas Diana Alzati y Jessica Garro por compartir los mejores momentos de la carrera y servicio social, creando excelentes recuerdos de mi etapa universitaria; aún tenemos mucho camino que recorrer en la vida profesional y personal. Asimismo agradezco a los amigos que entraron recientemente en mi vida, Kim Pak y Michelle Pérez Márquez, por ser unas excelentes personas, francas, confiables y sinceras, de la misma forma tienen un amigo en mí.

Por último quisiera dar un particular agradecimiento a Ivania Céspedes, Martha Guzmán, Enrique Arias y Pedro López (mis abuelas, tío y padre respectivamente) que por cuestiones de vida ya no se encuentran con nosotros, sin embargo gracias a las experiencias vividas con cada uno de ellos he llegado a ser la persona que soy, sobreponiéndome ante las adversidades; entendiendo que todo lo que hagas tiene algún impacto en alguien.

RESUMEN

En esta investigación se pretende realizar un estudio de análisis de riesgos para la producción de hidrógeno a partir de carbón mineral, enfocado únicamente en la etapa de gasificación, ya que ésta fase es el corazón del proceso. Para la realización del estudio se aplicarán dos metodologías de enfoque cualitativo, las cuales son: “¿Qué pasa sí?” y “Hazard and Operability” (HazOp). De la misma forma, son explicadas con claridad las demás metodologías de análisis de riesgos, cubriendo aspectos y conceptos especializados de los mismos. Se realiza exclusivamente con estos dos métodos ya que para la aplicación de metodologías estocásticas es necesario contar con información directa del proceso, así como contar con el proceso en forma física; sin embargo para las dos metodologías propuestas los estudios pueden realizarse con información básica del mismo. Asimismo, el enfoque del trabajo es exclusivamente desde el punto de vista de la ingeniería de procesos, debido a que para la completa realización de un análisis de riesgos, es necesaria la intervención de un grupo multidisciplinario el cual debe incluir expertos en cada área. El trabajo concluye con la instrumentación propia de la etapa de gasificación garantizando el correcto funcionamiento, control y seguridad del proceso.

ABSTRACT

In this research I intend to carry out a risk analysis study for on production of hydrogen from coal, focusing on the gasification stage and which is the heart of the process. For the study I will apply two methodologies, both are qualitative methods, they are called: What if? and Hazard and Operability (HazOp). In the same way, the other methods are explained clearly, covering specialized concepts. It will be done exclusively with these methods, because for the application of stochastic methodologies it is necessary to have direct information of the process, so as the process in physical form; however, for the two proposed methodologies, the studies can be done with basic information about the process. Likewise, the work is exclusively focused on process engineering, because to apply another method is necessary the intervention of a multidisciplinary group that must include experts in each area. The work concludes with the proper instrumentation of the gasification stage that guarantees the correct functioning, control and safety of the process.

ÍNDICE

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	2
CAPÍTULO I: Antecedentes	
1.1 Carbón	3
1.2 Clasificación del carbón	3
1.3 Usos del carbón	7
1.4 Proceso de producción	11
1.5 Marco normativo y normalización	13
CAPÍTULO II: Marco teórico	
2.1 Antecedentes de análisis de riesgos	17
2.2 Sistemas integrados de seguridad (SIS)	18
2.3 Modos de fallas	20
2.4 Capas de protección	21
2.4.1 Capas de prevención	21
2.4.2 Capas de mitigación	23
2.5 Anatomía de un incidente	24
2.6 Salvaguardas	25
2.7 Análisis de riesgos	27
2.8 Proceso de análisis y gestión de riesgos	29
2.9 Proceso de identificación, análisis y evaluación de riesgos	31
2.9.1 Definición del alcance	32
2.9.2 Identificación de peligros y riesgos	33
2.9.3 Estimación del nivel de riesgos	34
2.9.4 Análisis de frecuencia	35
2.9.5 Análisis de consecuencias	35
2.9.6 Cálculo de riesgo	36
2.9.7 Incertidumbre	37
2.9.8 Verificación del análisis	37
2.9.9 Documentación del análisis	38
2.9.10 Actualización del análisis	39
2.10 Metodologías de análisis de riesgos	40
2.10.1 Lista de verificación	40
2.10.2 ¿Qué pasa sí?	44
2.10.3 Combinación de Lista de verificación y ¿Qué pasa sí?	47
2.10.4 Análisis de modo de fallas y sus efectos (FMEA)	49
2.10.5 Análisis de peligro y operabilidad (HazOp)	53
2.10.6 Matrices de riesgo	58
2.10.7 Análisis de árbol de eventos (AAE)	65
2.10.8 Análisis de árbol de fallas (AAF)	70
2.10.9 Análisis de consecuencias (AC)	77
2.11 Identificación de peligros	79
2.12 Jerarquización de riesgos	80
2.13 Selección de las metodologías de análisis	80
2.14 Normatividad	82
CAPÍTULO III: Caso de estudio	
3.1 Introducción	85
3.2 Gasificadores	87
3.3 Procesos de gasificación del carbón	91
3.4 Hidrógeno	93
3.5 Reacciones involucradas en la producción de hidrógeno a partir de Carbón mineral	95

3.6 Reacciones de gasificación de carbón.	96
3.7 Normas relacionadas al control e instrumentación de procesos.	97
3.8 Balance de masa.	98
3.9 Filosofía de operación.	102
3.10 Diagrama de flujo de proceso (DFP).	107
3.11 Aplicación de la metodología ¿Qué pasa si?	108
3.11.1 Gasificador.	108
3.11.2 Scrubber (lavador de gases).	110
3.11.3 Torre flash.	112
3.11.4 Clarificador.	113
3.11.5 Filtros al vacío.	115
3.11.6 Tanques de almacenamiento.	116
3.11.7 Bombas.	117
3.11.8 Mezclador.	118
3.11.9 Intercambiadores de calor.	119
3.12 Aplicación de la metodología HazOp.	121
3.13 Índice de instrumentos.	151
3.14 Diagrama de Tuberías e Instrumentación generado a partir de los análisis de riesgos.	159
3.14.1 Nodo del gasificador.	160
3.14.2 Nodo del mezclador.	161
3.14.3 Nodo del scrubber.	162
3.14.4 Nodo de la torre flash.	163
3.14.5 Nodo de las bombas.	164
3.14.6 Nodo del clarificador.	165
3.14.7 Nodo de las esclusas.	166
3.14.8 Nodo de los filtros.	167
3.14.9 Nodos de los intercambiadores de calor.	168
3.14.10 Nodo de los tanques.	169
3.15 Propuesta de plano de Localización General (PLG).	170
3.16 Análisis de resultados.	171
CONCLUSIONES.	171
ANEXOS.	174
BIBLIOGRAFÍA.	182

LISTA DE TABLAS Y FIGURA

Tablas:

1.1 Norma ASTM D 388-82. Clasificación de carbones minerales por rango.	6
1.2 Reservas probadas de carbón a nivel mundial.	8
1.3 Normatividad Nacional relacionada al carbón.	13
1.4 Normatividad Internacional relacionada al carbón.	15
2.1 Tiempo estimado para realizar un análisis de lista de verificación.	43
2.2 Tiempo estimado para realizar un análisis de lista ¿Qué pasa si?	46
2.3 Tiempo estimado para realizar un análisis de lista de verificación / ¿Qué pasa si?.	49
2.4 Palabras guía para la realización del método HazOp.	55
2.5 Categorías de frecuencia para la aplicación de una matriz de riesgos.	61
2.6 Categorías de consecuencias para la aplicación de una matriz de riesgos.	62
2.7 Símbolos de eventos utilizados en la construcción de árboles de fallas.	75
2.8 Símbolos de compuertas utilizadas en la construcción de árboles de fallas.	76
2.9 Típico de las metodologías de acuerdo a la etapa de vida del proceso.	82

Figuras:

2.1 Protocolo para realizar un análisis FMEA.	53
2.2 Protocolo para realizar un análisis HazOp.	58
2.3 Principio ALARP.	59
2.4 Representación de las diferentes matrices de riesgos.	64
2.5 Procedimiento para realizar un AAE.	69
2.6 Procedimiento para realizar un AAF.	72
3.1 Representación general del proceso de gasificación.	86
3.2 Esquema de entradas y salidas de un gasificador.	90

INTRODUCCIÓN

El carbón es el combustible fósil más abundante en la tierra y se espera que siga siendo una importante fuente de energía durante los próximos 100 años. Aunque su uso en la actualidad se basa en quemarlo directamente para aprovechar la energía química contenida en él. En años recientes se ha intensificado la investigación acerca de la posibilidad de emplearlo como materia prima para la producción de combustibles alternativos, especialmente hidrógeno. La primera forma de uso (quema directa) tiene un efecto más tóxico para la vida en el planeta que la última (producción de combustibles alternativos), se supone que la segunda forma es ambientalmente más limpia.

La conversión del carbón en nuevos combustibles (hidrógeno) hace uso del proceso de gasificación, considerado como una etapa muy importante y que debe controlarse de manera precisa. Además, puede intuirse que es peligrosa por la producción y presencia de gran cantidad de gases inflamables. Esto exige que la instrumentación y el control de tal fase, durante el diseño del proceso de transformación, sea planeado y propuesto identificando la totalidad de los riesgos implicados, lo que indiscutiblemente ayudará a salvaguardar la integridad del personal, de las instalaciones, y tendrá un impacto directo sobre la administración y continuidad del proceso de fabricación una vez que las instalaciones sean puestas en operación.

Aunque se disponen de diferentes procesos de transformación del carbón en hidrógeno y, a su vez, cada uno consta de varias etapas, el análisis de riesgos realizado en este trabajo únicamente abarca la etapa de gasificación para uno de los procesos a elegir. Utilizar el contenido de este proyecto como una guía práctica enfocada a la seguridad industrial, aplicable en el proceso de producción de hidrógeno a partir de carbón mineral.

Para elegir las estrategias de instrumentación, medición y control del proceso que ayuden a reducir los diferentes riesgos presentes en la etapa gasificación del carbón, obteniendo un proceso seguro, es necesario llevar a cabo un estudio exhaustivo sobre la administración y gestión de los mismos. Para satisfacer esta

necesidad, se realiza en este proyecto el Análisis de Riesgos correspondiente a la fase del proceso de interés (la gasificación), aplicando dos métodos de análisis desde el punto de vista de la ingeniería de procesos, siendo ambos métodos cualitativos. Es primordial conocer el proceso de producción de hidrógeno a partir de carbón mineral de manera general, y enfocarse particularmente en la etapa de gasificación, generando la documentación necesaria para cubrir la seguridad de esta etapa.

OBJETIVOS

Para la aplicación de los métodos es necesario contar con un grupo multidisciplinario, el cual debe contar con especialistas en las áreas de procesos, eléctrica, seguridad, construcción, mantenimiento, operación, instrumentación entre otros; así como expertos en la realización y aplicación de las metodologías, el enfoque deberá ser únicamente en el tema del control del proceso de gasificación. Para la realización de los análisis de riesgos que apoyen el diseño de un proceso de gasificación seguro, se aplicarán las metodologías de: ¿Qué pasa si? y Hazard and Operability (HazOp).

Realizar un análisis de riesgos para la etapa de gasificación del proceso de obtención de hidrógeno a partir de carbón mineral, aplicando dos métodos de entre los más utilizados, para disminuir los riesgos presentes y lograr el adecuado control. Una vez realizado los análisis de riesgos, se deberán elaborar los Diagramas de Tubería e Instrumentación (DTI's) acorde a los resultados del análisis de riesgos realizado, mostrando la información que ayude a mantener segura la operación.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1 Carbón.

El carbón, también conocido como carbón mineral, es una roca de tipo sedimentaria, esto quiere decir que acumulan sedimentos y se forman por el desgaste del relieve de la naturaleza por la acción del viento, del agua y de los seres vivos; tiene un particular color negro. Es rico en carbono, aunque no es el único elemento que se encuentra dentro de este mineral, éste posee otra variedad de elementos en menor proporción como son: hidrógeno, azufre, nitrógeno, oxígeno, entre otros.

El carbón mineral es utilizado frecuentemente como combustible fósil, ya que por su composición tiene un alto poder calorífico, el cual se encuentra alrededor de los 4 500 y 8 000 kcal/kg¹, dependiendo del tipo de carbón que se esté manejando. Es considerado como un recurso no renovable.

Existe otro tipo de carbón, el cual es llamado “carbón vegetal”. Como su nombre lo indica es el resultado de la reacción de combustión de residuos vegetales, así como de la madera, ya que estos materiales poseen un alto contenido de carbono; en particular el carbón vegetal posee alrededor de 98 % de este elemento. Es un material sólido, frágil y poroso. El poder calorífico del carbón vegetal, al igual que el de la madera oscila entre 6 200 y 7 200 kcal/kg, dependiendo de la procedencia del carbón.²

1.2 Clasificación del carbón.

El poder calorífico es uno de los principales parámetros particulares del carbón. Se puede definir como la cantidad total de calor desprendida al quemar la unidad de un

¹ Elard, F. León, D. (2006). La importancia del carbón mineral en el desarrollo. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG, 9, p. 92.

² Wolf, Franz, Vogel, Enrique. (enero-junio 1986). Características del carbón vegetal en algunas especies madereras del noreste de México. Revista de Ciencia Forestal, 11, p. 187.

carbón específico en condiciones estándar, esta medida se realiza de forma experimental en el laboratorio mediante un calorímetro.

Los diferentes carbones son clasificados con base en el rendimiento que poseen en determinadas áreas industriales, así como en las distintas aplicaciones de los mismos y, por tanto, para establecer sus precios. Hasta el siglo XIX, las clasificaciones se efectuaban en función de la apariencia visual del carbón, esto quiere decir que se clasificaban en: carbones brillantes, negros, marrones, lampantes de llama corta, de llama larga, etc. El incremento en los usos industriales hizo necesaria una clasificación más detallada, por lo que se han desarrollado numerosos sistemas basados en combinaciones de las características visuales y microscópicas así como de las propiedades físicas y químicas.

La principal clasificación del carbón es con base en el contenido de carbono que contiene en su estructura generando cuatro tipos específicos, los cuales son: turba, lignito, hulla y antracita.

La turba es generada por depósitos de materias vegetales en descomposición; es considerado como el carbón más reciente, posee entre 45 y 60 % de este elemento; al ser un carbón joven es el primer paso en la carbonización natural. El color es relativamente parduzco y cuenta con una estructura porosa lo que le facilita conservar gran cantidad de agua (hasta 90 %); al ser expuesto al aire se contrae, ya que la turba se seca. Este tipo de carbón se forma con ayuda de un musgo llamado esfagnos. Este tipo de musgo se forma en zonas altamente húmedas, y ya que crece en capas en regiones pantanosas da lugares a los yacimientos llamados turberas. En el proceso de formación, las capas inferiores se encuentran en condiciones anaerobias y debido a la ausencia de aire los organismos mueren y paulatinamente generan la turba, la cual es un tipo de carbón de baja calidad con un bajo poder calorífico.

Al pasar del tiempo la turba se transforma en lignito, el cual es un carbón de calidad intermedia, éste cuenta con un porcentaje de carbono más elevado, el cual se sitúa entre 60 y 75 %, es considerado como una turba fosilizada pero con una calidad

superior a esta. Se localiza en terrenos secundarios y terciarios. El lignito es de textura terrosa llamada tierra de sombra; aunque existe otra variedad la cual es más compacta utilizada en la industria de la joyería por su gran capacidad de ser pulida, esta variedad se conoce como azabache de color negro.

La hulla es un carbón negro y brillante, el cual cuenta con un alto nivel de carbono, oscilando entre 80 y 90 % de este elemento; asimismo cuenta con entre 3 y 20 % de oxígeno, al igual cuenta con entre 1 y 5 % de Hidrógeno. Se formó en la era Carbonífera a partir de flora típica de esta época como helechos arborescentes o equisetos. De este tipo de carbón se obtiene por medio de la destilación seca productos volátiles, alquitranes y amoniaco; en forma seca se utiliza como combustible por su alto poder calorífico.

Por último la antracita es un carbón de alta calidad cuenta con 95 % de carbono, tiene un alto poder calorífico. Su formación data del periodo temprano de la era Paleozoica. Arde con mucha dificultad, pero una vez que ha encendido desprende mucho calor. Es más brillante que la hulla y cuenta con una fractura concoidea.³

No todo el carbón es igual, por lo tanto no todo puede englobarse en una sola clasificación. La mayoría de los países productores de carbón tienen su propia clasificación, sin embargo para el comercio internacional la clasificación de la American Society for Testing and Materials (A.S.T.M.) es la más utilizada. Esta norma define como carbones de bajo rango aquellos cuyo poder calorífico bruto, base húmeda sea menor a 6 390 kcal/kg, en este rango están los carbones denominados sub bituminosos y los lignitos, estos carbones de rangos inferiores se clasifican en función del poder calorífico con base húmeda, exenta de cenizas. En los carbones de alto rango, con un poder calorífico mayor a 6 390 kcal/kg, se incluyen los carbones bituminosos⁴ y antracitas, en esta clasificación de carbones de rangos más elevados se especifican con base en carbono fijo (para volátiles

³ Coordinación General de Minería. (2014). Perfil de mercado del carbón. México. Secretaría de Economía. p.p. 2-3

⁴ Véase infra, cap. 3

≤31%) con base seca, exenta de cenizas. Se produce un cierto solapamiento entre lo carbones de tipo bituminosos y sub-bituminosos, que se resuelve sobre la base de las propiedades aglomerantes.

Tabla 1.1. Norma ASTM D 388- 82. Clasificación de carbones minerales por rango.⁵

Tipo	Clase	Carbón fijo %	Materiales volátiles %	Poder calorífico (BTU/lb)	Carácter aglomerante	
I. Antracita	1. Meta antracita	/98	≤ 2		Carbones no aglomerantes	
	2. Antracita	92 - 98	2 – 8			
	3. Semi antracita	86 - 92	8 – 14			
II. Bituminoso	1. Bajo Volátil	78 - 86	14 – 22		13 000 - 14 000	Carbones aglomerantes
	2. Medio Volátil	69 - 78	22 – 31			
	3. Alto Volátil A	<69	>31	11 500 - 13 000		
	4. Alto Volátil B			10 500 - 11 500		
	5. Alto Volátil C					
III. Sub Bituminoso	1. Clase A			10 500 - 11 500	Carbones no aglomerantes	
	2. Clase B			9 500 - 10 500		
	3. Clase C			8 300 - 9 500		
IV. Lignítico	1. Lignito A			6 300 - 8 300		
	2. Lignito B			<6 300		

Otras características a evaluar del carbón para generar otra clasificación son:

- Humedad.
- Porcentaje de cenizas.
- Poder calorífico.
- Inflamabilidad, relacionado al porcentaje de elementos volátiles.

La humedad de los combustibles es sumamente variable, debido a que cada uno requiere distintas condiciones de extracción y acondicionamiento, asimismo depende del tiempo que ha sido expuesto a las condiciones atmosféricas. En el caso particular del carbón, el combustible alcanza una humedad determinada al ser expuesto al ambiente ya que alcanza un equilibrio con la temperatura y la humedad

⁵ Elard, F. León, D. art. cit., p.96.

del medio, a este equilibrio se le conoce como *humedad de equilibrio* o *humedad estándar*.

Las cenizas se pueden definir como la “calidad del carbón”; en otras palabras, es la parte incombustible presente en el carbón. La relación de calidad del carbón es inversa al contenido de cenizas, por lo que a mayor contenido de cenizas, menos será el poder calorífico del carbón en su forma bruta. Las cenizas pueden generar problemas en los equipos en donde se emplee el combustible, generando taponamientos, incrustaciones o desgaste de los dispositivos.

Por último, la relación de porcentaje de elementos volátiles es la propiedad que posee cada uno de los diferentes tipos de carbón proporcionando una indicación de su reactividad y de la facilidad de ignición del mismo. Cuando el contenido de volátiles es alto puede generar problemas en el acondicionamiento de la materia, ya que en la molienda puede generar igniciones espontáneas.

1.3 Usos del carbón.

A lo largo de la historia se ha aprovechado la energía calorífica generada por la reacción de combustión del carbón. En China hace aproximadamente 2 000 años se comenzó a utilizar el carbón mineral como combustible. Los romanos continuaron con el aprovechamiento de este mineral. No fue sino hasta el siglo XIII cuando los ingleses comenzaron a aprovechar la energía térmica del carbón, utilizándolo para generar calor. En el siglo XVI, durante la época del reinado de Isabel I, se utilizaba ampliamente en las ciudades inglesas, ya que la explotación de las minas este combustible adquirió un fuerte impacto. Aunque el auge surge a finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX durante la Revolución Industrial, siendo el carbón el principal protagonista en la generación de energía, la Máquina de Vapor inventada por James Watt es el claro ejemplo de la importancia que adquirió en el transcurso de este periodo histórico.

Para el siglo XX, el carbón desplazó en su totalidad a la madera como combustible. Asimismo, en la época de la postguerra (mediados del siglo XX) el petróleo y sus

derivados sustituyeron, aunque de forma parcial, el uso del carbón como principal combustible a nivel mundial. Sin embargo, hasta la fecha se continúa empleando el mineral como generador de energía. Asimismo y a diferencia del crudo, el uso del carbón es difícil que desaparezca debido a la cantidad del mineral que hay en las reservas a nivel mundial ya que son sumamente grandes, asegurando una disponibilidad en el futuro; otra razón es la fácil obtención y almacenamiento del producto.

Actualmente, las reservas de carbón a nivel mundial ascienden alrededor de los 860 900 millones de toneladas, de los cuales 405 mil millones (47%) están clasificados como carbón bituminoso (incluida antracita), 260 mil millones (30%) como sub-bituminosos y 195 mil millones (23%) como lignito⁶. Como se comentó anteriormente, se debe tener en cuenta que a veces resulta difícil establecer distinciones entre las categorías del carbón, por lo que el desglose de una región en particular debería considerarse simplemente como indicativo. Estas reservas, se encuentran distribuidas principalmente en los siguientes países:

Tabla 1.2. Reservas probadas de carbón a nivel mundial⁷

No.	País	Reservas de carbón (millones de toneladas)
1	Estados Unidos	245 271
2	Rusia	157 010
3	China	114 500
4	Australia	76 400
5	India	60 600
6	Alemania	40 699
7	Ucrania	33 873
8	Kazajistán	33 600
9	Sudáfrica	30 156
10	Serbia	13 770
25	México	1 211

⁶ Gadonneix, P. Barnés de Castro, F. et. al. (2010). 2010 Survey of Energy Resources . Reino Unido: World Energy Council, p.p. 1-2.

⁷ Ibid, p.p. 10 a 12.

Asimismo, se puede observar que México ocupa el lugar número 25 en la cantidad de reservas de carbón a nivel mundial.

En México el principal estado que explota este recurso es Coahuila, aportando la mayor cantidad de carbón obtenido a nivel nacional proporcionando 7.2 millones de toneladas al año⁸, seguidos por Sonora, Chihuahua, Tamaulipas, Nuevo León, Hidalgo Veracruz, Oaxaca y Guerrero⁹.

En la actualidad y a pesar del desplazamiento que tuvo por el uso de los derivados del petróleo cuenta con un amplio uso dentro de la industria. Las aplicaciones en las cuales encontramos el uso del carbón son:

- Como combustible.
- Carbón para líquidos.
- Industria siderúrgica.
- Sintetización.
- Industria cementera.
- Productos químicos.
- Productos especializados.

El carbón como combustible se encuentra principalmente en las centrales térmicas de carbón pulverizado, estas generan la mayor cantidad de energía eléctrica a nivel mundial. Debido a la alta generación de contaminantes, se ha desarrollado otro tipo de centrales que a su vez tratan de aumentar el rendimiento y reducir la emisión de contaminantes, éstas son las centrales de lecho fluidizado a presión. Otra tecnología que actualmente se encuentra en auge es la de ciclos combinados, también conocido como sistemas de cogeneración (generar dos tipos de energía a partir de uno), empleando lo que se conoce como gas de síntesis (SynGas) generado a partir

⁸ Cantú Suárez, M. Ibarra Palafox, C. et. al. (2016). Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, 2015. México: Servicio Geológico Mexicano. p. 59.

⁹ Coordinación General de Minería. op. cit. passim 6 – 14.

del proceso de gasificación del carbón¹⁰. Por último, el uso del coque, producto de la reacción de pirólisis del carbón en ausencia de aire, se utiliza como reductor o como combustible principalmente en altos hornos.

El carbón para líquidos puede ser convertido fácilmente en una variedad de combustibles, con algunas ventajas que son clave, como puede ser la captura y almacenamiento del Carbón, esto ayudaría a reducir en un 20 % el ciclo de vida de las emisiones de Dióxido de Carbono, comparándolo con los productos convencionales del petróleo; otra ventaja es que los combustibles derivados del carbón se encuentran libres de Azufre, a su vez, son bajos en óxidos de Nitrógeno. Para finalizar, pueden ser utilizados para transporte, generación de energía estacionaria y en la industria química.

En la industria siderúrgica el carbón es utilizado para realizar aleaciones de Hierro enriquecido en Carbón; al mezclar ambos minerales se obtiene un material que posee mayor resistencia y elasticidad.

En el área de sintetización, el proceso requiere de un calentamiento de mineral de Fierro fino, así como finos de carbón para producir una masa parcialmente fundida que al solidificar genera piezas porosas de sintetizado con las características necesarias en cuestión de tamaño y resistencia para alimentar los altos hornos.

En la industria cementera los productos de combustión de carbón poseen una relación importante debido a que es necesario en la producción de hormigón. La reacción de combustión que se lleva a cabo en las centrales eléctricas genera subproductos como cenizas, escoria de calderas y gases de combustión en la desulfuración del yeso.

Para la fabricación de productos químicos se utiliza alquitrán de carbón refinado. A partir de este alquitrán se pueden obtener: aceite de creosota, Naftaleno, Benceno y Fenol. A su vez, el gas de Amonio recuperado en los hornos de coque es utilizado

¹⁰ Véase infra, cap. 3.

para la fabricación de sales de Amoniaco, abonos agrícolas y Ácido Nítrico. No solamente podemos observar la presencia de carbón o subproductos de carbón en reactivos especializados como los anteriormente citados, también podemos encontrarlos en productos con los cuales estamos completamente familiarizados y que forman parte de nuestra vida diaria, tal es el caso del jabón, tintes, disolventes, fibras sintéticas, o incluso fármacos como la Aspirina.

Por último, el carbón es uno de los principales ingredientes de productos especializados. Lo encontramos en forma de carbón activado en filtros de agua y aire, o en máquinas de diálisis renal. Otro de los productos especializados es la fibra de carbono, la cual es un material extremadamente fuerte que se utiliza en la fabricación de automóviles, bicicletas, raquetas de tenis, etc.¹¹

Como se puede observar, el uso del carbón se encuentra presente en nuestro día a día, desde productos básicos hasta otros especializados; asimismo sigue siendo una excelente fuente de generación de energía. Por lo que sigue y seguirá siendo un recurso altamente utilizado y explotado a nivel mundial.

1.4 Proceso de Producción.

La explotación y producción del carbón son procesos relativamente sencillos, consiste de dos tipos de minado (superficial y subterráneo), preparación de la materia prima y, por último, el transporte.

El minado superficial se practica cuando el carbón se localiza cerca de la superficie, haciéndolo rentable. En este tipo de mina, a diferencia del minado subterráneo, se recupera una porción mayor de los depósitos del mineral, debido a que es prácticamente explotado en su totalidad (se puede recuperar de 90 % en adelante del carbón sustraído). Las minas de cielo abierto cubren una gran extensión de tierra; utiliza equipo de gran tamaño como excavadoras, camiones, palas mecánicas, etc. las cuales sirven para remover y transportar la capa estéril del

¹¹ Coordinación General de Minería. op. cit. p.p. 19-20.

suelo, así como la roca. Por medio de explosiones es fracturada la capa estéril de suelo y roca, a continuación es removida por excavadoras y camiones; al momento en el que el carbón resulta expuesto es minado. Al ser extraído se cargan los camiones con el carbón directamente al lugar en el que será utilizado, o es enviado por medio de bandas transportadoras a la planta de acondicionamiento de la materia prima.

En minado subterráneo se realiza la extracción de una sección por medio de cortadoras mecánicas. Para realizar este tipo de minado es necesario realizar un estudio detallado de la geografía del terreno previo a la explotación. El frente puede variar de longitud dependiendo de la mina, éstas pueden ser de gran o pequeña escala. En el caso de grandes minas, aseguran el techo mediante el uso de gatos hidráulicos y traveses, por su parte, en el caso de pequeñas minas, con ademas de madera, propiciando que la extracción se lleve a cabo de manera segura para los trabajadores mientras se realiza la extracción del carbón. Una vez concluido el trabajo, el techo colapsa debido a la intervención humana en la mina.

La preparación del carbón sirve para acondicionar la materia, esto sirve para garantizar la calidad y mejorar el estado del producto. El tratamiento puede ser desde una trituración para reducir el tamaño de partícula sin importar la pureza del carbón, hasta la purificación por medio de complejos tratamientos para reducir impurezas, el acondicionamiento depende directamente de las propiedades y el uso que se le pretenda dar al carbón. Para eliminar las impurezas, el carbón procedente de las minas es inicialmente triturado, lo que hace variar el tamaño de las partículas; las partículas de gran tamaño son tratadas en tanques que contiene un líquido de mayor peso específico, generalmente es una suspensión de magnetita molida finamente, el carbón al ser menos denso flota, mientras que las rocas e impurezas más pesadas se hunden siendo removidas como residuo. A este método de separación se le conoce como "separación en medio denso". Las partículas de menor tamaño son tratadas de distintas maneras, una de ellas es mediante el aprovechamiento de la diferencia de masas, por ejemplo el uso de la centrifugación, separando el medio líquido de la parte sólida. Otro método de separación es

mediante agentes espumantes, aprovechando las propiedades superficiales del carbón junto con el de los residuos, esto quiere decir que el carbón es separado mediante espuma generada por un agente químico producida por aire en agua. Las burbujas atraen el carbón fino pero no las impurezas, propiciando la separación.

El transporte de carbón es sencillo y depende de la distancia. Para distancias cortas puede realizarse mediante el uso de bandas transportadoras o camiones. Para recorrer distancias más largas se puede transportar a través de trenes, barcos o buques, estos últimos son ampliamente usados para el transporte internacional de carbón. Una forma especial de transporte es mediante ductos, esto es posible realizando una suspensión del carbón en agua conocido como "lechada".¹²

1.5 Marco normativo y normalización

En México, en el artículo 4to de la Ley Minera queda especificado que se sujetarán a este apartado legal, entre otros, el carbón mineral así como todas sus variedades. Asimismo existe normatividad tanto nacional como internacional encargada de regular todos los aspectos de la extracción y producción de carbón. Estas normatividades son:

- Normas Nacionales:

Tabla 1.3. Normatividad Nacional relacionada al carbón¹³

Clave	Título
NOM-032-STPS-2008	Seguridad para minas subterráneas de carbón
NMX-B-005-1982	Prueba de desquebrajamiento por caída para carbón
NMX-B-016-1982	Análisis de las cenizas de carbón y coque
NMX-B-020-1982	Prueba de tambor para carbón
NMX-B-021-1982	Determinación de las formas de azufre en el carbón
NMX-B-030-1984	Industria siderúrgica - carbón y coque - valor calorífico total de combustible sólido-bomba calorimétrica adiabática-método de prueba
NMX-B-036-1981	Definiciones relativas al carbón y coque

¹² Ibid, p.p. 15 a 17.

¹³ Ibid, p.p. 20 y 21.

NMX-B-043-1984	Industria siderúrgica - carbón y coque - elementos traza en las cenizas por espectrofotometría de absorción atómica - método de prueba
NMX-B-044-1984	Industria siderúrgica - carbón -propiedades plásticas por medio del plastómetro de torque constante de giesler - método de prueba
NMX-B-045-1984	Industria siderúrgica - carbón y coque - elementos mayores y menores, por absorción atómica - método de prueba
NMX-B-047-1984	Industria siderúrgica - muestras de carbón para análisis microscópico por luz reflejada
NMX-B-125-1981	Análisis aproximado de carbón y coque
NMX-B-135-1981	Análisis granulométrico de carbón
NMX-B-152-1981	Carbón - análisis de laboratorio - preparación de muestras
NMX-B-153-1981	Carbón - muestra a granel - métodos de selección
NMX-B-154-1981	Método para determinar la humedad en las muestras de carbón y coque
NMX-B-157-1982	Método para determinar las cenizas en las muestras de carbón y coque
NMX-B-158-1982	Métodos para determinar el azufre total en la muestra de carbón y coque
NMX-B-159-1982	Designación del tamaño de carbón de acuerdo a su análisis granulométrico
NMX-B-160-1981	Muestreo y pruebas de finura de carbón pulverizado
NMX-B-161-1982	Determinación de la humedad total en el carbón
NMX-B-162-1982	Determinación de la materia volátil en la muestra de carbón y coque
NMX-B-163-1982	Cálculo del carbón y coque analizados para diferentes bases
NMX-B-164-1982	Método para determinar el análisis último de carbón y coque
NMX-B-165-1982	Determinación del nitrógeno en el análisis de la muestra de carbón y coque
NMX-B-168-1982	Métodos para determinar el carbono e hidrógeno en la muestra de carbón y coque

- Normas Internacionales:

Tabla 1.4. Normatividad Internacional relacionada al carbón¹⁴

Clave	Título
D388-05	Clasificación de carbones por rango
D4596-08	Recolección de muestras de canal de carbón en mina
D5192-08	Recolección de muestras de carbón en núcleo
D2014-97 (2010)	Método de prueba para la expansión o contracción de carbón por horno
D2639-08	Método de prueba propiedades plásticas de carbón por medio del plastómetro de torque constante de giesler
D5263-93 (2008)	Método de prueba para determinar el grado relativo de oxidación en carbón bituminoso por extracción de álcali
D5515-97 (2004)e2	Método de prueba para la determinación de las propiedades de hinchazón de carbón bituminoso utilizando un dilatómetro
D2798-06	Determinación microscópica de la reflectancia de vitrinita de carbón
D2799-05a	Determinación microscópica de composición maceral del carbón
D121-09	Terminología de carbón y coque
D1412-07	Método de prueba para el equilibrio de humedad de carbón de 96 a 97 % de humedad relativa y 30°C
D1857-04	Método de prueba para fusibilidad de carbón y ceniza de coque
D2361-02	Método de prueba de cloro en carbón
D2492-02 (2012)	Método de prueba para las formas de azufre en carbón
D2961-02 (2007)	Método de prueba para humedad total en una etapa simple menor al 15% en carbón reducido a 2.36 mm (Malla N ° 8)
D3173-03 (2008)	Método de prueba para la humedad en el análisis de muestra de carbón y coque
D3174-04	Método de prueba para la ceniza en análisis de muestra de carbón y coque de carbón
D3175-07	Método de prueba de materia volátil en el análisis de muestras de carbón y coque
D3179-02e1	Métodos de ensayo de nitrógeno en el análisis de muestras de carbón y coque
D3180-07	Práctica para el cálculo del carbón y análisis de coque a partir de arsénico-Determinada por diferentes bases

¹⁴ Ibid, p.p. 22 y 23.

D3302-07ae1	Método de prueba para humedad total en carbón
D4208-02 (2007)	Método de prueba para el cloro total en carbón por combustión de bomba de oxígeno/Método de electrodo de ion selectivo
D4239-08	Métodos de ensayo para azufre en análisis de Muestra de carbón y coque usando métodos de horno de combustión de alta temperatura
D5142-09	Métodos de ensayo para análisis proximal de análisis de muestra de carbón y coque por procedimientos instrumentales
D5373-08	Métodos de ensayo para determinación instrumental de carbono, hidrógeno y nitrógeno en muestras de carbón de laboratorio
D5865-07a	Método de prueba para valor calorífico bruto de carbón y coque

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de Análisis de riesgos

En la industria, el manejo de sustancias peligrosas, así como las condiciones de operación en las plantas (presencia altas presiones y alta temperatura) puede suscitar en algún tipo de accidente, el cual puede relacionarse con fugas, derrames, entre otros, poniendo en peligro al personal, al equipo, a la producción o a la misma comunidad en donde se localiza la planta, sin mencionar que este tipo de accidentes pueden ocasionar daños al medio ambiente. Los accidentes en la industria raramente son provocados por un solo detonante, la causa más frecuente es una combinación de eventos que a primera vista pueden considerarse independientes, pero repercuten en un desastre. Es necesario determinar y analizar las medidas que prevengan la ocurrencia de estos eventos, y determinar acciones que mitiguen las posibles consecuencias de los accidentes, para lo cual es sumamente necesario realizar un análisis de riesgos.

Los análisis de riesgos tienen como función identificar, analizar, evaluar y jerarquizar los riesgos que se presentan en algún determinado proceso. Tomando en cuenta la probabilidad que el evento no deseado ocurra, y las posibles consecuencias que conlleva el suceso. Una vez identificados estos disturbios se proponen medidas correctivas y preventivas que ayuden a administrar estos peligros reduciendo significativamente las posibles consecuencias y la probabilidad de que ocurra un suceso desastroso, provocando que el desempeño de la planta se encuentre dentro de niveles de riesgos tolerables. Los métodos de análisis de riesgos requieren un estudio de costo-beneficio, el cual ayuda a integrar mejoras de seguridad a los procesos.

Los usos prácticos de las metodologías de análisis de riesgos son muy variados y son capaces de aplicarse en cualquier nivel de la ingeniería de un proyecto, desde la ingeniería básica hasta el desmantelamiento de una planta, concluyendo así la

vida útil de la misma; es aplicable en la investigación y desarrollo de nuevos procesos, en el diseño conceptual, en la operación de plantas piloto, en la ingeniería de detalle, así como en la construcción, arranque y operación de las plantas y complejos industriales. A su vez, es aplicable en la modificación y optimización de procesos existentes, ya que esto conlleva a nuevos peligros dentro de las instalaciones para el personal, equipo y productos. En cualquier etapa de la administración de un proyecto, se investigan todos los posibles incidentes y accidentes relacionados con alguna etapa en específico. Asimismo, durante la etapa de la ingeniería de diseño de nuevos proyectos, los análisis de riesgos de proceso se consideran como un instrumento de alcance preventivo, que permiten integrar estos proyectos a la cadena productiva de forma segura y bajo niveles de riesgo tolerables¹⁵.

2.2 Sistemas integrados de seguridad (SIS)

Los accidentes industriales en raras ocasiones suelen suceder por un solo evento; normalmente son una consecuencia de una combinación de sucesos poco comunes que se piensa son independientes y que no deberían suceder al mismo tiempo. Por ello es necesario disponer de un sistema instrumentado de seguridad (SIS) que se encargue de reducir considerablemente el riesgo presente constantemente en la industria de procesos.

En muchas industrias se ha reemplazado al personal por sistemas automatizados para aumentar considerablemente la producción, en la mayoría de los casos no se considera el nivel de seguridad que se debe mantener al implementar una automatización, como consecuencia puede desencadenar una catástrofe a gran escala. Las situaciones de peligro deben anticiparse, asimismo deben prevenirse ya que estos sucesos pueden generar un potencial daño sobre el personal, bienes materiales, afectaciones al medio ambiente y producción debido a eventos provocados en las instalaciones.

¹⁵ Ragasol Barbey, Víctor. (2012). Guía técnica para realizar Análisis de riesgos de procesos. México: PEMEX. p.p. 3

La seguridad industrial se ha acotado a la seguridad ocupacional, esto quiere decir que se busca la protección, seguridad, salud y bienestar del personal involucrado en el trabajo, los programas de seguridad e higiene industrial buscan fomentar un ambiente de trabajo seguro y saludable; mientras que la seguridad funcional pasa a segundo plano. La seguridad funcional cubre una amplia gama de dispositivos permitiendo formar sistemas de seguridad que involucran a todo el proceso, llevando a un estado seguro el proceso.

Implementar medidas de seguridad funcional genera algunas ventajas, las cuales son:

- Garantizar que la decisión de reducción de riesgo se basa en el análisis y no en la percepción.
- Prevenir los eventos antes de que ocurran, para así poder evitar lesiones y salvar vidas.
- Alcanzar el desarrollo sostenible.
- Reducir la pérdida de producción.

Muchos de los accidentes industriales pudieron evitarse si dentro de sus parámetros de seguridad, se hubieran implementado los sistemas instrumentados de seguridad. Desgraciadamente, la seguridad funcional no se aplica en un amplio número de industrias provocando que el riesgo aumente, esto fomenta que el entorno de trabajo no sea seguro.¹⁶

Un SIS es un sistema cuya función es implementar las funciones de seguridad necesarias para llevar tanto a la planta como a un proceso específico a niveles seguros de operación en caso de presentarse una falla causada por un evento de riesgo o cuando no presenten desviaciones las condiciones de funcionamiento de una variable.¹⁷

¹⁶ Venegas Riera, K., & Barreto Jijón, R. (2013). La seguridad funcional en la industria de procesos (Maestría). Universidad Politécnica Salesiana. p.p. 1,2

¹⁷ Ibid. p.p. 4

2.3 Modos de fallas.

La principal preocupación para un sistema integrado de seguridad es como puede fallar el sistema y no como opera. Para esto, se cataloga las fallas en cuatro tipos: fallas seguras, fallas peligrosas, fallas detectadas / no detectadas y fallas sin efecto.

- Fallas seguras.

Reciben muchos nombres, por ejemplo, fallas reveladas, fallas descubiertas y fallas de inicio. El término utilizado en los estándares es “falla segura”. Las fallas seguras tienden a ser muy costosas en términos de paros innecesarias en la producción. Cuando un sistema tiene demasiadas fallas seguras provoca que el personal desconfíe de ellos.¹⁸

- Fallas peligrosas.

Son aquellas en las que el sistema no responde ante una demanda real, dichas fallas pueden denominarse fallas ocultas, fallas cubiertas o fallas inhibitoras. Los estándares se refieren a este tipo de fallas como “fallas peligrosas”.¹⁹

- Fallas detectadas / no detectadas.

Las fallas peligrosas son clasificadas como fallas peligrosas no detectadas (Dangerous Undetected, DU) y fallas peligrosas detectadas (Dangerous Detected, DD). Las fallas detectadas están relacionadas con diagnósticos automáticos (el sistema detecta por sí solo cuando se da una falla). Las fallas seguras reciben la misma clasificación.²⁰

¹⁸ Ibid. p. 5

¹⁹ Ídem.

²⁰ Ídem.

- Fallas sin efecto.

Se denomina a la falla de un componente que es parte de la función de seguridad pero que no tiene efecto en la misma.²¹

2.4 Capas de protección.

En los procesos, implementar una sola medida de seguridad no reduce por sí misma los niveles de riesgo a un rango tolerable, tampoco protege al personal ni a la planta contra daños, a su vez no mitiga la propagación de estos daños en caso de que se suscite un incidente peligroso. Debido a esto, es necesario implementar una serie de medidas de seguridad, dispuestas como capas protectoras; éstas son una secuencia de dispositivos mecánicos, controles de proceso, sistemas de parada y medidas de respuesta externas que previenen o mitigan un evento peligroso. Esta propuesta de capas se encuentra dispuesta en caso de falla, ya que si una de ellas llegara a colapsar, la siguiente capa llevará al proceso a un estado seguro de operación. A medida que las capas son más confiables, y, a su vez, aumenta el número de capas de protección, la seguridad del proceso aumenta. Las capas de protección se dividen en dos grandes áreas; y cada una cuenta con respectivas subdivisiones, estas dos ramas son, en primer lugar, la capa de prevención; y, en segundo lugar, se presenta la capa de mitigación, en donde se espera una respuesta a mayor escala.

2.4.1 Capas de prevención.

Esta primera etapa de protección se encarga de actuar en la inmediatez del problema, esto quiere decir que son las primeras capas de protección de los procesos; prevén que un evento no deseado alcance consecuencias fatales. Cuenta con cinco subdivisiones, las cuales ayudan a mitigar un posible percance, estas primeras capas son: el proceso, sistemas de control básico de proceso, alarmas y la intervención del operador, los sistemas integrados de seguridad y, por último, se

²¹ Ídem.

encuentran los dispositivos de alivio. Podrían considerarse capas a pequeña escala, debido a que son medidas de diseño y operación de la planta.

- Proceso.

El proceso por sí mismo debe ser intrínsecamente seguro, de lo contrario podría estar en riesgo el bienestar del operador. Aunque parezca algo obvio, en muchas ocasiones no se repara en el hecho de que el proceso es la primera capa de seguridad de la planta.²²

- Sistema de Control Básico de Procesos (BPCS).

Brinda seguridad a través del diseño apropiado de los controles de proceso. Consiste en controles básicos, alarmas y supervisión del operador.²³

- Alarmas, Intervención del Operador.

A diferencia de las alarmas anteriormente mencionadas, las empleadas en esta capa, son alarmas críticas que alertan a los operadores acerca de una condición en la cual una medición ha excedido sus límites especificados, esto quiere decir que las condiciones de operación se encuentran fuera de la ventana operativa del proceso, ya sea en el límite superior o en el inferior de las condiciones de operación. Esto podría llevar a requerir intervención del operador.²⁴

- Sistema Instrumentado de Seguridad.

El sistema instrumentado de seguridad opera independientemente del sistema de control básico del proceso para brindar seguridad. Realiza acciones de parada cuando las capas previas no pueden resolver una emergencia.²⁵

²² Ibid. p. 7

²³ Ídem.

²⁴ Ídem.

²⁵ Ídem.

- Dispositivos de alivio.

Emplea válvulas, dispositivos de alivio de presión o un sistema de antorcha (si hay presencia de combustibles) para impedir una ruptura, derrame u otro escape no controlado.²⁶

2.4.2 Capas de mitigación

Estas segundas capas de protección actúan a mayor escala. Asimismo, no se activan a menos de que no sean suficientes las cinco subcapas de la capa de prevención y éstas fallen. Para esto se debe estar preparado para actuar en mayores dimensiones, por lo que esta capa de mitigación cuenta con tres subdivisiones, éstas son: protección física, respuesta de la planta y la respuesta de la misma comunidad.

- Protección física.

Es considerada una capa de protección pasiva. Hace referencia a la infraestructura física de la planta que se encarga de contener derrames que pudieran darse.²⁷

- Respuesta de la planta.

Al igual que la protección física, es una capa pasiva de protección. Consiste en barreras de contención contra fuego, o explosiones, rociadores, extintores, entre otras medidas, como implementar procedimientos para la correcta y pronta evacuación de las instalaciones.²⁸

- Respuesta de la comunidad.

Este es el nivel final de protección. Las plantas cuentan con sistemas internos de mitigación de sucesos, aunque algunas veces estos no son suficientes y es necesaria la intervención de ayuda externa a la planta. En este nivel actúan

²⁶ Ibid. p.8

²⁷ Ídem.

²⁸ Ídem.

bomberos y otros servicios de emergencia de la población cercana, los cuales se deben encontrar a una distancia corta de las plantas y deben estar listos a actuar para evitar cualquier tragedia tanto dentro como fuera de la planta, ya que un accidente a gran escala puede afectar a una comunidad aledaña.²⁹

2.5 Anatomía de un incidente.

Los incidentes poseen cierta estructura la cual debe ser perfectamente identificada para reducir el riesgo. Todos tienen una serie de etapas bien definidas, las cuales son: peligro, causa, desviación, consecuencia e impacto.

- Peligro.

El peligro siempre se encuentra presente en el proceso mismo, esto quiere decir que todo el material y la energía empleados y contenidos dentro de la operación normal de la planta significan un peligro tanto para el operador, como para sí mismo. Algunos de los peligros presentes pueden ser la toxicidad, la reactividad, la inflamabilidad o el uso de altas presiones o alta temperatura.

- Causa.

Las causas son los eventos iniciadores de los incidentes; estos dan inicio a una serie de secuencia de eventos que pueden llegar a ser catastróficos. Las causas pueden ser variadas, desde impurezas en las materias primas, hasta fallas mecánicas, errores en el procedimiento de acción; o incluso fuerzas externas a la planta.

- Desviación.

La desviación surge cuando los límites tanto de diseño como de operación son superados, el proceso se encuentra fuera de la ventana operativa provocando fallas catastróficas. En este punto, las variables se ven afectadas, esto quiere decir que puede existir la ausencia de flujo, la temperatura puede elevarse súbitamente;

²⁹ Ídem.

asimismo puede surgir por la omisión de alguna etapa en el proceso, o incluso la introducción de algún material equivocado. Las desviaciones pueden ser provocadas por errores humanos o por algún malfuncionamiento en el equipo.

- Consecuencia.

Las consecuencias son todas las afectaciones generadas por las desviaciones, esto implica que el proceso se sale de control generando pérdidas en el material utilizado o en la energía requerida para el correcto funcionamiento del proceso. En esta etapa, se puede observar la presencia de fuego, derrame de materiales peligrosos, deformación de los equipos, e incluso explosiones.

- Impacto.

El impacto analiza los efectos de las consecuencias, evaluando las pérdidas humanas, económicas y ambientales. A su vez, también se considera dentro del impacto el tiempo que se interrumpe la producción por motivos de reparación.

2.6 Salvaguardas.

La aplicación de salvaguardas ayudan a mantener los procesos operando de manera segura; y sirven para evitar y/o controlar que los incidentes alcancen niveles catastróficos. Sin embargo, incluso con la aplicación de ellas, no se está exento de los peligros; aunque sí ayudan a reducir el riesgo. Existen cuatro tipos de salvaguardas, las cuales aplican en diferentes etapas de los incidentes, aunque todas deben ser aplicadas, éstas son: prevención, control, protección y mitigación.

- Prevención.

La prevención se ocupa de mantener la integridad mecánica del proceso, aplicando un correcto mantenimiento tanto predictivo, como preventivo al equipo. Por otro lado, también debe considerarse la capacitación y el entrenamiento al personal que opera la planta, para así, reducir los errores provocados por factores humanos.

Podría considerarse como la primera salvaguarda, ya que actúa en la inmediatez del problema.

- Control.

El control implica, en primer lugar, la automatización del proceso por medio de sistemas de control automático del proceso, generando con esto la disminución del factor humano. El control, también genera manuales de control, relevos en-línea y propone sistemas de respaldo.

- Protección.

La protección es sumamente importante para informar de los sucesos que se encuentran afectando al proceso. En estas salvaguardas se propone la instalación de alarmas, así como los paros de emergencia dentro de la planta, disparos, interlocks, relevos de emergencia, controles de último recurso, control de la fuente de ignición. Sin embargo, en la protección no solamente se encuentran los sistemas automatizados, también se encuentra la intervención de los operadores, por lo que no se puede desechar la intrusión humana.

- Mitigación.

La mitigación contempla todas las respuestas de emergencia e instalaciones de seguridad en la planta, esto quiere decir que observa la instalación de rociadores, sistemas de inundación, cortinas de agua, entre otros. Otro tipo de medios de mitigación son los construidos para contener derrames, como diques y trincheras. Por último, se deben tomar en cuenta que las explosiones son inherentes, por lo que se debe de contar con barricadas y muros contra explosiones. Asimismo, se debe considerar la protección del personal, éstos deben contar con el equipo de seguridad adecuado.

2.7 Análisis de riesgos.

El riesgo está presente en toda actividad humana. Este se encuentra relacionado con la salud del personal, la integridad del negocio y con el medio ambiente, esto implica que el impacto de los riesgos está ligado a las lesiones a corto, mediano o largo plazo, muertes, afectaciones a la comunidad, daños a los equipos, afectaciones a la línea de producción, etcétera. El objetivo de realizar análisis de riesgos es identificar todos los potenciales peligros y los riesgos para, así proponer una serie de recomendaciones que permitan controlar debidamente los procesos, así como prevenir accidentes, aminorar las consecuencias para evitar decesos, daños a la salud, a la propiedad, instalaciones, a la producción y medio ambiente.³⁰

Es importante no confundir los conceptos de peligro y de riesgo ya que son términos, aunque relacionados, distintos; por una parte, es toda condición física o química que tiene el potencial de causar daño al personal, a las instalaciones o al ambiente; dicho de otra forma, el peligro se encuentra presente en cualquier actividad y éste es observable. Por otro lado, el riesgo son todos los peligros a los que se expone el personal; asimismo, es la combinación de la probabilidad de que ocurra un accidente y sus consecuencias. En otras palabras, el riesgo es calculable y se puede reducir, mientras que el peligro únicamente es observable. Sin embargo, el riesgo “cero” no existe, puede disminuir considerablemente, pero no puede desaparecer.

El análisis de riesgos es empleado para:

- Identificar todos los potenciales peligros y riesgos, para así proponer estrategias para su correcto funcionamiento, manejo y control del proceso.
- Proporcionar información puntual para la adecuada toma de decisiones.
- Cumplir con todos los requisitos tanto legales como normativos.³¹

³⁰ Ragasol Barbey, Victor. op. cit. p. 8

³¹ Ídem.

Los resultados arrojados por los análisis de riesgos son utilizados para valorar el nivel de tolerabilidad del riesgo, así como para la toma de decisiones en cuanto a seleccionar las mejores opciones para su administración y control. Algunos otros beneficios del análisis de riesgos son:

- Permite la identificación sistemática de los peligros potenciales que rodean a los procesos.
- Ayuda a la identificación sistemática de los modos de fallas de los sistemas, así como los componentes y equipos.
- Realiza una evaluación cuantitativa de los riesgos o, de ser el caso, propone una estimación del rango de los riesgos.
- Evalúa las posibles modificaciones en las instalaciones, así como en el proceso o en los controles del mismo, proponiendo una disminución en el riesgo.
- Identifica a los entes de mayor contribución al riesgo, asimismo localiza los puntos débiles de los sistemas y del proceso.
- Genera un mejor y mayor entendimiento de las instalaciones, permitiendo, también, conocer de mejor manera el funcionamiento de los sistemas.
- Realiza una comparación del riesgo entre las tecnologías, analizando posibles sistemas alternativos.
- Identifica y comunica los riesgos e incertidumbres que rodean a los procesos.
- Ayuda a establecer prioridades para mejorar la salud y así operar de manera segura bajo niveles de riesgo tolerables.
- Formula programas de revisión, en los aspectos de mantenimiento e inspección.
- Genera planes de respuesta contra emergencias, a su vez actualiza los mismos.³²

Los análisis de riesgos requieren de la intervención de distintas áreas, esto quiere decir que es necesario realizarse de manera multidisciplinaria, sin embargo no

³² Ídem.

siempre es necesario que todas se involucren al mismo tiempo. Las áreas implicadas son:

- Análisis de sistemas.
- Probabilidad y estadística.
- Distintas áreas de la ingeniería como: química, mecánica, eléctrica, instrumental, civil, industrial, etcétera.
- Ciencias físicas, químicas y biológicas.
- Ciencias de la salud, abarcando la toxicología y la epidemiología.
- Ciencias que involucran recursos humanos, ergonómicos y administrativos.³³

No obstante, el riesgo puede ser consecuencia de peligros inherentes, como son:

- Peligros naturales (inundaciones, sismos, huracanes, etcétera).
- Peligros tecnológicos (instalaciones industriales, estructuras, sistemas de transporte, sustancias peligrosas, pesticidas, herbicidas, medicamentos, etcétera).
- Peligros sociales (terrorismo, sabotaje, ataque armado, robo, secuestros, intentos de toma de instalaciones, bloqueo de instalación, amenaza de bomba).³⁴

2.8 Proceso de análisis y gestión de riesgo.

El riesgo al estar presente en todas nuestras actividades lo enfrentamos cotidiana y continuamente, ya sea de forma consciente o inconsciente; por lo que surge la necesidad de administrarlos pertinentemente de forma sistemática a todas las organizaciones e individuos; asimismo a todas las funciones y actividades dentro de una organización. Esta necesidad debe ser de vital importancia.

Por otra parte, la gestión de riesgo es una parte fundamental de una buena administración. Se genera a partir de un proceso iterativo, que va mejorando continuamente, tratando de observar las necesidades de las prácticas o procesos

³³ Ídem.

³⁴ Ídem.

existentes. En otras palabras, la gestión de riesgos es la aplicación sistemática de adecuadas políticas de administración, así como de procedimientos y prácticas de ingeniería particularmente en las labores de identificar, evaluar, analizar y controlar los riesgos.³⁵

La gestión de riesgo se divide en siete etapas, que ayudan a la sistematización de la misma. Cada una de ellas deben llevarse a cabo para la correcta administración de los riesgos. Estas etapas son:

- **Comunicación y consulta.**
En todas y cada una de las etapas de la gestión de riesgos se debe contar con canales comunicativos, así como consulta con los niveles directivos.
- **Definición del contexto.**
Se debe definir adecuadamente tanto el contexto interno como externo en donde tiene lugar el proceso de gestión de riesgos. Se deben estructurar y establecer pertinentemente todos los discernimientos contra los cuales se evalúa el riesgo.
- **Identificación de los peligros y riesgos.**
Es necesario identificar todos los potenciales peligros; a su vez, se debe analizar todas las posibles desviaciones de los mismos y de cómo pueden salirse de control. Asimismo es importante identificar los escenarios de riesgos, de posibles accidentes, y situaciones o condiciones que generen o inciten riesgos.
- **Identificación y evaluación de los controles existentes.**
Es completamente necesario determinar la probabilidad de ocurrencia del escenario de riesgo, a su vez determinar las posibles consecuencias. Al mismo tiempo se debe estimar si los controles existentes son adecuados y suficientes para el óptimo control y administración del riesgo evaluado; incluyendo, también, los sistemas de seguridad implementados en el proceso.

³⁵ Ibid. p.9

- Jerarquización de riesgos.
Es fundamental comparar los niveles estimados de riesgo contra los criterios preestablecidos, de la misma forma, se debe considerar el cotejo entre los potenciales beneficios y la adversidad de los resultados. Esto ayuda a proponer las recomendaciones que sean requeridas y priorizar la atención que requieren.
- Administración del riesgo.
Propone el desarrollo y la implementación de medidas y estrategias eficaces para mantener los riesgos dentro de niveles tolerables. A su vez, también plantea planes de acción para controlar los riesgos.
- Monitoreo y revisión de los riesgos.
Ya que se propone mantener una mejora continua, se debe monitorear paulatinamente la efectividad y correcto funcionamiento de cada uno de los pasos de la gestión de riesgos. Es necesario la supervisión del cumplimiento de las medidas propuestas, con base en responsables encargados del monitoreo de las recomendaciones surgidas del análisis de riesgos.³⁶

2.9 Proceso de identificación, análisis y evaluación de riesgos.

El proceso de identificación, evaluación y análisis de riesgos debe realizarse bajo un régimen de etapas, las cuales son:

- Definición del alcance.
- Identificación de peligros y riesgos.
- Estimación del nivel de riesgos.
- Verificación del análisis.
- Documentación del análisis.
- Actualización del análisis.³⁷

³⁶ Ibid. p. 10

³⁷ Ibid. p. 11.

Es indispensable contar con toda la información necesaria y actualizada, completa y vigente relacionada a la tecnología del proceso a analizar. Por otra parte es indispensable contar con una persona que lidere al equipo que realizará el análisis de riesgos; del mismo modo, se encargará de supervisar la correcta aplicación de la o las metodologías de análisis seleccionadas, en coordinación con el líder es ineludible contar con un equipo multidisciplinario de especialistas en todos los campos y disciplinas relacionadas, esto implica la participación de expertos en operación, seguridad, diseño, ingeniería, salud laboral, mantenimiento, entre otras; los participantes en el análisis deben dominar ampliamente su rama, deben contar con amplia experiencia y un vasto conocimiento del tema a tratar.³⁸

2.9.1 Definición del alcance.

Definir y documentar el alcance que tendrá el estudio del análisis de riesgos, ayudando a generar un plan de trabajo al iniciar un proyecto. Se plantea los objetivos y metas a cubrir por el análisis. En la definición del alcance se debe considerar la familiarización con el sistema de estudio.

Se requiere aplicar una serie de pasos, los cuales son:

- Plantear los motivos o los problemas que llevaron a la necesidad de realizar el análisis. Por su parte, es indispensable formular cuáles son los objetivos del estudio, basándose en los requerimientos observados. Asimismo, pretende definir los criterios de éxito/falla del sistema.
- Definir cuál es el sistema que se analizará, esto implica el conocimiento de la descripción general del sistema a analizar; a su vez, definir las fronteras e interfaces con los sistemas relacionados tanto físicas como funcionales. Del mismo modo, se necesita una descripción del entorno del sistema; así como la identificación de las entradas y salidas del sistema, tanto de materia como de energía. Por último, es indispensable conocer las condiciones operativas del sistema a analizar, considerando cualquier limitación importante.

³⁸ Ídem.

- Identificar la totalidad de las circunstancias relevantes al problema o a la actividad analizada, como son contextos técnicos, legales, ambientales, organizacionales o humanos.
- Comprender las limitaciones y suposiciones que rigen la realización del análisis.
- Al concluir, se debe identificar las acciones que se deben tomar con base en los resultados obtenidos en el análisis.

Dentro de las actividades planteadas por el alcance es imperativo considerar la familiarización con el sistema a estudiar.³⁹

2.9.2 Identificación de peligros y riesgos.

Es absolutamente necesario identificar todos los peligros relacionados al proceso, de la misma forma, todas las posibles maneras en las que estos peligros puedan salirse de control generando eventos catastróficos, dando lugar a la ocurrencia de los riesgos. En la identificación de peligros y riesgos, es necesario estudiar los peligros que se han registrado a través de la historia, ya sea en instalaciones similares o los que resulten del empleo de las metodologías formales para el desarrollo de los análisis de riesgos de proceso. En un inicio, se debe realizar una identificación, análisis y evaluación de los riesgos, considerando la importancia de los peligros identificados; por lo que enlaza el cumplimiento de las siguientes acciones:

- Se deben tomar medidas correctivas de manera inmediata para reducir los riesgos ocasionados por los peligros identificados.
- Se debe detener el análisis cuando la conjunción de peligros y riesgos son insignificantes.
- Continuar tanto con el análisis, como con la estimación del nivel de riesgos.⁴⁰

³⁹ Ídem.

⁴⁰ Íbid. p. 13.

2.9.3 Estimación del nivel de riesgo.

Al iniciar esta etapa, se deben tomar en cuenta los eventos iniciadores, así como la probabilidad de ocurrencia de los mismos; asimismo es necesario considerar la mixtura de los eventos que son de particular interés, como son: errores humanos, falla en los equipos, dispositivos de seguridad, salvaguardas, etcétera. De la misma forma, se deben conceptualizar todas las posibles consecuencias, para así poder estimar el riesgo que se ha analizado. En la estimación obtenida, se debe contemplar la máxima reducción del grado de incertidumbre involucrado.

Para la estimación del nivel de riesgo, las metodologías empleadas son frecuentemente cuantitativas, variando en el grado de detalle del análisis según cada aplicación en particular. Sin embargo, los análisis totalmente cuantitativos no son particularmente viables, ya que en la mayoría de los casos no se dispone con la suficiente información o datos de los procesos, actividades o sistemas analizados. En estos casos los especialistas puede emplear ayuda de una categorización comparativa, ya sea cualitativa o cuantitativa para realizar el análisis pertinente. En dado caso de que la clasificación sea de forma cualitativa, se debe plantear una clara y detallada explicación de todos los criterios y términos empleados; asimismo se debe documentar todas las bases para la concesión de la frecuencia y consecuencias de los eventos.

Del mismo modo, para conocer la estimación de riesgos, en un principio se analizan las posibles causas cuyos peligros puedan salirse de control, a partir de ello, se determina la probabilidad de ocurrencia o frecuencia de que el evento suceda; en el caso particular de las sustancias peligrosas es necesario considerar varios aspectos relacionados a la duración y naturaleza de su liberación como es el inventario, la composición, las características de la descarga, la reactividad, etcétera. Posteriormente, se analizan las consecuencias ocasionadas en el punto en el que el peligro se sale de control; por lo que en el análisis de consecuencias estima la gravedad de las mismas relacionadas directamente con el peligro. Este análisis puede a su vez desembocar en un análisis de secuencia de eventos, en el cual se estima la probabilidad de que el peligro cause las consecuencias; dicho de otra

forma, prevé los eventos mediante el cual el peligro puede resultar en consecuencias.⁴¹

2.9.4 Análisis de la frecuencia.

Este tipo de análisis se emplea para la estimación de la probabilidad con la que los eventos no deseados ocurren, identificado en la tercera etapa del proceso de gestión del riesgo. Con frecuencia se emplean tres direcciones para estimar dicha frecuencia:

- Uso de datos históricos.
- Obtención de frecuencias a través de la utilización de simulaciones o metodologías analíticas.
- Empleando juicios, criterio y experiencia del personal operativo, el cual debe estar familiarizado con los procesos o se debe contar con la presencia de expertos en el área.

El uso de estos enfoques puede ser de manera individual o combinada. En general se utiliza la combinación de los dos primeros puntos con el propósito de aumentar la confiabilidad de los datos. Sin embargo, de no ser posible la combinación de los dos primeros puntos se recurriría a la implementación del tercer punto, igualmente en combinación o de forma individual, ya que el personal o los expertos están íntimamente familiarizados con los procesos apoyando en algún punto en caso de la ausencia del otro.

2.9.5 Análisis de consecuencias.

El análisis de consecuencias se utiliza para para estimar el daño o impacto que alcanzaría el escenario de riesgo del evento no deseado, contemplando las consecuencias que consideren al personal, al equipo, a las instalaciones, al medio ambiente, a la población y la producción. Para llevar a cabo este análisis, es necesario considerar:

⁴¹ Ídem.

- Los eventos no deseados deben seleccionarse previamente.
- Los daños resultantes de los escenarios de riesgo simulados deben evaluarse, y deben ser apropiadamente descritos; tomando en cuenta aspectos, sobre el personal, población, equipo, instalaciones, medio ambiente y producción.
- Las medidas de seguridad y sistemas existentes para sofocar los efectos, asimismo se debe considerar todos los controles administrativos y condiciones relevantes que pudieran tener un efecto mitigador sobre éstas.
- Documentar todos los criterios empleados para identificar y evaluar cualesquiera de los efectos relacionados con las consecuencias.
- Las consecuencias inmediatas; de la misma forma y siempre y cuando así lo considere el alcance del estudio, se deben tomar en cuenta las consecuencias que puedan ser resultantes después de cierto tiempo.⁴²

2.9.6 Cálculo de riesgos

El cálculo de riesgos debe ser expresado de manera adecuada. Las principales formas de enunciar este cálculo son:

- Observar la frecuencia de muerte para un individuo, esto quiere decir tomar únicamente en cuenta el riesgo individual considerando únicamente los decesos.
- Creación de gráficas de frecuencia versus consecuencias para el riesgo social; estas gráficas se conocen como “curvas F-N”, en ellas se contempla la frecuencia (F) y el número de personas que sufren cierto grado de daño específico (N).
- Estudiar la tasa de pérdidas esperadas, ésta se expresa de forma estadística, tomando en cuenta los daños económicos, las fatalidades o los daños ambientales.
- Analizar la forma de distribución del riesgo de un cierto grado de daño específico.

⁴² Íbid. p.14.

Los datos empleados para realizar los cálculos pertinentes deben ser correctamente recolectados, documentados y organizados, de manera que éstos puedan ser manejados con facilidad durante el tiempo de desarrollo del análisis de riesgos, permitiendo, de antemano, su trazabilidad.⁴³

2.9.7 Incertidumbre.

La incertidumbre es considerada como la imperfección o falta de conocimiento sobre el estado o sobre los procesos. De manera estadística, es la relación aleatoria o el error proveniente de fuentes al utilizar metodologías estadísticas; en otras palabras, es la probabilidad de que algo malo suceda.

Debido a que existen muchas incertidumbres en la estimación de riesgos, es de vital importancia comprender en su totalidad las causas que lo originan, con el propósito de interpretar correctamente los niveles de riesgo estimado o calculado. Es necesario tomar en cuenta que las incertidumbres se encuentran estrechamente ligadas con los datos, las metodologías y los modelos ocupados en la estimación de riesgos.⁴⁴

2.9.8 Verificación del análisis.

El análisis debe ser sometido a un proceso formal de revisión; esta verificación debe ser realizada por personal ajeno al estudio, esto quiere decir que se llevará a cabo por personal que no se encuentre relacionado a la elaboración del estudio. De esta forma, se garantiza la calidad e integridad del análisis.

La verificación plantea una serie de etapas, las cuales contempla:

- a) Verificar que el alcance sea consistente con el planteamiento de los objetivos propuestos.

⁴³ Ídem.

⁴⁴ Ídem.

- b) Revisar las suposiciones críticas, de la misma forma, se debe asegurar que estas suposiciones sean creíbles, con base en la información con la que se disponga.
- c) Asegurar el correcto empleo de las metodologías seleccionadas.
- d) Al verificar el análisis, es imperativo considerar que el estudio pueda ser repetible por otros analistas.
- e) Los resultados del análisis no deben depender de la forma en la que los datos o los resultados sean presentados, deben poder ser interpretados de forma clara y sencilla.

También se requiere revisar la viabilidad técnica y económica de las recomendaciones propuestas y obtenidas en el análisis de riesgos. Asimismo, se debe llevar a cabo bajo las siguientes recomendaciones:

- Generar diferentes opciones para la administración del riesgo.
- Realizar una evaluación técnica y económica de cada opción desde un punto de vista costo/beneficio.
- Presentar las conclusiones de la evaluación costo/beneficio considerando aspectos como: grado de riesgo remanente, cumplimiento de la legislación y normatividad, y costo de la retención del riesgo.⁴⁵

2.9.9 Documentación del análisis.

La documentación se debe de presentar en forma de reporte, en el que se plasme el proceso por sí mismo y debe incluir o referirse al plan de trabajo. La entrega de la información presente en el documento es una pieza fundamental del proceso del análisis de riesgos. La estimación de riesgos debe expresarse en términos simples y entendibles, asimismo se deben aclarar las fortalezas y debilidades de las diferentes medidas de riesgo utilizadas. De la misma forma se debe expresar en un lenguaje apropiado y entendible las incertidumbres relacionadas con la estimación de riesgos.

⁴⁵ *Íbid.* p.15.

La extensión del reporte a entregar se encuentra estrechamente ligada a los objetivos y el alcance planteados para el análisis. La información reportada debe contener:

- Índice.
- Objetivos.
- Alcance.
- Descripción del proceso a analizar.
- Descripción del entorno a la instalación.
- Premisas, consideraciones y criterios aplicados.
- Desarrollo de la o las metodologías seleccionadas para la identificación de peligros en el proceso.
- Relación de riesgos identificados.
- Evaluación y jerarquización de los riesgos.
- Recomendaciones para la administración de los riesgos.
- Conclusiones.
- Referencias.

Para análisis muy simples estos puntos pueden variar; incluso se pueden omitir algunos puntos o simplemente entregar el análisis sin necesidad de presentar toda la formalidad de un reporte.⁴⁶

2.9.10 Actualización del análisis.

Debido a que los análisis de riesgos se emplean para para sobrellevar los procesos de administración de riesgos de manera continua, es necesario que éstos sean realizados y documentados de tal forma que pueda ser actualizado a lo largo del ciclo de vida del proceso, sistema, actividad o instalación. El ejercicio de actualización debe llevarse a cabo en periodos no máximos a cinco años; pero de ser necesario, por cambios en las condiciones de diseño, condiciones operativas, implementación de nuevas tecnologías, como resultado de accidentes mayores, de

⁴⁶ Ídem. p.21.

acuerdo con las necesidades del proceso en gestión, etcétera, estas actualizaciones pueden realizarse antes.⁴⁷

2.10 Metodologías de análisis de riesgos.

La evaluación de los diversos riesgos asociados a una determinada instalación industrial se lleva a cabo mediante la implementación de un análisis de riesgos. Las principales razones para realizar este tipo de análisis, es obtener una orientación razonable de los siguientes aspectos:

- Evaluar y prevenir los accidentes que puedan ocurrir.
- Estudiar la frecuencia con la que estos eventos ocurren.
- Determinar la magnitud de las consecuencias que producen los eventos no deseados.⁴⁸

Los análisis de riesgos involucran la identificación de los peligros inmersos en los procesos a estudiar; posteriormente, la evaluación y análisis de los riesgos asociados a estos peligros.⁴⁹

2.10.1 Lista de verificación.

La lista de verificación utiliza una lista de puntos de un procedimiento para verificar el estado de un sistema. En este método, el nivel de detalle varía ampliamente, y son frecuentemente utilizados para indicar el cumplimiento con estándares y políticas. El uso del análisis de Lista de verificación es sencillo, asimismo es aplicable en cualquier etapa del tiempo de vida de un proceso. Son utilizadas frecuentemente para familiarizar al personal inexperto con el proceso por comparación de los atributos del proceso con varios requerimientos de la lista de verificación. Del mismo modo, generan una base común para la revisión por parte de la dirección de las evaluaciones del analista de un proceso u operación.

⁴⁷ Íbid. p.15.

⁴⁸ Casal, J., Montiel, E., Et. Al. (1999). Análisis del riesgo en instalaciones industriales. Barcelona: Ediciones UPC.

⁴⁹ Ragasol Barbey, Víctor. op. cit. p. 16

La Lista de verificación detallada proporciona los cimientos para una evaluación estándar de los peligros de un proceso. Este tipo de estudio puede ser tan extenso como sea necesario para cubrir una situación específica, aunque debe ser aplicada de manera rigurosa para identificar problemas que necesiten mayor atención. Las Listas de verificación son frecuentemente utilizadas en combinación con otras metodologías de evaluación de riesgos para la evaluación de situaciones peligrosas. La elaboración de la misma se encuentra estrechamente limitada por la experiencia del autor, por lo que deben ser desarrolladas por autores que tengan un amplio conocimiento del sistema que se está estudiando. Frecuentemente, son creadas a partir de la organización de la información, a partir de códigos, estándares y regulaciones. Este documento debe ser considerado como instrumento de vida, asimismo deben ser auditadas y actualizadas frecuentemente. Es utilizado con regularidad para controlar el desarrollo de un proyecto, pasando por todas las etapas de vida del mismo, desde el diseño inicial hasta el desmantelamiento de la planta. Este estudio debe ser avalado por varios miembros del personal, de la misma manera por directivos antes de que un proyecto pueda continuar a la siguiente etapa. En otras palabras, las Listas de verificación son utilizadas como medios de comunicación y como forma de control de un proyecto.

Ocupa una relación de temas específicos para verificar el estado de un sistema con una referencia externa, identifica los tipos conocidos de riesgos, las deficiencias presentes en el diseño y, por último, las situaciones potenciales que puedan desencadenar un accidente relacionadas con el proceso y su normal operación. Este método, puede utilizarse también para la evaluación de procedimientos, equipos e, incluso, materiales. La Lista de verificación hace uso de la experiencia acumulada por una organización industrial y se encuentra limitado por la experiencia de sus autores.

En primer lugar, las Listas de Verificación tradicionales son utilizadas para garantizar estén cumpliendo con las prácticas estándares. En algunos casos, es necesario la utilización de dos o más listas en combinación con otros

métodos de evaluación de riesgos para localizar peligros comunes que las Listas de verificación pudieran omitir.

Para la realización de una lista tradicional el elaborador propone el estándar de diseño o las prácticas de operación. Una vez creadas, las utiliza para generar una lista basada en deficiencias o diferencias. Una Lista de verificación completa debe contestar las preguntas con las respuestas “sí”, “no”, “no aplica” o “necesita más información”. Los resultados cualitativos varían dependiendo de la situación, en los que generalmente son decisiones binarias (sí o no) sobre el cumplimiento de los procedimientos estándares. De la misma forma, el conocimiento de estas deficiencias lleva a desarrollar de manera sencilla una lista de alternativas de posibles mejoras de seguridad a considerar por los supervisores.

Para generar apropiadamente este método, se necesita una lista de verificación apropiada, procedimientos ingenieriles de diseño, manuales de prácticas operacionales y una persona que complete la lista de verificación, esta persona debe poseer el conocimiento básico del proceso a ser estudiado. De existir una lista de verificación hecha previamente, los analistas podrán utilizarla como una guía si así lo consideran necesario. En el dado caso de que no exista una lista previa, una o varias personas deben preparar la lista de verificación y a continuación realizar la evaluación. Un ingeniero o directivo experimentado debe realizar la revisión de los resultados de la Lista de verificación.

Este tipo de análisis es sumamente versátil, ya que puede ser aplicado tanto en estudios simples como en estudios mucho más extensos. De esta forma, es un estudio rentable para identificar habitualmente los peligros reconocidos. El tiempo de realización del análisis puede tomar horas e incluso días, dependiendo de la complejidad del mismo.

Tabla 2.1. Tiempo estimado para realizar un Análisis de Lista de verificación.⁵⁰

Alcance	Preparación	Evaluación	Documentación
Simples/sistemas pequeños	2-4 horas	4-8 horas	4-8 horas
Complejo/sistemas grandes	1-3 días	3-5 días	2-4 días

El Análisis de Lista de verificación utiliza una lista de puntos específicos para identificar los peligros, designar deficiencias y accidentes potenciales relacionados tanto con los equipos involucrados como con las operaciones requeridas; de la misma forma, es frecuentemente utilizado para la evaluación de procedimientos, materiales o equipos. Sin embargo, son mayormente utilizadas en la evaluación de diseños específicos en donde la compañía posee una experiencia significativa y conocimiento amplio del funcionamiento del proceso. De la misma manera, puede ser empleado en etapas tempranas del desarrollo de nuevos procesos utilizando la experiencia adquirida y reportada en sistemas similares a través del tiempo, de esta forma pretende reducir e identificar los peligros asociados al sistema. La implementación adecuada de este método, puede asegurar desde que una pieza cumple con estándares aceptados, hasta la identificación de secciones del proceso que requieran de una mayor evaluación. Deben ser realizadas para compañías de forma individual, asimismo para productos y plantas específicas; por lo que requiere de visitas al proceso para su cercana observación para comparar el equipo con la lista. En el caso de que la Lista de verificación se realice para un proceso en construcción, personal con amplia experiencia compara la documentación de diseño generada hasta ese momento con Listas de verificación pertinentes.⁵¹

⁵⁰ *Íbid.* p.25.

⁵¹ *Íbid.* passim 24 – 28.

2.10.2 ¿Qué pasa si?

La metodología de análisis ¿Qué pasa si? tiene un enfoque de lluvia de ideas, ésta es formulada por un grupo multidisciplinario familiarizado con el proceso a analizar; el conjunto de personas formula una serie de preguntas exponiendo las preocupaciones en torno a posibles eventos no deseados. Esta metodología no es particularmente un proceso estructurado como algunas otras técnicas; el análisis ¿Qué pasa si? requiere que el personal adapte un concepto básico a una aplicación específica. Existe poca información respecto a este método o de su aplicación; sin embargo, es ampliamente utilizado en la industria en etapas tempranas o durante la vida de un proceso y tiene buena reputación entre aquellas personas que lo aplican.

Para llevar a cabo este estudio, el grupo debe formular una serie de preguntas comenzando siempre con la premisa “¿Qué pasa si...?”. Cualquier proceso puede ser planteado, incluso si no es planteado como pregunta. Por ejemplo:

- ¿Qué pasa si se introduce una mayor cantidad de combustible?
- ¿Qué pasa si no hay incremento en la temperatura del equipo?
- ¿Qué pasa si existe mayor nivel el en tanque de almacenamiento?
- ¿Qué pasa si hay un bloqueo en la válvula de entrada? ⁵²

Se registran todas las preguntas formuladas, posteriormente se dividen en áreas específicas de investigación, generalmente relacionadas con las consecuencias de interés, por ejemplo la protección contra incendios, seguridad del personal, del equipo, eléctrica, etcétera. Cada área es asignada a una o más personas expertas. Las preguntas se formulan con base en la experiencia de los analizadores, apoyándose en diagramas de proceso y descripciones existentes. Para una planta en operación, es imperativo realizar entrevistas al personal operativo que no pertenezca al grupo multidisciplinario que esté realizando el análisis. Para facilitar el estudio

⁵² Véase infra, cap. 3

es recomendable generar un patrón lógico en las preguntas haciendo una división del proceso dentro de sistemas funcionales, sin embargo, el estudio puede realizarse de forma aleatoria. Las cuestiones formuladas pueden ser dirigidas a cualquiera de las condiciones anormales dentro de la planta, no exclusivamente a componentes de falla o variaciones de proceso.

La finalidad del Análisis ¿Qué pasa si? primordialmente es localizar desde peligros, hasta situaciones peligrosas o incluso eventos capaces de desencadenar accidentes indeseables, los cuales generan situaciones indeseables. El grupo multidisciplinario localiza los posibles detonantes de accidentes, analiza sus posibles consecuencias y plantea las medidas de seguridad existentes, una vez concluido, sugiere alternativas capaces de reducir los riesgos. Puede contemplar la revisión de posibles desviaciones en el diseño original, en la construcción de la planta, la operación cotidiana de la misma o la posible modificación de los procesos existentes por razones de expansión o remodelación de las instalaciones. Entonces, se requiere poseer un entendimiento básico de la intención del proceso, sumado a la habilidad de proyectar mentalmente las posibles desviaciones del diseño que sean capaces de desencadenar un accidente. Es absolutamente necesario que el personal que se dispone a realizar la metodología ¿Qué pasa si? se encuentre altamente capacitado y posea un alto conocimiento del proceso para poder obtener los resultados correctos; de lo contrario, el estudio arrojaría resultados posiblemente incompletos. En forma simple, la metodología ¿Qué pasa si? genera una lista de preguntas y respuestas sobre el proceso. Por lo que puede presentarse de forma tabular incluyendo las situaciones peligrosas, las consecuencias que implican estos escenarios, las medidas de seguridad y, por último, las posibles opciones que ayuden a la reducción del riesgo.

La flexibilidad del análisis permite que éste pueda ser aplicable en cualquier etapa de vida de un proyecto, siempre y cuando se utilice la información disponible. Es recomendable emplear un equipo grande de expertos en

distintas áreas de ingeniería y seguridad para ejecutar el análisis, no obstante, con un grupo de dos o tres personas es suficiente; en; es preferible para procesos grandes ajustarse a una división del proceso, esto quiere decir que es recomendable que un equipo numeroso forme equipos más pequeños encargados de áreas específicas del proceso a que todo el estudio de un proceso complejo recaiga en un equipo pequeño.

El tiempo y el costo de esta metodología son proporcionales al tamaño, complejidad y áreas de la planta a analizar. Una vez que los encargados de la realización del método han ganado experiencia en la aplicación del mismo puede volverse altamente rentable para aplicarse en cualquier fase del proyecto. Los tiempos estimados para la realización de este método pueden variar dependiendo de la complejidad del estudio.

Tabla 2.2. Tiempo estimado para realizar un Análisis ¿Qué pasa si?⁵³

Alcance	Preparación	Evaluación	Documentación
Simple/sistemas pequeños	4-8 horas	4-8 horas	1-2 días
Complejo/procesos grandes	1-3 días	3-5 días	1-3 semanas

La metodología depende enteramente de la realización de una lluvia de ideas sobre un proceso u operación. El personal encargado de realizar el estudio revisa el proceso en las reuniones en donde se tratan temas relacionados a la seguridad de problemas identificados. Cada miembro del equipo participa formulando preguntas ¿Qué pasa si? o, en su defecto, propone problemas específicos observados. De la misma forma propone un análisis virtual de cualquier aspecto del diseño de las instalaciones u operaciones llevadas a cabo dentro de la planta. Si el personal es inexperto puede generar análisis

⁵³ íbid. p.33.

incompletos, de lo contrario, es un método altamente viable para identificar peligros y riesgos. Para la realización de un análisis ¿Qué pasa si? simple, es suficiente con la participación de dos o tres personas; sin embargo para procesos complejos, es necesario contar con un grupo numeroso, así como reuniones prolongadas o más frecuentes.

El análisis ¿Qué pasa si? revisa el proceso, primeramente con la introducción de la materia prima, siguiendo el flujo hasta la terminación del proceso, si únicamente se realiza en alguna etapa, se considera la misma premisa dentro de los límites de batería propuestos. De la misma forma, el análisis puede centrarse en alguna consecuencia particular como la seguridad del personal, seguridad ambiental, seguridad pública, etcétera. La dirección tomada por el método ¿Qué pasa si? se encuentra principalmente direccionado a situaciones potenciales de accidentes inmersas en las preguntas y en las observaciones propuestas por el equipo de trabajo; estas cuestiones y temas sugieren las causas específicas para la localización de situaciones que puedan desencadenar un incidente. Al concluir, tanto las preguntas y respuestas, como los peligros, consecuencias, medidas de seguridad y soluciones plausibles son documentadas.⁵⁴

2.10.3 Combinación de Lista de verificación y ¿Qué pasa si?

La combinación de las metodologías de Análisis de Lista de verificación y ¿Qué pasa si? mezcla la creatividad, la aplicación de la lluvia de ideas que ofrece el método ¿Qué pasa si? con las características sistemáticas que ofrece el estudio de Lista de verificación. Es considerado como un método híbrido en el cual se capitalizan las fortalezas y compensa los defectos individuales de los enfoques por separado. Por ejemplo, ya que el método de Análisis Lista de verificación se encuentra basado en la experiencia del ejecutor y la calidad del estudio recae en la experiencia de los autores; si el análisis se encuentra incompleto, entonces el análisis puede no dirigirse a la situación peligrosa. Una porción del Análisis ¿Qué pasa si? apoya al grupo multidisciplinario a considerar los accidentes severos y consecuencias que

⁵⁴ *Íbid.* passim 31 – 35.

están más allá de la experiencia de los autores de una buena lista de verificación, y de este modo no están cubiertas por la misma. En cambio, la fracción del método de Lista de verificación se presta a una naturaleza más sistemática que la del Análisis ¿Qué pasa si? La metodología del Análisis compartido de Lista de verificación y ¿Qué pasa si? puede ser utilizada en cualquier etapa de la vida de un proyecto.

Esta conjunción de métodos es ampliamente utilizado para analizar los riesgos más comunes, aunque es posible estudiar los accidentes casi a cualquier nivel de detalle. Sin embargo, generalmente se enfoca en un nivel de detalle menor a otras metodologías. Es utilizada a menudo como precursor de análisis que se realizarán posteriormente, ya que genera bases adecuadas para la aplicación de métodos de estudio más complejos, del mismo modo sirve como primera evaluación de riesgos de procesos.

El propósito de dicha combinación es identificar pertinentemente los peligros, considerando los tipos generales de accidentes que rodean a un proceso, evaluando de manera cualitativa los efectos del mismo, con el fin de proponer las correctas y adecuadas medidas de seguridad para combatir y reducir el posible riesgo producto del proceso mismo.

La mayoría de los análisis de Lista de verificación y ¿Qué pasa si? son realizados por expertos en las áreas de mantenimiento, operación y diseño. El número de personas involucradas depende particularmente de la complejidad con la que se pretenda realizar el estudio, asimismo es aplicable en cualquier nivel del ciclo de vida de un proyecto. Sin embargo, el número de personas y las reuniones programadas para la realización de este método, son mucho menores que en análisis más detallados. Los tiempos estimados para la elaboración de la mixtura de métodos, puede variar dependiendo de la complejidad del estudio, tomando desde horas e incluso semanas

Tabla 2.3. Tiempo estimado para realizar un Análisis de Lista de verificación / ¿Qué pasa si?⁵⁵

Alcance	Preparación	Evaluación	Documentación
Simple/sistemas pequeños	6-12 horas	6-12 horas	4-8 horas
Complejo/procesos grandes	1-3 días	4-7 días	1-3 semanas

Para la correcta realización de un análisis ¿Qué pasa si?/Lista de verificación es necesario seguir los siguientes pasos:

- a) Preparación para la revisión.
- b) Desarrollo de una lista y temas ¿Qué pasa si?
- c) Uso de una lista de verificación para cubrir cualquier hueco.
- d) Evaluación de cada una de las preguntas y temas.
- e) Documentación de los resultados.

Una modificación de este procedimiento es variar el orden de los incisos a y b, en el cual se propone desarrollar las preguntas ¿Qué pasa si? al mismo tiempo que se progresa en la lista de verificación detallada.⁵⁶

2.10.4 Análisis de modo de falla y sus efectos (FMEA).

Las siglas provienen del inglés “Failure Modes and Effect Analysis”, el cual consta de un procedimiento sistemático para analizar sistemas, para así, poder localizar sus modos de falla potenciales, asimismo, el origen y los efectos en el desempeño de los sistemas de las mismas, considerando el entorno inmediato o el proceso en conjunto en el que se localice el componente. La aplicación del análisis de modo de falla y sus efectos puede ser aplicado en el diseño, construcción u operación de la planta. El FMEA puede comenzar a realizarse en el momento en el que la información sea suficiente para su elaboración, esto quiere decir que basta con contar con un

⁵⁵ *Íbid.* p.33.

⁵⁶ *Íbid.* passim 42 – 46.

diagrama de bloques en el cual se encuentre definido y representado el desempeño de los elementos que lo componen. El análisis FMEA debe ser realizado por un equipo compuesto por personal capacitado para reconocer y evaluar tanto la magnitud como las consecuencias de las deficiencias presentes en el sistema, las cuales pueden concluir en fallas potenciales. Las ventajas de que este sea un análisis en equipo recaen en la complementación de experiencias de los expertos relacionados en la realización de esta metodología.

El FMEA es un análisis para reconocer la severidad de modos potenciales de falla y permite reconocer las medidas preventivas para mitigar los daños provocados por los peligros y así reducir el riesgo presente en el proceso. De la misma forma, incluye una estimación de la probabilidad de ocurrencia de los modos de falla; permitiendo identificar las medidas para reducir la probabilidad de ocurrencia de los modos de falla, buscando así reducir los riesgos. Para iniciar el análisis, es necesario realizar una descomposición jerárquica de los sistemas en elementos más básicos; una buena forma para realizar este desmenuzamiento es mediante la realización de diagramas de bloques, iniciando con los elementos más básicos o de bajo nivel. Esta realización permite identificar si el modo de falla de bajo nivel tiene una repercusión directa en los niveles siguientes; el análisis continúa de forma ascendente hasta identificar el último efecto en el sistema.

El análisis de Modo de falla y sus efectos trata con modos de falla independientes y la repercusión de éstos en el sistema. Cada modo de falla se trata de forma individual, en otras palabras, se estudian de forma tal que no se relacionen con otras fallas dentro del sistema.

Existen muchas variaciones en la forma de presentar y llevar a cabo un estudio FMEA. No obstante, lo primordial del análisis es estar cimentado en el estudio de los modos de falla. Los resultados analíticos son plasmados en formatos de trabajo que contienen la información esencial de un análisis para la consideración de un sistema completo desarrollado para ese sistema específico. Esta metodología representa las formas en las que los sistemas

pueden potencialmente fallar, los componentes y los modos en los que éstos fallan; asimismo estudia las causas de ocurrencia de cada modo de falla individual. Es importante tomar en cuenta que cuando se realiza una actualización sobre un sistema ya existente, es primordial que el sistema que se renovará cuente con las mismas condiciones en las cuales se realizó el estudio previo.

Para poder llevar a cabo un análisis de Modo de fallas y sus efectos es necesario aplicar una serie de pasos, los cuales garantiza la correcta realización de este tipo de análisis, estos pasos son: la definición, el planteamiento y programación de actividades, el análisis y la documentación. A su vez, cada sección cuenta con una subdivisión la cual ayuda a realizar de forma ordenada y llevar a cabo el estudio de forma sistemática.

La definición consta primeramente del planteamiento de los propósitos y objetivos de la realización del estudio en donde se identifican de forma clara aquellas fallas que puedan tener consecuencias indeseables, en los que se satisfagan las necesidades contractuales del cliente que requiere el análisis, de esta forma permite realizar las mejoras en la confiabilidad del sistema. Seguido de la selección del equipo de trabajo en el cual se definen los roles y responsabilidades de los miembros del equipo; por lo que es necesario tomar en cuenta las habilidades de cada integrante que conforman el equipo de trabajo, ya que es el resultado de trabajo en equipo, cada miembro cuenta con una responsabilidad específica, los cuales cuentan con un mínimo de cuatro personas, y en raras ocasiones superan los siete integrantes, los cuales constan de: líder, auxiliar del líder, personal relacionado con el diseño del sistema, personal operativo, personal de mantenimiento y personal especialista.

El planteamiento y programación de actividades comienza con la planeación del estudio. Posteriormente se requiere recolectar y procesar los datos, en donde se realizan descripciones y diagramas simplificados o de bloques, asimismo se obtiene el listado de componentes. A continuación, se definen los formatos de registro del análisis, asimismo se define el tiempo en el que

se llevará a cabo el análisis. Finalmente, se realiza la programación de actividades.

Una vez concluido el punto anterior es momento de arrancar con la realización del análisis de FMEA, en donde se realiza la selección de uno de los componentes y describe sus funciones y referencias de desempeño, en el que se identifican los modos de falla, los efectos y consecuencias, causas de modos de falla, medidas de seguridad y protección, y posibles soluciones o medidas de mitigación en caso de ser necesarias prorrumpiendo recomendaciones validando la tolerabilidad del riesgo. Ya que el propósito es dividir en distintos componentes, se repite el proceso para cada uno de los componentes del sistema.

Para concluir el análisis es necesario realizar la documentación necesaria relacionada al análisis de FMEA, llenando los formatos necesarios, asimismo contar con los puntos tratados en las minutas de las reuniones que se llevaron a cabo en la realización de la metodología. Para concluir el estudio, se necesita realizar el informe final, en el que entreguen los resultados obtenidos en el análisis; el cual concluye con liberación final del informe.⁵⁷

La correcta realización del FMAE debe seguir los siguientes pasos:

⁵⁷ *Íbid.* passim 52 – 69.

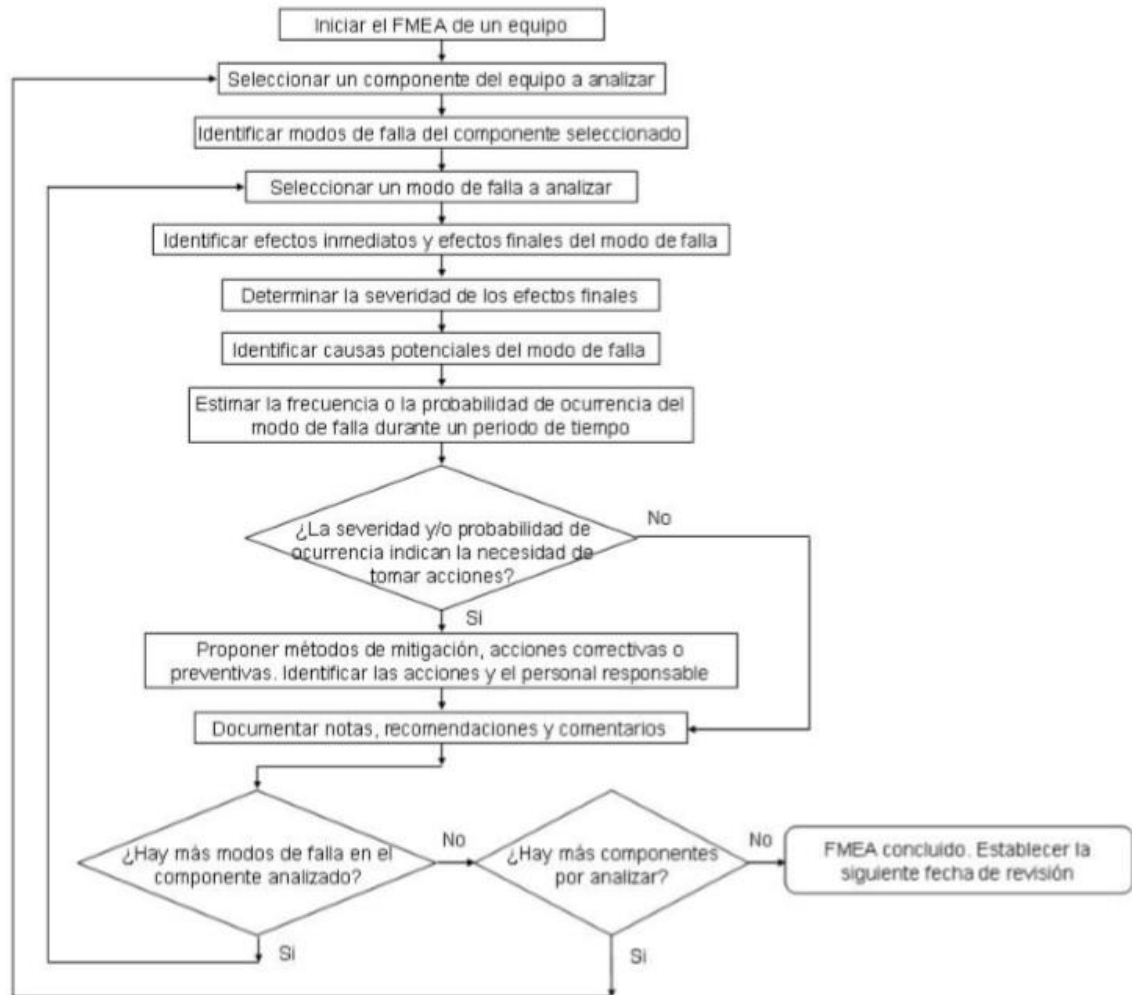


Figura 2.1. Protocolo para realizar un análisis FMEA.⁵⁸

2.10.5 Análisis de peligro y operabilidad (HazOp).⁵⁹

La metodología HazOp proviene del inglés “Hazard and Operability” es un método de análisis sistemático y estructurado el cual sirve para examinar un sistema con el propósito de identificar peligros potenciales y problemas operativos, particularmente identifica las causas y sus implicaciones en el proceso. El desarrollo de la metodología HazOp data de la década de 1960 y se le atribuye a la Imperial Chemical Industries (ICI); el análisis HazOp ha tenido ciertas variaciones desde su implementación, y se imputa a la combinación de varios métodos realizados por la ICI Chemical Division en 1960 y la ICI Mond Division en 1968. Su uso y desarrollo fue promovido

⁵⁸ Íbid. p.67.

⁵⁹ Véase infra, cap. 3

principalmente por Chemical Industries Association del Reino Unido, mediante la publicación: A guide to Hazard and Operability Studies.

De la misma forma, el análisis HazOp se puede emplear para localizar problemas de operabilidad, particularmente las perturbaciones operativas y desviaciones las cuales pueden desencadenar en la obtención de productos fuera de las especificaciones deseadas. Es un proceso creativo en el que se identifican las desviaciones potenciales de un sistema a partir de la asignación de rangos de valores entre los que se espera se encuentre, de acuerdo con el propósito de diseño. Estas desviaciones se utilizan para generar un estímulo dentro del grupo de analistas, para que ellos examinen las posibles causas y consecuencias de las desviaciones observadas.

El análisis es realizado por un grupo multidisciplinario en el que el líder debe contar con entrenamiento y experiencia en la implementación del método. En todo momento, el líder del equipo debe estar apoyado por una persona encargada de documentar el análisis.

La metodología HazOp debe ser llevado a cabo por especialistas de cada área involucrada en el sistema, los cuales deben contar con una amplia experiencia y habilidades apropiadas; asimismo deben poseer un buen juicio, ser intuitivos y cooperativos. Para implementar el análisis, el equipo debe generar una lluvia de ideas, teniendo un enfoque positivo en donde se permita la discusión y debate de los planteamientos concluyendo con resultados constructivos.

Para la implementación de un estudio HazOp, es necesario que el equipo de trabajo realice una división del proceso a estudiar en una serie de subprocesos, los cuales se conocen como “nodos”. Cada nodo cuenta con una parte del proceso en el cual los especialistas realizan una lista identificando las variables y parámetros que sean relevantes en la búsqueda de desviaciones del diseño, los cuales desemboquen en consecuencias no deseables. Estas variables son las variables del proceso mismo, como son: flujo, nivel, presión, temperatura, pH, tamaño de partícula, composición, viscosidad, etcétera; mientras que los parámetros que influyen son los

parámetros de diseño, por ejemplo: espesor, diámetro de tubería, altura, rugosidad, composición de materiales, etcétera. Una vez identificadas las variables y parámetros, el equipo de trabajo implementa el uso de palabras guía, las cuales deben generar un planteamiento de desviaciones lógicas. Las palabras guía que permiten la realización de los planteamientos lógicos son:

Tabla 2.4. Palabras guía para la realización del método HazOp⁶⁰

Palabra guía	Significado
No	Negación de la intención del diseño
Más / Alta	Incremento cualitativo
Menos / Baja	Decremento cualitativo
Inverso	Opuesto lógico al propósito del diseño
Parte de	Sólo se logra parte del propósito del diseño
Otro	Sólo se logra parte del propósito del diseño
En lugar de	Sustitución
Antes / Después	Fuera de secuencia
Tarde / Temprano	Antes o después de tiempo
Rápido / Lento	Fuera de velocidad

Una vez que se ha registrado una desviación, es necesario estar atentos a desviaciones con resultados evidentemente triviales, de ser así, no tiene sentido buscar sus causas. Sin embargo, cuando las consecuencias no son triviales se debe buscar la causa de ésta utilizando una “lluvia de ideas” para identificar tantas causas como sean posibles; las causas pueden ser resultantes de errores humanos o de fallas del equipo. Durante la identificación de causas es necesario que el equipo tome una actitud positiva,

⁶⁰ *Íbid.* p.85.

crítica y de mente abierta; sin caer en una actitud defensiva y, por supuesto, sin ofender a los demás participantes.

De la misma forma, es necesario tomar en cuenta la posibilidad de que las consecuencias desemboquen en una cadena de eventos no deseados, tomando en cuenta desde la ocurrencia de la misma desviación hasta la pérdida “creíble” en materia de seguridad, ambiente y negocio. Las consecuencias deben considerar la falla total de las protecciones existentes. Una vez concluido, se deben tomar en cuenta los dispositivos existentes en el proceso para evitar la ocurrencia de la desviación o para reducir lo más posible las consecuencias del evento. Las protecciones abarcan las etapas de detección de la condición y medidas correctivas.

Para realizar el HazOp de manera correcta, es necesario aplicar una serie de pasos, los cuales ayudan al desarrollo de la metodología. Las divisiones son: definición, preparación, análisis y documentación. Asimismo, cada uno de los puntos cuenta con una serie de subdivisiones.

Al arrancar el análisis HazOp, es necesario definir tanto el alcance del estudio como los objetivos del mismo, los cuales son planteados por el responsable técnico de la instalación y el líder del estudio; en trabajo en conjunto, deben asegurar una definición precisa de las fronteras del sistema de estudio, así como su relación con otros sistemas y el ambiente, considerando que el equipo de análisis se enfoque únicamente en áreas definidas en el alcance y, a su vez, relevantes en el estudio. A continuación se realiza la selección del equipo de trabajo, en el que se deben definir claramente los roles y responsabilidades de los integrantes tomando en cuenta las habilidades y especialidades necesarias de cada miembro que conformará el equipo de trabajo el cual requiere de al menos cuatro personas y en raras ocasiones supera las siete personas; los integrantes al menos deben incluir: el líder, auxiliar del líder, personal relacionado con el diseño del sistema, personal operativo, personal de mantenimiento y personal especialista.

Una vez terminada la definición, procede la preparación, que consiste en el planteamiento del estudio; a continuación se recolectan y procesan los datos,

en donde se elaboran tanto las descripciones como los diagramas simplificados; asimismo se presentan las propuestas de los nodos, las listas de variables y las palabras guía. Al concluir, se definen los formatos de registro del análisis; seguido por la definición del tiempo que tomará realizar el análisis HazOp y, por último, es necesario programar las actividades que se llevarán a cabo.

Al concluir la preparación, el análisis arranca con la definición y la división del sistema en los nodos o etapas correspondientes. Se procede a la selección de uno de los nodos y se describe el propósito de acuerdo al diseño, es necesario identificar las variables y los parámetros a analizar para poder comenzar con la aplicación de las palabras guía y así obtener las desviaciones presentes en el proceso; se identifican las causas y las consecuencias de los eventos no deseados proponiendo las protecciones; se plantean las posibles soluciones o, en caso de ser necesario, las medidas de mitigación correspondientes emitiendo recomendaciones valorando los niveles de tolerabilidad del riesgo. Por último, se repite el proceso de análisis para cada uno de los nodos del sistema.

Para finalizar el estudio es necesario presentar la documentación necesaria, en el que se llenan los formatos de HazOp y se documenta lo discutido en las minutas de las reuniones. Se genera el informe final y, posteriormente se libera el mismo.⁶¹

Para el análisis de cada nodo es necesario aplicar la metodología adecuada. El estudio lleva a cabo la siguiente estructura:

⁶¹ *Íbid.* passim 76 – 87.

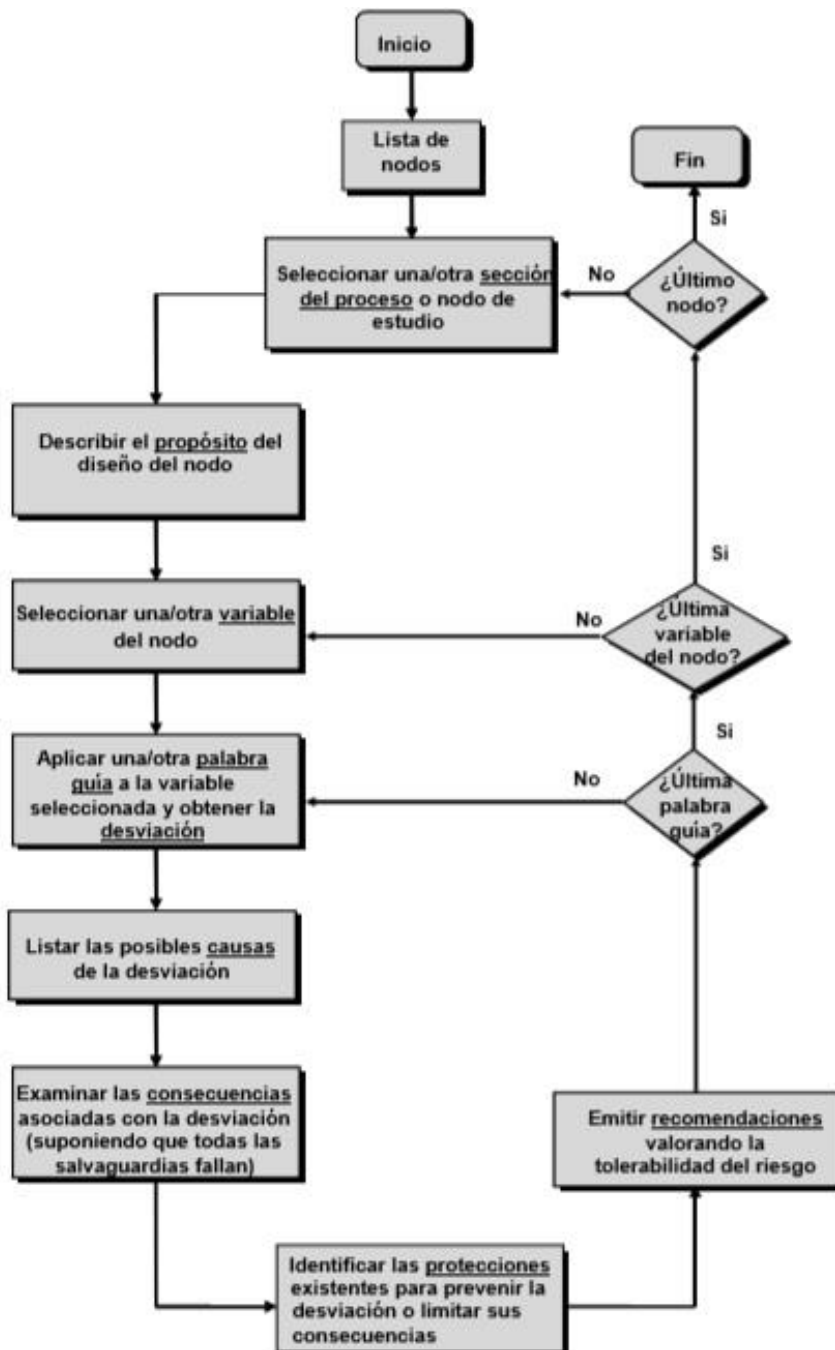


Figura 2.2. Protocolo para realizar un análisis HazOp.⁶²

2.10.6 Matrices de riesgo.

Dentro de la industria se aplican análisis de riesgos por medio de la estimación de riesgos, empleando diferentes metodologías que cumplan con este fin. Para la medición de riesgo es necesario considerar los dos

⁶² *Íbid.* p.83.

componentes del mismo: la frecuencia de ocurrencia de un evento indeseado y la magnitud de las consecuencias de ese evento. Considerando esto, existen procesos en los que se localizan una gran cantidad de riesgos, como puede ser el riesgo de daño al personal, a la población, al medio ambiente o al negocio, incluso se debe considerar el daño provocado a los bienes de terceros o a los bienes de la nación. La selección de la metodología adecuada para valorar los niveles de riesgo es primordial cuando el cúmulo de riesgos localizados es amplio y los recursos para su óptimo control o formas de reducción son limitados. Realizar una valoración de los niveles de riesgo y, así, asignar prioridades a la atención de las recomendaciones, permite un manejo adecuado de los recursos. Para lograr esta valoración, es necesario aplicar el concepto que surgió en el Reino Unido en 1974 conocido como ALARP, que significa Tan Bajo Como Sea Razonablemente Práctico; las siglas provienen del inglés As Low As Reasonably Practicable. El ALARP requiere que se mantengan las instalaciones seguras y sin riesgos a la salud hasta niveles razonablemente prácticos. Existen riesgos que son considerados tolerables, por el contrario otros no lo son, estos son los principios de acción del ALARP.

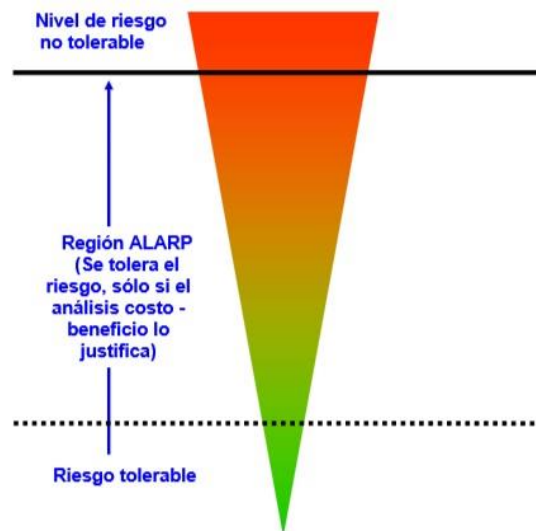


Diagrama 2.3. Principio ALARP.⁶³

⁶³ *Íbid.* p.95.

Para que el riesgo se considere dentro de la región ALARP, debe demostrarse que el costo relacionado con la reducción del riesgo es desproporcionado con respecto al beneficio que se obtiene. El ALARP surge de la premisa de que sería posible utilizar una amplia cantidad de tiempo, dinero y esfuerzo al tratar de minimizar los riesgos a un valor cercano a cero, ya que el valor de riesgo cero primeramente no es costeable y mucho menos posible. De la misma forma, no debe entenderse solamente como una aplicación cuantitativa de los beneficios contra el daño; es necesario comprenderla como una buena práctica de juicio del balance entre el riesgo y el beneficio a la sociedad y al negocio.

Es necesario contar con una escala de valores riesgo para contar con una medida comparativa entre distintos riesgos. Los sistemas de este tipo pueden llegar a ser relativamente simples, sin embargo, la escala debe ser capaz de representar valores que cuenten con un significado para la organización y a su vez sirvan como apoyo en la toma de decisiones.

Para la realización de este tipo de escala, es necesario cumplir con las siguientes características:

- Debe de ser simple de entender y fácil de utilizar.
- Es indispensable contar con todo el espectro de frecuencia de ocurrencia de todos los escenarios potenciales de riesgo.
- Debe describir de forma detallada las consecuencias en cada categoría, las cuales son: daño al personal, a la población, al medio ambiente, al negocio, a los bienes de terceros y a la nación.
- Se debe definir claramente los niveles de riesgo tolerable, ALARP y no tolerables.

Las matrices de riesgo se emplean para realizar una primera calificación del nivel de riesgo, y podría considerarse como la primera etapa para realizar un análisis de tipo cuantitativo. Es necesario tomar en cuenta que las matrices aplican única y exclusivamente para la organización que las desarrolla.

Las matrices de riesgo son gráficas en dos dimensiones en donde se representa la categoría de frecuencia de ocurrencia y la categoría de la

severidad de las consecuencias sobre todos los aspectos (personal, población, medio ambiente, negocio, bienes de terceros y de la nación). Las matrices se encuentran divididas en secciones en las cuales se representan los riesgos tolerables, la región ALARP y los riesgos no tolerables.

Las matrices de riesgo son elementos simples de entender y fáciles de aplicar, asimismo, el costo de realización y aplicación es bajo. Sin embargo, la evaluación de la frecuencia es sumamente subjetiva ya que la escala va de “Muy frecuente” a “Extremadamente raro”; por otro lado, ya que las categorías de frecuencia y de consecuencia son cualitativas generan un alto grado de incertidumbre.

De forma común, las categorías de frecuencia se dividen en seis niveles, los cuales van aumentando de severidad, los cuales son:

Tabla 2.5. Categorías de frecuencia para la aplicación de una Matriz de riesgos.⁶⁴

Categoría de frecuencia	Tipo	Descripción de la frecuencia de ocurrencia
6	Muy frecuente	Ocurre una o más veces por año
5	Frecuente	Ocurre una vez en un periodo entre 1 y 3 años
4	Poco frecuente	Ocurre una vez en un periodo entre 3 y 5 años
3	Raro	Ocurre una vez en un periodo entre 5 y 10 años
2	Muy raro	Ocurre solamente una vez en la vida útil de la planta
1	Extremadamente raro	Evento que es posible que ocurra, pero que a la fecha no existe ningún registro

⁶⁴ Íbid. p.97.

Asimismo, las categorías de consecuencias se dividen de la misma forma que las categorías de frecuencia. Sin embargo, existe una categorización por cada uno de los impactos observados; en otras palabras, las categorías de consecuencia tienen un valor asignado para los daños al personal, daño a la población, impacto ambiental, pérdidas de producción, daños a las instalaciones y daños a bienes de terceros o de la nación. Las categorías de ocurrencia son:

Tabla 2.6. Categorías de consecuencias para la aplicación de una Matriz de riesgos.⁶⁵

Categoría de Consecuencia	Daños al personal	Efecto en la población	Impacto ambiental	Pérdida de producción (Millones de USD)	Daños a la instalación (Millones de USD)	Daños a bienes de terceros o de la nación (Millones de USD)
6	Heridas o daños físicos que pueden resultar en más de 15 fatalidades	Heridas o daños físicos que pueden resultar en más de 100 fatalidades	Fuga o derrame externo que no se pueda controlar en una semana	Mayor de 50	Mayor de 50	Mayor de 50
5	Heridas o daños físicos que pueden resultar de 4 a 15 fatalidades	Heridas o daños físicos que pueden resultar de 15 a 100 fatalidades	Fuga o derrame externo que se pueda controlar en una semana	De 15 a 50	De 15 a 50	De 15 a 50

⁶⁵ Íbid. p.98.

4	Heridas o daños físicos que pueden resultar en hasta 3 fatalidades	Heridas o daños físicos que pueden resultar de 4 a 15 fatalidades	Fuga o derrame externo que se pueda controlar en un día	De 5 a 15	De 5 a 15	De 5 a 15
3	Heridas o daños físicos que generan incapacidad médica	Heridas o daños físicos que pueden resultar en hasta 3 fatalidades. Evento que requiere de hospitalización a gran escala	Fuga o derrame externo que se pueda controlar en algunas horas	De 0.500 a 5	De 0.500 a 5	De 0.500 a 5
2	Heridas o daños físicos reportables y/o que se atienden con primeros auxilios	Heridas o daños físicos reportables y/o que se atienden con primeros auxilios. Evento que requiere de evacuación. Ruidos, olores e impacto visual que se pueden detectar	Fuga o derrame externo que se pueda controlar en menos de una hora (incluyendo el tiempo para detectar)	De 0.250 a 0.500	De 0.250 a 0.500	De 0.250 a 0.500
1	No se esperan heridas o daños físicos	No se esperan heridas o daños físicos. Ruidos, olores e impacto visual imperceptibles	No hay fuga o derrame externo	Hasta 0.250	Hasta 0.250	Hasta 0.250

A continuación y con base en las categorizaciones realizadas se realiza la matriz de riesgo, asignando secciones en las cuales se vean reflejadas tres secciones: la región de riesgos no tolerables, representado en color rojo (A); la región de riesgo ALARP, simbolizado en color amarillo (B); y la región de riesgo tolerable, marcada en color verde (C).

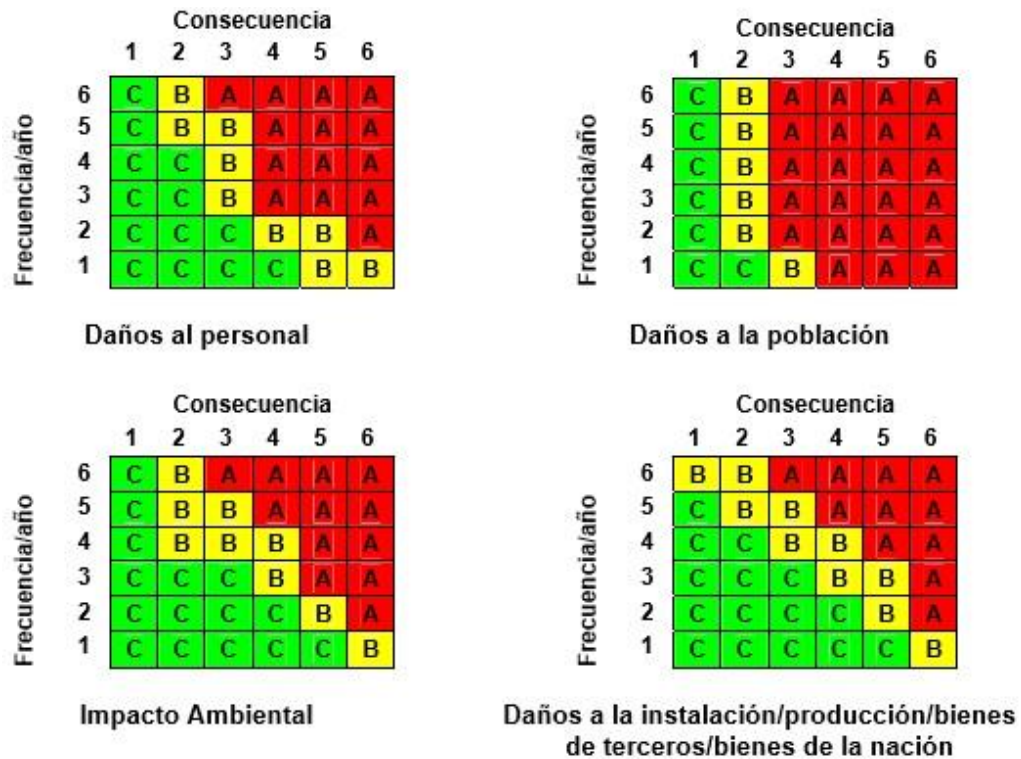


Figura 2.4. Representación de las diferentes Matrices de riesgos.⁶⁶

En la región de riesgo no tolerable se deben tomar acciones inmediatas para generar recomendaciones en el análisis de riesgos. Es importante considerar que el costo no debe considerarse una limitante, asimismo no es posible hacer caso omiso ante estas. En la región de riesgo no tolerable se presentan situaciones de emergencia y es necesario establecer controles temporales inmediatos. Las medidas implementadas en la reducción de riesgos, deben reducir los riesgos de ser posible hasta la región de riesgos tolerables, sin embargo, si éstos se pueden disminuir a la región ALARP es suficiente.

⁶⁶ *Íbid.* p.99.

La región intermedia es la sección de riesgo ALARP. En esta área los riesgos deben estudiarse detalladamente, siendo necesario realizar un estudio costo-beneficio; mediante el cual se debe tomar la correcta decisión de que el riesgo sea tolerable o, en su defecto, proponer recomendaciones pertinentes que ayuden a reducir los riesgos hasta la región de riesgo tolerable.

Dentro de la región de riesgo tolerable, el riesgo es de bajo impacto al proceso y, como su nombre lo indica, es tolerable para el mismo; sin embargo, pudieran tomarse acciones para reducirlo lo más posible. Es indispensable tomar medidas preventivas las cuales ayuden a mantener estos niveles de riesgo dentro de esta región.⁶⁷

2.10.7 Análisis de árbol de eventos (AAE).

El Análisis de Árbol de Eventos es una metodología analítica, la cual ha sido frecuentemente utilizada para categorizar el potencial de un accidente. Es un método cualitativo y gráfico, en el que se muestra los posibles resultados de un accidente a partir de lo que se conoce como un “evento iniciador”, éstos pueden ser ocasionados por la falla de un equipo específico o por algún error humano. Un AAE considera las respuestas de los sistemas de seguridad y de los operadores ante el evento iniciador cuando se determinan las resultantes del accidente potencial. Los resultados son secuencias de accidentes los cuales son consecuencia de un conjunto de fallas o errores; asimismo, describen los posibles resultados del accidente en términos de la secuencia de eventos; esto quiere decir que representa el éxito o la falla de las funciones de seguridad que sigue un evento iniciador. La realización de un AAE es sumamente adecuado para analizar un proceso complejo, el cual posea numerosas capas de seguridad o procedimientos de emergencia para así, ser capaces de responder a eventos iniciadores específicos.

Los AAE son utilizados para localizar los diversos accidentes que pueden desencadenarse dentro de un proceso complejo. Inicialmente se deben identificar individualmente la secuencia de accidentes; las probabilidades de ocurrencia de las combinaciones específicas de las fallas, las cuales puedan

⁶⁷ *Íbid.* passim 93 – 99.

desembocar en accidentes. Los resultados del Análisis de Árbol de Eventos son las secuencias de sucesos en los cuales se considera tanto el éxito como la falla de los sistemas de seguridad que llevan a un resultado definido. Las secuencias descritas por el análisis representan combinaciones lógicas AND de eventos; por consiguiente, estas secuencias pueden ponerse en forma de un modelo de árboles de falla para un análisis incluso más cualitativo. El análisis utiliza los resultados para localizar las debilidades presentes tanto en el diseño como en el procedimiento de operación, y da recomendaciones para minimizar la probabilidad y/o las consecuencias de los accidentes potenciales analizados.

El AAE evalúa el potencial de un accidente, el cual es resultante de un tipo general de falla de algún equipo o alguna etapa del proceso. Este tipo de análisis es un proceso de razonamiento inductivo en donde los encargados de la realización del estudio parten de la observación de un evento iniciador y posteriormente se plantean las posibles secuencias de eventos que llevan a un accidente potencial; explicando tanto el éxito como la falla de cualquiera de las funciones de seguridad relacionadas al accidente mismo cuando éste progresa. Los Análisis de Árbol de Eventos proporcionan una manera sistemática de registrar las secuencias de los accidentes y generan una relación entre los eventos iniciadores y los eventos subsecuentes que derivan en accidentes.

Los AAE son ampliamente utilizados para analizar los eventos iniciadores, que podrían desencadenar en una variedad de resultados. A su vez, se enfocan en la causa inicial de accidentes potenciales y los mecanismos partiendo del evento iniciador y concluyendo en los efectos finales del evento. Cada una de las ramas del árbol representa una secuencia separada del accidente que es un conjunto claramente definido de las relaciones funcionales entre las funciones de seguridad de un evento iniciado.

El AAE de forma inductiva evalúa las consecuencias resultantes provocadas por los eventos iniciadores. El estudio parte del evento iniciador y propone las posibles secuencias de eventos que desembocan en potenciales

consecuencias. De esta forma, permite analizar los posibles escenarios, estableciendo una jerarquía basándose tanto en la gravedad como en la posibilidad de ocurrencia, selecciona situaciones de emergencia para posteriormente evaluarlas de manera cuantitativa y preparar respuestas a las mismas.

Los Árboles de Eventos son diagramas en los que se muestran el desarrollo de las secuencias de accidentes que parten de la ocurrencia del evento iniciador y avanzan dependiendo de la respuesta de las acciones de mitigación, particularmente de los sistemas de seguridad. Asimismo, plantean los resultados que puede causar la ocurrencia del evento iniciador. Los AAE deben realizarse por un grupo de expertos familiarizados con la metodología, siguiendo la base de una serie de pasos propuestos, las cuales son:

1. Identificación de los eventos iniciadores de interés.
2. Selección de un evento iniciador.
3. Recolección de información específica.
4. Identificación de las funciones de seguridad diseñadas para mitigar el evento iniciador y de los fenómenos que afectan la progresión física del evento.
5. Construcción/Modificación del árbol de eventos.
6. Evaluación cualitativa del árbol de eventos.
7. Evaluación cuantitativa del árbol de eventos.
8. Análisis de Sensibilidad.
9. Documentación.

Para la realización de los AAE, es necesario apoyarse en otras metodologías de análisis de riesgos para la identificación de los eventos iniciadores como: HazOp, ¿Qué pasa si? o FMEA; sin embargo, es posible partir de necesidades específicas que el estudio requiera. La identificación de los eventos iniciadores es una parte vital para el desarrollo del AAE. El evento iniciador es considerado como la base del árbol de eventos y puede tener consecuencias muy diferentes dependiendo de las medidas de seguridad del

sistema, de las acciones de los operadores del mismo y de las condiciones del medio. Para que el análisis del árbol de eventos tenga sentido, el evento iniciador no debe estar demasiado cerca de los escenarios finales del árbol. Las diferentes progresiones que vayan resultando de desarrollar el árbol son consideradas como las ramas del árbol que conducen a diferentes estados finales.

Para el AAE es necesario aplicar la metodología adecuada para que el análisis. El estudio lleva a cabo la siguiente estructura:

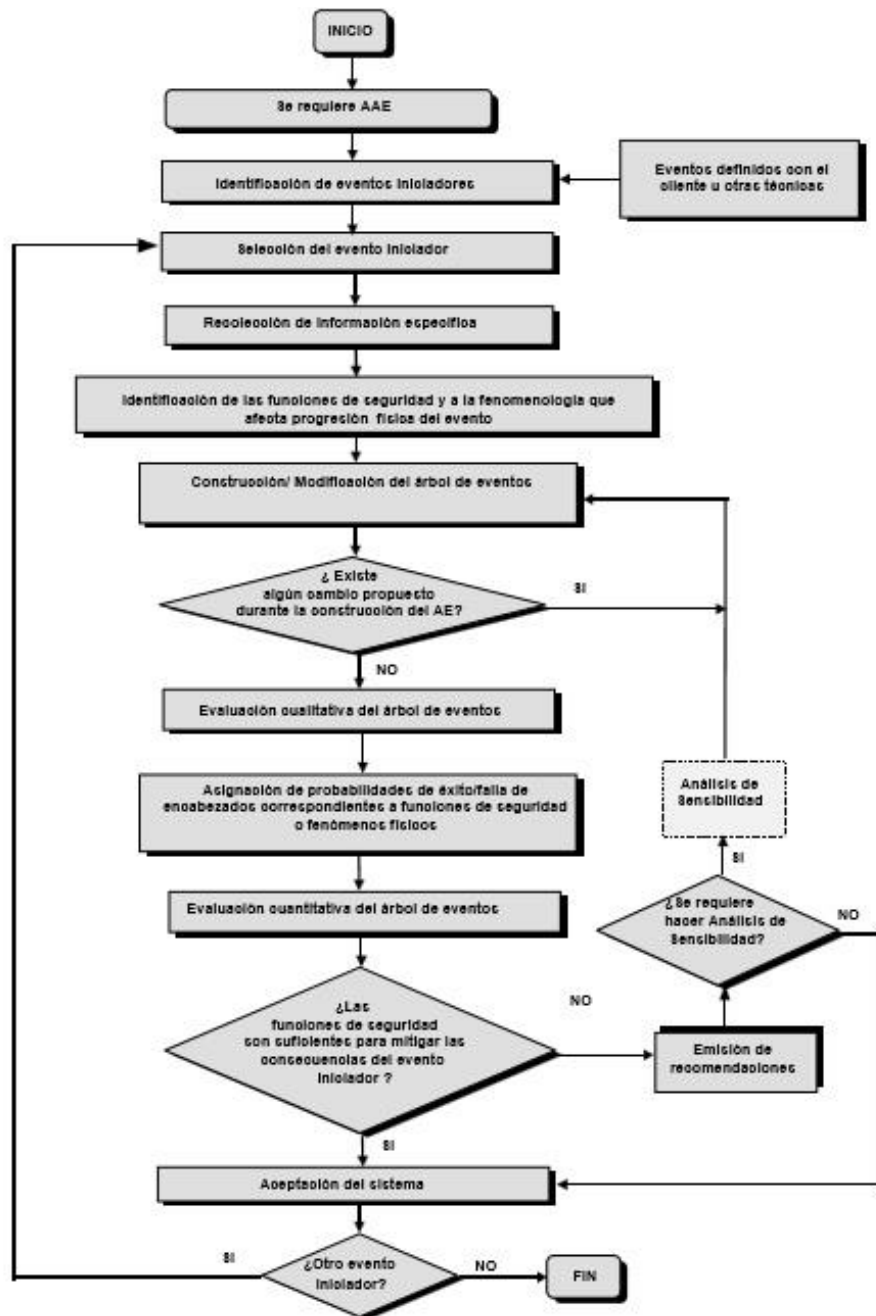


Figura 2.5. Procedimiento para realizar un AAE.⁶⁸

Es vital que la información específica referente al proceso sea lo más actualizada posible. La información puede ser obtenida directamente en la planta por medio de visitas e inspecciones a las instalaciones en las que se realizaría el análisis, asimismo es necesario realizar entrevistas con el personal multidisciplinario presente en la planta para conocer cuáles son las

⁶⁸ *Ibid.* p.104.

respuestas de los mismos ante situaciones de emergencia. Es sumamente necesario contar con diagramas de operación, diagramas de tuberías e instrumentación, diagramas de flujo de proceso, diagramas unifilares, manuales de operación, etc.

El éxito o falla de las funciones de seguridad así como los fenómenos que afectan la progresión física del evento, determinan los posibles estados finales del árbol. Las funciones de seguridad y los fenómenos físicos deben ordenarse en la forma cronológica en la que se espera actúen. Los fenómenos físicos son los sucesos que podrían modificar la progresión del evento iniciador y que puede conducir a estados finales distintos. Las funciones de seguridad, sistemas de seguridad, acciones de operadores, etc. que responden al evento iniciador son las defensas o las protecciones de las plantas contra las consecuencias del evento iniciador.⁶⁹

2.10.8 Análisis de árbol de fallas (AAF).

El Análisis de Árbol de Fallas (AAF) es una metodología deductiva y sistemática, la cual es utilizada para el análisis de la seguridad particularmente aplicable en sistemas complejos en las etapas de diseño, construcción y operación. El AAF representa las fallas en los sistemas empleando el uso de diagramas lógicos y Árboles de Fallas. Algunas de las aplicaciones son:

- Cuantificar la seguridad y confiabilidad de sistemas.
- Localizar los puntos débiles de sistemas.
- Determinar la mejor ubicación de sensores de diagnóstico.
- Establecer políticas de inspección y mantenimiento.
- Generar estrategias de localización de fallas.
- Analizar accidentes.

Un AAF es un diagrama lógico-gráfico en el cual se representan todas las combinaciones creíbles tanto de fallas como de eventos normales que puedan causar un evento indeseable el cual se conoce como “evento tope”;

⁶⁹ *Íbid.* passim 100 – 112.

los eventos tope pueden involucrar desde el paro de algún equipo, hasta incendios e incluso explosiones. Las fallas que se representan en un AAF pueden ser originadas por múltiples razones como: errores humanos, fallas en los equipos, condiciones climatológicas, acciones de sabotaje, etcétera.

Particularmente las fallas de equipo se clasifican en tres categorías:

- Falla primaria: involucra la falla de un componente operando bajo las condiciones normales de diseño u operación.
- Falla secundaria: involucra la falla de un componente operando fuera de las condiciones normales de diseño u operación.
- Falla de comando: involucra la operación inadecuada del componente, esto es, fuera de lugar o del tiempo de operación normal. Se debe interpretar como la falla del comando que controla la operación del componente.

Para realizar un Análisis de Árbol de Fallas es sumamente importante realizar una clara determinación de la interconexión entre los eventos. Para realizar correctamente esta determinación es necesario considerar los conceptos de: efectos de falla, modo de falla y mecanismos de falla. En otras palabras, los conceptos contemplan las consecuencias que originan la falla de un componente, en donde se plantean las especificaciones de cómo un equipo deja de funcionar y, por último, considera la forma en que un modo de falla puede ocurrir, especificando el por qué de la falla.

Para el AAF es necesario aplicar la metodología adecuada para el análisis. El estudio lleva a cabo la siguiente estructura:

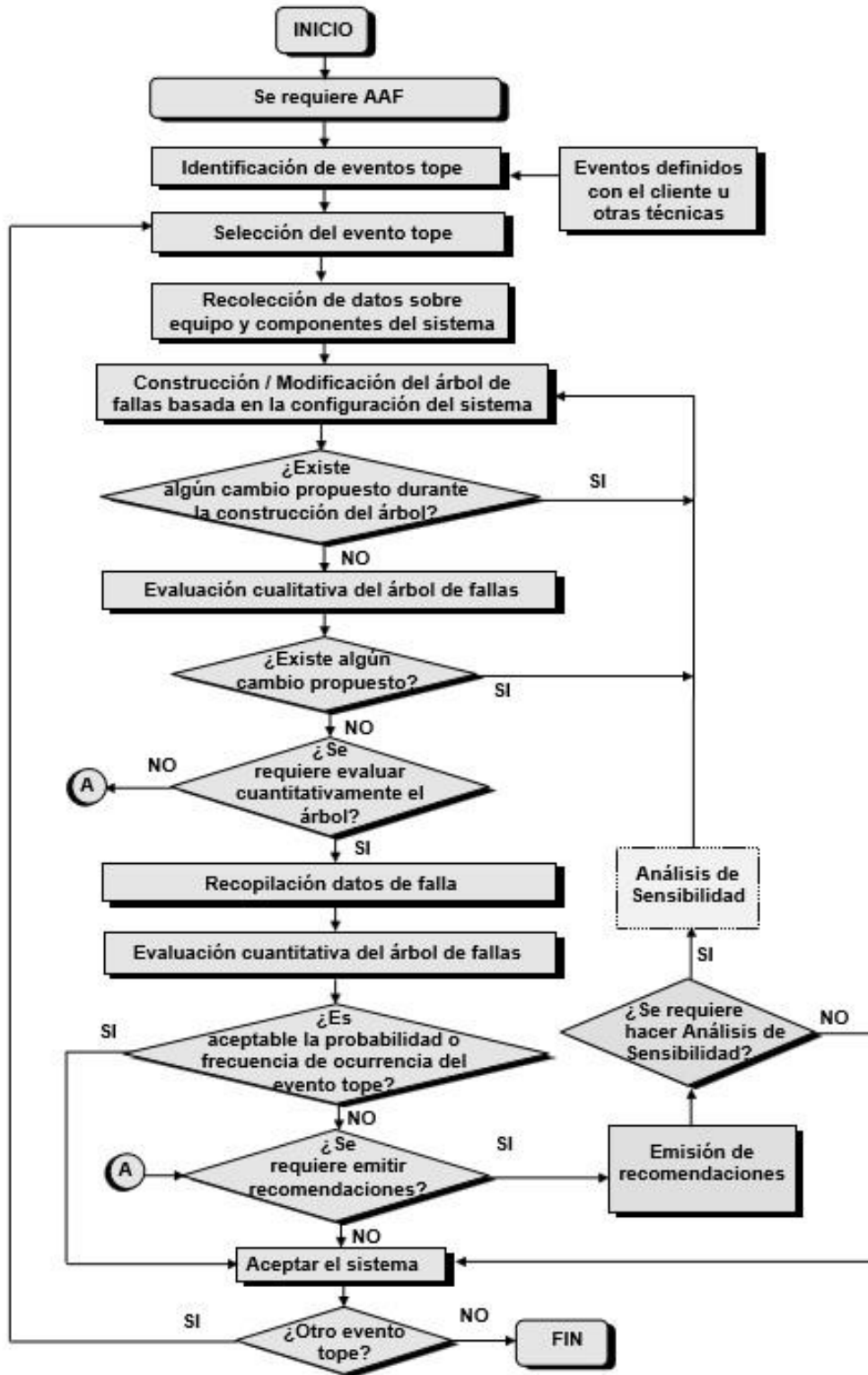


Figura 2.6. Procedimiento para realizar un AAF.⁷⁰

⁷⁰ *Íbid.* p.124.

Para la realización de un Análisis de Árbol de Fallas es necesario la aplicación de una serie de pasos propuestos, las cuales son:

- Identificación de eventos tope.
- Selección del evento tope.
- Recolección de datos sobre el equipo y componentes del sistema.
- Construcción/Modificación del árbol de fallas basado en la configuración del sistema.
- Evaluación cualitativa del árbol de fallas.
- Evaluación cuantitativa del árbol de fallas.
- Análisis de Sensibilidad.
- Documentación.

El evento tope generalmente está relacionado con una falla catastrófica del sistema sujeto al análisis. La información obtenida del AAF depende estrechamente de la selección del evento tope, influyendo de forma directa sobre la estructura del árbol. Los eventos tope pueden ser identificados claramente por medio de la aplicación de metodologías cualitativas de análisis de riesgos, como HazOp, ¿Qué pasa si?, etcétera; asimismo, los encabezados del Análisis de Árbol de Eventos o las necesidades específicas pueden ayudar a la localización de los eventos tope.

Es necesario recopilar información para definir los límites del sistema. La información relacionada con el proceso debe ser lo más actualizada posible, por lo que cierta información debe ser obtenida de visitas e inspecciones del área en donde se llevará a cabo el estudio; asimismo, es necesario realizar entrevistas al personal relacionado a la operación del equipo, esto para conocer los componentes del sistema y las acciones aplicadas sobre el equipo. Del mismo modo, es necesario realizar la verificación de los programas de mantenimiento. Es necesario contar con la documentación necesaria, es decir: diagramas de operación, diagramas de tuberías e instrumentación, diagramas de flujo de proceso, diagramas unifilares, manuales de operación, etcétera; y por último, y de forma complementaria, un equipo de personal multidisciplinario, incluyendo trabajadores del área


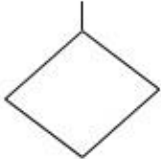
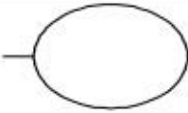
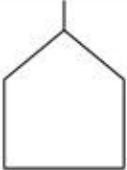
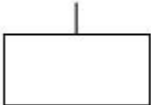
eléctrica, mantenimiento, mecánica, diseño, seguridad, ingeniería de procesos, etcétera.

Se debe tomar en cuenta la configuración del sistema, es necesario representar las secuencias de fallas que desembocan en un evento tope. Existen cuatro reglas fundamentales para la realización de un AAF, las cuales son:

- Regla declaración del evento: escribir dentro del símbolo del evento el enunciado que describa de manera precisa y concreta las causas que provocan la falla. Este enunciado debe de responder a las cuestiones en “dónde” y en “qué” parte del sistema se encuentra la desviación o falla. Se permiten abreviaciones de palabras pero no de ideas.
- Regla “no milagros”: si la operación normal del sistema propaga la secuencia de la falla, se supone que el equipo funciona normalmente. No se debe suponer que un evento inesperado conocido como “milagro”, fuera de la función normal del equipo, evite la secuencia de la falla.
- Regla compuerta completa: todos los eventos de una compuerta se deben definir antes de continuar con el desarrollo de otra compuerta.
- Regla no compuerta a compuerta: las compuertas no deben ser directamente unidas a otras compuertas sin que exista entre ellas un evento intermedio. El evento intermedio debe contener la descripción de las entradas de la compuerta


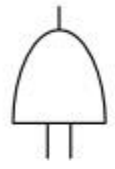
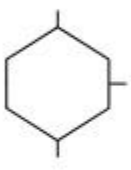

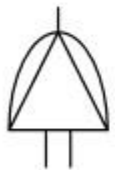
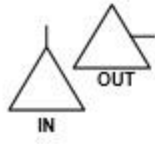
Para la realización de un AAF es necesario aplicar la correcta simbología de eventos, tanto para la construcción como para las compuertas empleadas, los cuales son:

Tabla 2.7. Símbolos de eventos utilizados en la construcción de árboles de fallas.⁷¹

	<p>Evento Básico.</p> <p>Describe una condición normal o de falla en el árbol (falla de equipo, errores humanos, etc.). Los eventos básicos definen el nivel de resolución del árbol.</p>
	<p>Evento no desarrollado.</p> <p>Falla específica en la cual no se han desarrollado las causas de ocurrencia de este evento por falta de información, o bien, por considerarse poco relevante.</p>
	<p>Evento Condicionante.</p> <p>Indica una condición o restricción aplicada a cualquier compuerta lógica.</p>
	<p>Evento Externo.</p> <p>Evento tipo "switch" (también conocido como evento casa). A este evento sólo puede asignársele el valor de "verdadero" (el evento ocurre), o bien un valor de "falso" (el evento no ocurre).</p>
	<p>Evento Intermedio.</p> <p>Falla que describe la señal de salida de una compuerta lógica.</p>

⁷¹ íbid. p.127.

Tabla 2.8. Símbolos de compuertas utilizados en la construcción de árboles de fallas.⁷²

	<p>Compuerta "OR". El evento de salida ocurre si uno o más de los eventos de entrada ocurren.</p>
	<p>Compuerta "AND". El evento de salida ocurre si todos los eventos de entrada ocurren.</p>
	<p>Compuerta "INHIBIT". Existe sólo un evento de entrada, pero para que el evento de salida ocurra debe cumplirse una condición específica.</p>
	<p>Compuerta "EXCLUSIVE OR". El evento de salida ocurre sólo uno de los eventos de entrada ocurre (no ambos).</p>
	<p>Compuerta "PRIORITY AND". El evento de salida ocurre sólo si los eventos de entrada ocurren con una secuencia específica</p>
	<p>Símbolos de TRANSFERENCIA. Son usados como una forma conveniente de evitar duplicados.</p>

Se debe construir para un modo de falla específico, el cual es el evento tope seleccionado; de la misma forma, los mecanismos de falla no son exhaustivos, sólo se deben incluir fallas creíbles, mismas que son

⁷² íbid. p.128.

determinadas tanto por el evento tope como por el juicio de los analistas. La elaboración se realiza mediante el análisis de las causas inmediatas que originan el evento tope. Los eventos intermedios se unen mediante la utilización de las compuertas lógicas; mientras que los eventos básicos y no desarrollados determinan el nivel de resolución del árbol de fallas. Las modificaciones del árbol dependen directamente de las revisiones realizadas conforme avanza la construcción del mismo. Pueden agregarse o borrarse eventos, o bien, modificarse la estructura del árbol.⁷³

2.10.9 Análisis de consecuencias (AC).

Un Análisis de Consecuencias (AC) es una evaluación cuantitativa de la evolución espacial y temporal de las variables físicas representativas de los fenómenos peligrosos en los que se ven inmiscuidas sustancias peligrosas; de la misma forma, analiza los posibles efectos sobre el personal, los bienes y el medio ambiente. El fin del estudio es estimar la naturaleza y la magnitud del daño. El AC permite valorar los posibles daños debido a la pérdida de control relacionada a sustancias peligrosas, por lo que existen Análisis de Consecuencias relacionados con incendios, explosiones y nubes tóxicas. Permite estimar la medida de los efectos esperados de la ocurrencia de un evento potencialmente peligroso.

La diversidad de los accidentes a considerar recae particularmente en las instalaciones en las que se manejen sustancias peligrosas. Los accidentes pueden producir fenómenos indeseables para el personal, el ambiente o los bienes, estos fenómenos pueden ser de tipo mecánico, de tipo térmico o de tipo químico.

El procedimiento para realizar un Análisis de Consecuencias inicia con la selección y la especificación de escenarios de los accidentes, en donde se obtiene la lista de escenarios a analizar y se llenan los formatos para especificar y documentar los escenarios del accidente. A continuación, se determina el término fuente, planteando los modelos para la liberación de sustancias, se debe establecer la cantidad de masa liberada, así como el

⁷³ *Íbid.* passim 122 – 135

flujo de liberación y de la fase de liberación. Posteriormente es necesario determinar la forma de dispersión del material planteando los modelos de dispersión del material, implicando la obtención de la longitud, del área de las zonas de riesgo y el amortiguamiento por toxicidad; asimismo es necesario calcular la longitud y el área de la nube inflamable hasta la concentración del límite inferior de inflamabilidad y el 0.5 límite inferior de inflamabilidad. Es necesario determinar la intensidad de la radiación y la onda de presión, planteando los modelos de incendios o de explosiones; trazando la longitud y el área de las zonas de riesgo y amortiguamiento por intensidad de radiación térmica; del mismo modo, se debe obtener la longitud y el área de las zonas de riesgo y amortiguamiento por onda de presión. A continuación se requiere cuantificar los posibles daños, planteando los modelos de consecuencias, es necesario estimar los posibles daños a personas, ambiente y negocio a partir de las longitudes áreas perfiles de concentración de intensidad de radiación y onda de presión. Por último, se debe documentar el análisis de consecuencias, planteando las recomendaciones y realizando la estructura del informe final.

El AC debe ser realizado por un responsable técnico, éste, debe trabajar colectivamente con el líder del análisis de riesgos y con el responsable técnico-operativo de la instalación. En conjunto definen una lista de posibles escenarios de accidente, las cuales pueden provenir de distintos medios como son: la aplicación de otras metodologías de análisis de riesgos cualitativas como HazOp, ¿Qué pasa sí?, Lista de verificación, etcétera; de la misma forma pueden ser obtenidas de metodologías cuantitativas como AAF, AAE; asimismo es necesario aplicar las definiciones como Peor Caso; por último, pueden surgir de necesidades particulares provenientes de otros estudios, así como de peticiones especiales o de la inquietud de conocer las afectaciones relacionadas de un escenario de riesgos.

El responsable técnico de la elaboración del estudio, en conjunto con el personal multidisciplinario encargado de la elaboración del análisis, deben especificar cada escenario de riesgo de la lista, la cual debe contener una

clave única, un nombre asignado y una referencia al origen del escenario. Especificar cada escenario implica recaudar y documentar toda la información posible para la realización de los cálculos y simulaciones requeridos para la realización del AC. La selección de los escenarios de accidente depende estrechamente del objetivo del AC. Un Análisis de Consecuencias se puede realizar tanto para los requerimientos de normatividad, como para los empleados por otros estudios como los relacionados con la seguridad física o para diseñar los planes de emergencia externos e internos. Para esos casos, la definición de “peor caso” debe aplicarse conjuntamente con la definición de caso alterno, dentro de los cuales pueden encontrarse los casos considerados como más probables.⁷⁴

2.11 Identificación de peligros

La identificación de peligros implica la revisión de forma sistemática del caso del cual se encuentra realizando el estudio con el principal propósito de identificar todos los peligros presentes en el sistema. De la misma forma, analiza todas las posibles desviaciones que permitan que estos peligros se puedan salir de control, abriendo camino a la posibilidad de generar escenarios de riesgos. Existen diferentes metodologías para realizar análisis de riesgos, las cuales se pueden agrupar en tres diferentes áreas:

- Metodologías comparativas, como la Lista de Verificación.
- Metodologías fundamentales, las cuales consisten en la aplicación de metodologías estructuradas en las que se emplean grupos multidisciplinarios donde cada miembro del grupo aplica sus conocimientos para desarrollar el análisis del sistema a estudiar, en el cual se identifican los peligros, previniendo las posibles formas en las que estos se puedan salir de control. Algunos ejemplos de estas metodologías son: ¿Qué pasa si? (What If?), Análisis de Modos de Fallas y sus Efectos (FMEA) y Análisis de Peligros y Operabilidad (HazOp).

⁷⁴ *Íbid.* passim 141 – 162

- Razonamiento inductivo / deductivo, los cuales emplean métodos estadísticos para la realización de los análisis. Por ejemplo; Análisis de Árbol de Eventos (AAE) y el Análisis de Árbol de Fallas (AAF).⁷⁵

2.12 Jerarquización de riesgos.

Para realizar la identificación de peligros en cualquier proceso es necesario plantear todos los posibles escenarios de riesgo potenciales. Para poder realizar la correcta aplicación de las metodologías cualitativas se debe identificar correctamente tanto la frecuencia de ocurrencia del evento como cada una de las posibles consecuencias que afecten al personal, al medio ambiente, a la comunidad, a la producción y/o a las instalaciones, las cuales se deben documentar en la columna correspondiente, asimismo deben ser valoradas de acuerdo con los criterios señalados en la matriz de riesgos, Por otra parte, la aplicación de metodologías para la realización de análisis cuantitativos se reserva para sistemas complejos o en casos en los que el analista considere pertinente su aplicación, debido al elevado riesgo obtenido en análisis previos u observados.

Para la realización de análisis cuantitativos es absolutamente necesario realizar el cálculo de la frecuencia de ocurrencia del evento (F), y la severidad de las consecuencias resultantes (C).⁷⁶

2.13 Selección de las metodologías de análisis.

Para realizar una correcta selección de la aplicación de alguna de las metodologías es necesario considerar ciertos aspectos, como son:

- Considerar ya sea la normatividad vigente aplicable o las condiciones y compromisos contractuales acordados.
- Tomar en cuenta los objetivos del estudio, si únicamente se necesitan identificar las desviaciones respecto a alguna determinada normatividad o de

⁷⁵ Íbid. p.16.

⁷⁶ Ídem.

las prácticas recomendadas, puede bastar con realizar una lista de verificación.

- Estudiar las fases de desarrollo del sistema. Para fases tempranas es necesario realizar análisis menos detallados, debido a que no se cuenta con la totalidad de la información técnica requerida para la aplicación de otro tipo de evaluación.
- Conocer tanto el tipo de sistema como el peligro analizado. Se debe considerar que algunos sistemas poseen un grado de complejidad más elevada, el cual puede sobrepasar la capacidad de algunas metodologías.
- Analizar el nivel de potencial de severidad. Para los escenarios con niveles de severidad altos de consecuencia es completamente necesario la implementación de metodologías más detalladas.
- Es necesario tomar en cuenta los requisitos de experiencia, entrenamiento y número de horas dedicadas en la realización del estudio. Se debe considerar que aplicar una metodología más sencilla de forma adecuada puede arrojar mejores resultados que la implementación de metodologías complejas de forma deficiente, mientras se cumpla con el objetivo del estudio.
- Es indispensable considerar el acervo de la información, debido a que algunas metodologías requieren una mayor cantidad de datos, asimismo requieren de datos más específicos.
- Se debe tomar en cuenta la necesidad que exista de modificación y/o actualización de los análisis. Dependiendo de las metodologías seleccionadas la actualización o modificación del análisis puede resultar más sencilla que en otras.

La metodología empleada para la elaboración de los análisis de riesgos debe ser la adecuada para cumplir con las siguientes características:

- Debe ser técnicamente defendible.
- Debe permitir identificar el peligro que lo origina y valorar la importancia del riesgo, así como la forma en la que este debe ser controlado.
- Debe ser trazable, reproducible y verificable.

Las metodologías son aplicables en las diferentes etapas de vida de un proceso, de la misma forma, no solamente puede ser aplicada una en específico. Sin embargo no todas las metodologías son aplicables en estas etapas.⁷⁷

Tabla 2.9. Típico de las metodologías de acuerdo a la etapa de vida del proceso. ⁷⁸

Etapa	Lista de verificación	¿Qué pasa si?	¿Qué pasa si?/Lista de verificación	FMEA	HazOp	AAE	AAF	AC
Investigación y desarrollo		•	•					
Diseño conceptual	•	•	•					
Operación de planta piloto	•	•	•	•	•	•	•	•
Ingeniería de detalle	•	•	•	•	•	•	•	•
Construcción y arranque	•	•	•					
Operación rutinaria	•	•	•	•	•	•	•	•
Expansión o modificación	•	•	•	•	•	•	•	•
Desmantelamiento	•	•	•					

2.14 Normatividad.

Las normas más utilizadas son las siguientes:

- OHSAS 18000
OHSAS 18001 (Occupational Health and Safety Assessment Series, Sistemas de Gestión de Seguridad y Salud Ocupacional) se refiere a una serie de especificaciones sobre la salud y seguridad en el trabajo, materializadas por British Standards Institution (BSI) en la OHSAS 18001 Y OHSAS 18002. OHSAS 18001 es una especificación internacionalmente aceptada que define los requisitos para el establecimiento, implantación y

⁷⁷ Íbid. p.17.

⁷⁸ Ídem.

operación de un Sistema de Gestión en Seguridad y Salud Laboral (SGSSL) efectivo.

Un SGSSL permite identificar peligros, prevenir riesgos y promover las medidas de control necesarias en el lugar de trabajo para prevenir accidentes. Una auditoría de SGSSL independiente dice a los accionistas que se cumple con un número determinado de requisitos legales, dándoles confianza en una organización en cuestión. La implementación de OHSAS 18001 demuestra un claro compromiso con la seguridad del personal y puede contribuir a que estén más motivados, sean más eficientes y productivos. Menos accidentes significa un tiempo de inactividad menos caro para una organización. OHSAS 18001 además mejora la posición de responsabilidad frente al seguro. Unas auditorías regulares ayudarán a supervisar continuamente y mejorar el funcionamiento en materia de Seguridad y Salud en el lugar de trabajo. OHSAS 18001 se ha escrito para ser integrada sin problemas con otras normas de sistemas de gestión tales como ISO 9001 e ISO 14001.

- ISO 9000

La Organización Internacional para la Estandarización (ISO) es una federación de alcance mundial integrada por cuerpos de estandarización nacionales de 153 países, uno por cada país. La ISO es una organización no gubernamental establecida en 1947. Todos los trabajos realizados por la ISO resultan en acuerdos internacionales los cuales son publicados como Estándares Internacionales.

La Norma ISO 9001:2015 se destaca la intención de enfatizar y guiar el Enfoque basado en Riesgos, introduciendo éste en varias cláusulas como el enfoque a procesos, en el liderazgo y especialmente en la planificación. La norma establece una serie de principios que deben ser satisfechos para hacer una gestión eficaz del riesgo, de forma que se desarrollen, implementen y si es aplicable, se integren con el resto de los sistemas de gestión disponibles en la empresa.

- NMX-SAST-001-IMNC-2008

La Normatividad Mexicana es una serie de normas cuyo objetivo es regular y asegurar valores, cantidades y características mínimas o máximas en el diseño, producción o servicio de los bienes de consumo entre personas morales y/o personas físicas, sobre todo los de uso extenso y de fácil adquisición por parte del público en general, poniendo atención en especial en el público no especializado en la materia.

La norma NMX-SAST-001-IMNC-2008 de Gestión Seguridad y Salud en el Trabajo, establece los requisitos de control y monitoreo de las estrategias de prevención de riesgos laborales y tiene como principal objetivo reducir el impacto de los accidentes en el lugar de trabajo.

De la misma forma, otras normas e instituciones que ayudan ampliamente en el análisis de riesgos, son:

- AIA American Insurance Association
- EPA Environmental Protection Agency
- NOM-030-STPS-2009
- NOM-019-STPS-2011
- ISO 31000:2009

CAPÍTULO III

CASO DE ESTUDIO

3.1 Introducción

La gasificación es un proceso termoquímico en el que un sustrato carbonoso (carbón, biomasa, restos agrícolas, plástico) es transformado en un gas combustible mediante una serie de reacciones, principalmente la reacción de pirólisis, que ocurren en presencia de un agente gasificante (generalmente aire) en un ambiente pobre en oxígeno. El sustrato carbonoso de origen y el agente gasificante son los parámetros que determinan el mayor o menor contenido en energía (poder calorífico) del gas.

Las principales aplicaciones de la gasificación se basan en la utilización del gas producido y la energía térmica que genera el propio proceso, además el calor puede transformar el agua en vapor, el cual puede producir electricidad mediante un generador eléctrico conectado a la turbina, generando procesos conocidos como “cogeneración”.

El proceso de gasificación se divide en dos fases:

- Pirólisis (descomposición térmica o volatilización)
Biomasa + calor → char + gases
- Gasificación
Char + agente gasificante + calor → gases + cenizas

Además, se incluye una fase previa de calentamiento de la biomasa utilizada para ajustar la humedad de este combustible.

El proceso se desarrolla en gasificadores. Una vez calentada la biomasa de alimentación y cuando la temperatura es superior a 400°C tiene lugar la pirólisis dando parte a un residuo carbonoso o char, formado principalmente por carbono y gases condensables (hidrocarburos ligeros y pesados) y no condensables (Metano, vapor de agua, Monóxido de Carbono, Hidrógeno y Dióxido de Carbono).

Cuando la temperatura del char supera los 700 °C, Tienen lugar las reacciones propias de gasificación, que se dividen en reacciones heterogéneas (el char reacciona con oxígeno, vapor de agua, dióxido de carbono e hidrógeno) y homogéneas (los gases reaccionan entre sí). Aquí se produce la mezcla del gas final.

Para obtener un buen rendimiento de la mezcla gaseosa resultante (contenidos altos en hidrógeno y monóxido de carbono) es necesaria una temperatura mínima de 700 a 800°C. Para evitar problemas técnicos debidos a la fusión y la aglomeración de cenizas, se suele trabajar a temperaturas entre 800 y 1.400°C, pero no por encima de 1500 °C porque aparecerían problemas técnicos. El margen de presiones puede oscilar entre 1 y 30 atmósferas.

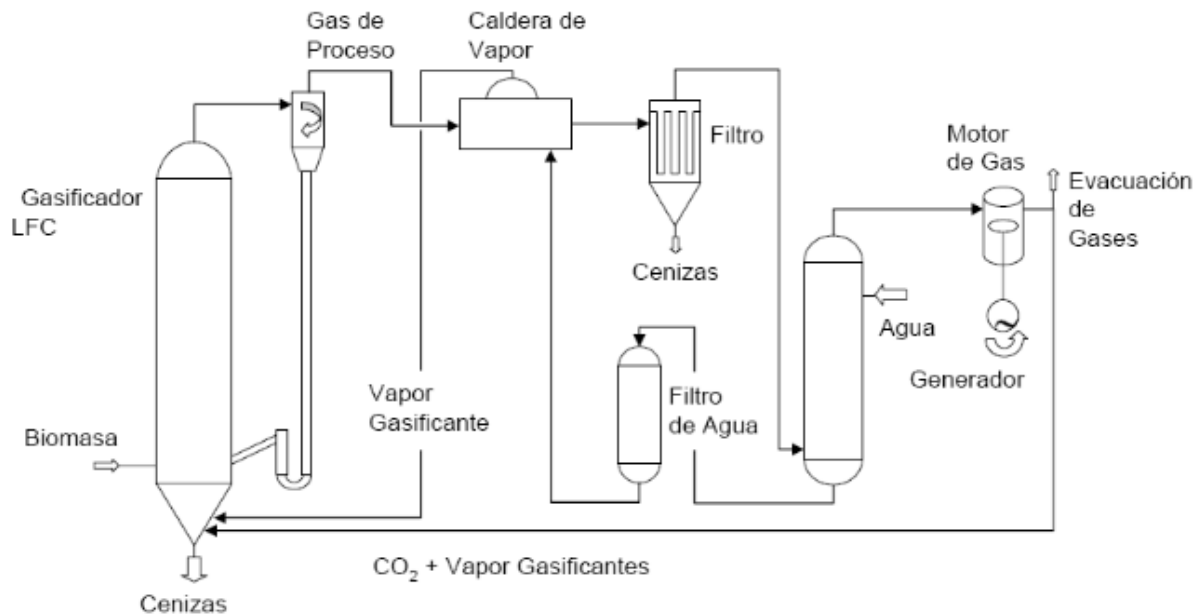


Figura 3.1. Representación general del proceso de gasificación.⁷⁹

Por otro lado, una variante de la pirólisis, llamada pirólisis flash, llevada a 1000°C en menos de un segundo, tiene la ventaja de asegurar una gasificación casi total de la biomasa. De todas formas, la gasificación total puede obtenerse mediante una oxidación parcial de los productos no gaseosos de la pirólisis.

⁷⁹ AgroWaste. (2004). Gasificación. España: AgroWaste. p.2.

Existe una gran variedad de combustibles que pueden ser empleados para gasificación (carbón, madera, restos agrícolas, etcétera) y todos ellos difieren mucho en sus propiedades químicas, físicas y morfológicas, lo que supone que deba ajustarse la gasificación a cada uno de ellos y, en consecuencia, requieren diferentes diseños del reactor e incluso distintas tecnologías de gasificación. Por esta razón, se desarrollan y comercializan gran número de gasificadores diferentes, todos ellos orientados a manejar las propiedades específicas de un combustible determinado o de una variedad de combustibles.

La gasificación puede ser clasificada atendiendo a los siguientes criterios:

- Agente gasificante: Aire, oxígeno, vapor de agua, CO₂, H₂.
- Presión y temperatura del reactor.
- Tipo de reactor: Lecho fijo o móvil y lecho fluidizado. Transporte neumático, sistemas combinados o circulantes, horno rotatorio, etc.
- Forma de suministrar el calor: Método directo o indirecto.
- Forma de alimentar: alimentación superior o alimentación inferior.
- Forma de separar las cenizas.

3.2 Gasificadores.

Se trata de reactores cilíndricos que se caracterizan por el tipo de combustible sólido utilizado y la manera en la que el combustible y el aire entran al gasificador produciendo la reacción deseada.

A continuación se indican los más utilizados:

- Gasificador Updraft
De tipo lecho fijo o móvil donde las corrientes de combustible y agente gasificante circulan en sentido opuesto, en contracorriente.
En él, se logran altas eficiencias, aunque por otro lado este sistema de gasificación posee algunas desventajas como son el alto contenido de alquitrán del gas producido y la capacidad marginal que tiene en su carga, y por ende la imposibilidad de generación de gas continuo, que redundaría en dificultades para la utilización en motores de combustión interna.

Los gasificadores de lecho móvil se utilizan para biomásas trituradas o «peletizadas» con dimensiones de uno a diez cm. El de lecho móvil en contracorriente es el reactor más simple.

- Gasificador Downdraft

De tipo lecho fijo o móvil donde las corrientes de combustible y agente gasificante circulan el mismo sentido.

Las dificultades que da esta configuración es el contenido de cenizas y humedad en el gas producido y por otra parte que requiere de un tiempo prolongado de encendido (20 - 30 min).

La principal desventaja de este reactor frente al updraft es la alta temperatura del gas de salida, lo que origina una eficiencia más baja.

Por otro lado cabe destacar que a pesar de que el gas obtenido tiene una baja calidad energética tiene la ventaja de tener un contenido bajo de alquitranes. Además, este tipo de configuración es más aceptable para aplicaciones en motores de combustión interna y turbinas de gas.

- Gasificador Crossdraft

Si las corrientes de combustible (biomasa) y agente gasificante son perpendiculares entre sí.

- Gasificadores de lecho fluidizado

En este reactor el agente gasificante mantiene en suspensión a un inerte y al combustible hasta que las partículas de éste se gasifican y convierten en cenizas volátiles y son arrastradas. El secado, la oxidación, la pirolisis y la reducción tienen lugar en la misma área. Los lechos fluidizados son gasificadores versátiles y no son sensibles a las características del combustible, exceptuando el tamaño. Los lechos fluidizados tienen altos niveles de transferencia de masa y energía y proporciona una buena mezcla de la fase sólida, lo que significa que los niveles de reacción son altos, el tiempo de residencia de las partículas es pequeño y la temperatura es más o menos constante en el lecho.

Los gasificadores de lecho fluidizado se pueden clasificar, además, atendiendo a la variable de operación “velocidad de fluidización”, en lecho

fluidizado burbujeante (velocidad de fluidización de 1 - 2 m/s) y en lecho fluidizado circulante (velocidad de fluidización mayor de 5 m/s).

Tiene la ventaja de que el volumen de gas producido por unidad de volumen del reactor es superior al de los gasificadores de lecho móvil, lo que se traduce en un menor precio.

- Gasificadores rotatorios

El funcionamiento de este tipo de reactor presenta similitudes con los gasificadores de lecho móvil, sobre todo por lo que respecta a la parte mecánica que facilita el desplazamiento de los sólidos lo que hace más fácil la operación en continuo del sistema.

Ofrecen algunas ventajas como tiempos cortos para el procesamiento en comparación con los reactores de lecho fijo y el procesamiento de materias primas con un rango amplio de propiedades físico - químicas. Debido a la baja temperatura de salida de gases, el rendimiento térmico es bueno, pero se producen alquitranes y aceites por destilación del sólido.

Para elegir el proceso de gasificación hay que tener en cuenta factores como: capacidad de procesamiento, características de la biomasa a gasificar, utilización de gas, facilidad de construcción y operación del gasificador, etc.

Todos los tipos de gasificadores pueden producir gas pobre para combustión, pero por razón de sencillez se prefieren los gasificadores de tiro directo en los pequeños sistemas (por debajo de una potencia térmica de 1 MW), mientras que los gasificadores de lecho fluidizado son apropiados para potencias superiores.

Como producto del proceso se obtiene un gas pobre muy dependiente de las condiciones en las que se realiza la gasificación, que suele ser rico en monóxido de carbono(18% a 20%) y/o hidrógeno (20% a 24%), con contenido menor de Dióxido de Carbono, Metano y otros hidrocarburos.

El gas pobre producido puede utilizarse para la síntesis de un alcohol muy importante, el Metanol, que podría sustituir las gasolinas para la alimentación de los motores de explosión (carburol) .Además, esta tecnología genera una serie de subproductos que pueden clasificarse según su estado:

Efluentes sólidos: son compuestos de carbono fijo y cenizas. Dado su alto contenido en carbono pueden tener distintos fines:

- Cenizas exhaustadas: uso en agricultura como fertilizante.
- Cenizas no exhaustadas: pueden recircularse al gasificador y emplearse como material filtrante.

Representación esquemática de entrada, salida y residuos de un gasificador.

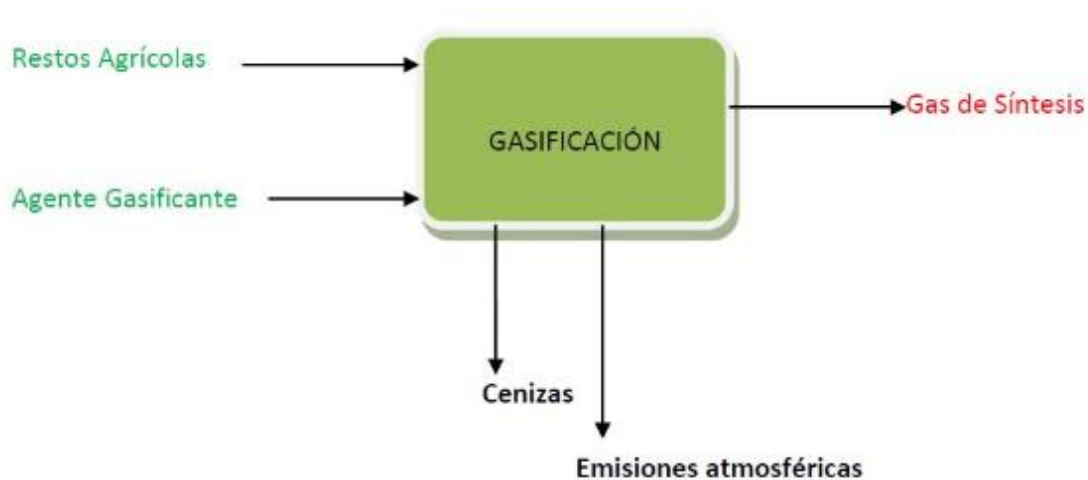


Figura 3.2. Esquema de entradas y salidas de un gasificador.⁸⁰

La mayoría de los gasificadores que funcionan comercialmente, en la actualidad se utilizan para la producción de calor, más que para combustible de motores de combustión interna, debido a sus menores exigencias en cuanto al valor calorífico el gas y al contenido de alquitrán.

Para el adecuado funcionamiento de la gasificación es importante tener en cuenta las propiedades del combustible utilizado y entre ellas se encuentran:

- a) Contenido energético: en base a su poder calorífico inferior, siendo mejor el combustible cuanto mayor sea el Poder Calorífico Inferior.
- b) Contenido de humedad: un alto contenido de humedad reduce la eficiencia térmica porque el calor se emplea para eliminar el agua y, en consecuencia,

⁸⁰ Ibid. p.2.

esta energía no está disponible para las reacciones de reducción y para la transformación de la energía térmica en energía química del gas.

- c) Contenido de cenizas y composición química de éstas: si los combustibles poseen del orden del 12% de cenizas se pueden producir escorias y ocasionarse problemas de acumulación en el gasificador que terminen por bloquear el reactor. Este problema no ocurre si los combustibles tienen un contenido en cenizas inferior al 5 o 6% y dependiendo de la temperatura de fusión puede ocurrir o no para aquellos combustibles con cenizas entre el 6 y el 12%.
- d) Tamaño de partícula: un material que no tenga un tamaño aceptable puede ocasionar problemas de circulación o alta proporción de polvo si es pequeño, o bien, problemas de canalización del gas si es excesivamente grande. De todas formas el diseño de las plantas se ajusta al tipo de combustible y se puede aplicar algún tipo de pretratamiento a la alimentación.

Densidad aparente: si el material es de alta densidad aparente tiene ventajas porque ello representa que tiene un alto valor de energía por volumen. En caso contrario se puede generar un caudal insuficiente de gas y que sea necesario grandes espacios para su almacenamiento. Unas densidades aparentes inadecuadas se pueden mejorar mediante elaboración de briquetas o gránulos. El rendimiento del proceso varía dependiendo de todos los aspectos considerados anteriormente, en el rango de 70 - 80%.

3.3 Procesos de gasificación del carbón.

La gasificación del carbón es un proceso que transforma el carbón desde su estado sólido, en un combustible gaseoso (compuesto fundamentalmente por CO e H₂), también conocido como syngas, mediante una oxidación parcial, al que hay que retirar una serie de sustancias indeseables, como son los compuestos de Azufre y la ceniza del carbón original, mediante técnicas bien desarrolladas. El resultado es una fuente energética gaseosa, limpia y transportable. Cuando un carbón se quema, su energía química se libera en forma de calor; el Oxígeno del aire se combina con el Carbono y el Hidrógeno del carbón, produciendo Dióxido de Carbono, agua y

energía térmica. En condiciones normales, cuando hay aire en exceso, toda la energía química del carbón se convierte en calor y el proceso normal es la combustión; sin embargo, si el Oxígeno disponible se reduce, se libera menos calor del carbón y en la reacción aparecen nuevos productos gaseosos, como el Hidrógeno, Monóxido de Carbono y Metano que contienen también energía química. Si el objetivo es maximizar la energía química de los subproductos gaseosos, parece lógico continuar con la reducción del Oxígeno disponible; no obstante, se alcanza un punto a partir del cual un porcentaje del carbón ya no se convierte en gas, quedando sin reaccionar parte del Carbono y dando lugar a un proceso ineficiente. Cuando el suministro de Oxígeno se controla de forma que se produzca calor y un nuevo combustible gaseoso, conforme se consume el carbón, el proceso se conoce como gasificación. Los primitivos procesos de gasificación del carbón, que suministran gas de síntesis como materia prima para la industria química, se comercializaron a lo largo de la década de 1950. Mejoras en los diseños de los gasificadores de segunda y tercera generación se desarrollaron y permitieron construir grandes unidades comerciales para la producción de gas sintético en los años 1980. La gasificación de carbón para la generación de energía eléctrica tuvo su primera unidad de demostración en USA, en la planta energética Cool Water de 92 MW, California, y de 155 MW en Plaquemine, Louisiana. La primera planta de ciclo combinado con gasificación integrada que se instaló en el mundo, fue la de Buggenum (250 MW), en Holanda; esta planta, típica en la industria del petróleo, es del tipo soplada con Oxígeno, y utiliza un proceso frío de separación de gas ácido.

Reacciones de gasificación.- La reacción exotérmica entre el Carbono y el Oxígeno proporciona la energía térmica necesaria para impulsar la pirólisis y reacciones de gasificación de carbón. En contraste con las reacciones de combustión que tienen lugar con exceso de Oxígeno, la gasificación consiste en una combustión incompleta con deficiencia de Oxígeno, apareciendo el Monóxido de Carbono y el Hidrógeno como gases combustibles procedentes de esta combustión. Sólo una fracción del Carbono presente en el carbón se oxida por completo para formar Dióxido de Carbono. El calor desprendido por la combustión parcial facilita la mayor parte de la energía necesaria para romper los enlaces químicos en el carbón y la

elevación de la temperatura de todos los productos involucrados hasta su temperatura de reacción.

Los procesos de gasificación del carbón se pueden clasificar según cuatro tipos de reactores:

- Lecho agitado (fijo) o de contracorriente.
- Lecho fluidificado o de mezcla en contracorriente.
- Flujo arrastrado o suspendido (equicorriente).
- Flujo Transport.

Si la temperatura se mantiene por debajo del punto de fusión de la ceniza, ésta se evacúa seca. La ceniza se puede manipular también en estado fundido y evacuar como ceniza líquida.

Lecho agitado.- En el gasificador de lecho agitado, o gasificador de lecho fijo, una columna o lecho de carbón triturado se soporta por medio de una parrilla comprendiendo el proceso una serie de reacciones en contracorriente, como: - En la parte superior del gasificador, el carbón se calienta y seca, a la vez que se refrigera el gas producto - A medida que el carbón desciende, se calienta más y se desprende de los volátiles en la zona de carbonización - Por debajo de la zona de carbonización el carbón desvolatilizado se gasifica mediante su reacción con vapor y con Dióxido de Carbono.

Las temperaturas más altas se alcanzan en la zona de combustión, cerca del fondo del gasificador. La reacción entre el subcoque (char) y el vapor, junto con la presencia de vapor_{exceso}, mantiene la temperatura en la zona de combustión por debajo de la temperatura de fusión de la ceniza.

3.4 Hidrógeno

En un marco global de creciente demanda de investigación y desarrollo de energías limpias y ante el aumento de la penalización progresiva de las emisiones contaminantes se propone al hidrogeno como una de las energías preferidas para el futuro, debido principalmente a su bajo poder contaminante. Se argumenta que

si se mantiene la tendencia actual en el uso de los combustibles fósiles en 20 o 30 años habrá situaciones catastróficas en cuanto al clima.

El Hidrógeno es una alternativa obvia a los combustibles actuales (derivados del petróleo). Tiene muchas aplicaciones, su obtención es segura y es ecológico.

En la actualidad prácticamente el 96% del Hidrógeno mundial se produce a partir de combustibles fósiles, principalmente por reformado de gas natural con vapor y se consume como un componente que forma parte de multitud de procesos convencionales, principalmente (en torno a un 72%) en la industria química y petroquímica (Amoniaco, refinado de petróleo, Metanol, etc.). El resto se utiliza en la metalurgia, electrónica y en la propulsión de vehículos espaciales.

Por tanto, el Hidrogeno es un “viejo conocido de la industria”, sin embargo, por lo que en estos momentos se ha puesto de actualidad es por sus posibilidades de ser utilizado como vector energético. En este sentido, conviene recalcar que el Hidrogeno no es un recurso. El Hidrógeno no se encuentra libre en la naturaleza, no se puede acceder a él por minería o extracción como en los combustibles fósiles. Por tanto si queremos obtener Hidrógeno, necesariamente habrá que producirlo a partir de unas materias primas (agua, hidrocarburos, biomasa) y, en el proceso de transformación de estas materias primas para producir Hidrógeno, habrá que consumir alguna energía primaria (fósil, renovable, nuclear).

En cualquier caso la producción de Hidrogeno más aceptable desde el punto de vista económico se realizará a partir de combustibles fósiles, pero, si queremos utilizar un Hidrogeno limpio, habrá que añadir sistemas que permitan eliminar la emisión de contaminantes asociada (captura y confinamiento de Dióxido de Carbono).

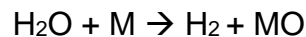
El Hidrógeno es el elemento más abundante de la naturaleza, aunque no se encuentra en estado libre, y es el elemento más ligero, de peso atómico. El hidrógeno tiene una densidad de 0.07 g/cm^3 , muy inferior comparativamente con el agua (1 g/cm^3) o con la gasolina (0.75 g/cm^3). Esto le confiere la ventaja de almacenar por unidad de masa aproximadamente 2.6 veces la cantidad de energía

almacenada en la gasolina. En cambio, por unidad de volumen, se necesita 4 veces el volumen de la gasolina para almacenar la misma cantidad de energía en forma de Hidrogeno.

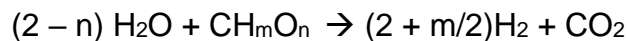
Como combustible es no contaminante y no tóxico, aunque su difusión en ambientes confinados puede provocar problemas debido a su explosividad.

3.5 Reacciones involucradas en la producción de Hidrógeno a partir de carbón mineral.

El Hidrógeno es principalmente producido a partir de agua (H₂O) separando la molécula de agua en Hidrógeno (H₂) y Oxígeno (O). La llave de los aspectos de producción de Hidrógeno a partir de agua está en proporcionar suficiente energía para separar la molécula de agua y atrapando el oxígeno producido. Un método para la producción de Hidrógeno a partir de agua involucra el uso de un agente reductor (M) en una reacción de óxido-reducción.



M puede ser un metal, así como Carbono. Afortunadamente, el Carbono está fácilmente disponible en uno de los materiales más abundantes, como lo es el carbón (C_mO_n).



La ecuación ofrece un método a gran escala para la producción de Hidrógeno a partir de agua y carbón, el cual es disponible y de bajo costo obteniendo energía producida por Hidrógeno que es necesaria a nivel mundial.

La producción de Hidrógeno a partir de carbón es una tecnología bien establecida en la cual el Oxígeno o vapor es pasada a través de carbón para realizar una mezcla de Hidrógeno, Monóxido de Carbono y Dióxido de Carbono desde la cual el Hidrógeno es separado.

La integración total del ciclo de una celda de combustible a partir de la gasificación del carbón, es una manera eficiente de generar energía a partir del carbón. En este

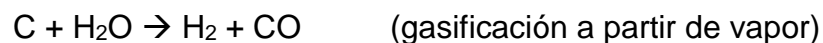
ciclo el hidrógeno producido a partir del carbón es usado para otorgar la energía necesaria a la celda, la cual suministra la potencia a una turbina de gas, al igual que a una turbina de vapor. La eficiencia del ciclo para generar electricidad se espera que crezca un 55%. Un proyecto llamado Aplicación de Energía para Gas, Líquido y Electricidad, por sus siglas en inglés EAGLE, actualmente se encuentra en desarrollo en Japón.

Recientemente los Estados Unidos lanzaron un proyecto llamado FutureGen Project, la cual es una iniciativa para construir la primera planta de energía incorporando un sistema integrado para el secuestro de Dióxido de Carbono y la obtención de Hidrógeno. El proyecto intenta crear la primera planta en el mundo que ocupe combustible fósil y a su vez sea “cero-emisiones”.

El hidrógeno derivado de la producción de carbón es un potencial fuente de combustible para las celdas de los vehículos en el futuro.

3.6 Reacciones de gasificación de carbón.

En el gasificador el carbón sólido es transformado en un gas de síntesis por las siguientes reacciones de gasificación:



Durante la producción actual, la síntesis química usualmente ocurre a presiones altas de Monóxido de Carbono e Hidrógeno, y por lo tanto el gasificador es operado tanto a presiones altas como a temperaturas altas, para obtener una alta eficiencia del proceso.

3.7 Normas relacionadas al control e instrumentación de procesos.

En instrumentación y control, se emplea un sistema especial de símbolos con el objeto de transmitir de una forma más fácil y específica la información. Esto es indispensable en el diseño, selección, operación y mantenimiento de los sistemas de control.

Un sistema de símbolos ha sido estandarizado por la ISA (Sociedad de Instrumentistas de América). La siguiente información es de la norma: ANSI/ISA-S5.1-1984(R 1992).

Los Diagramas de Tubería e Instrumentación (DTI) son diagramas que contienen básicamente los equipos de proceso, las tuberías, los instrumentos y las estrategias de control del proceso. Un DTI es el elemento único más importante en el dibujo para:

- Definir y organizar un proyecto.
- Mantener el control sobre un contratista durante la construcción.
- Entender como es controlada la planta después de finalizar el proyecto.
- Mantener un registro de lo que fue acordado y aprobado formalmente para la construcción.
- Registrar lo que fue construido en la forma como se diseñó con los DTI.

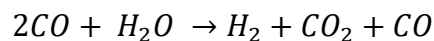
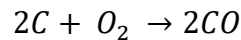
Normas ISA aplicables a DTI

1. ANSI/ISA-S5.1-1984 (R1992), Identificación y símbolos de instrumentación.
2. ANSI/ISA-S5.2-1976 (R1992), Diagramas lógicos binarios para operaciones de proceso.
3. ISA-S5.3-1983, Símbolos gráficos para control distribuido, instrumentación de desplegados compartidos, sistemas lógicos y computarizados.
4. ANSI/ISA-S5.4-1991, Diagramas de lazo de instrumentación.
5. ANSI/ISA S5.5-1985, Símbolos gráficos para identificación de procesos.

Otras normas para Instrumentación

1. ASA Y32.11-1961 – Símbolos gráficos para diagramas de flujo de proceso en las industrias del petróleo y química (ASME).
2. ASA Z32.2.3-1949 – Símbolos gráficos para accesorios de tubería, válvulas y tubería (ASME).
3. ANSI Y14.15.a-1971 Sección 15-11 Interconexión de diagramas (ASME).
4. IEEE Std 315-1975 (ANSI Y32.2 1975) (CSA Z99 1975) Símbolos gráficos para diagramas eléctricos y electrónicos (IEEE).
5. ANSI/IEEE Std 315A-1986 (IEEE).

3.8 Balance de Masa



Flujo de agua requerido, de acuerdo a las reacciones, el flujo molar de agua es la mitad de la alimentación del carbón.

$$1 \text{ ton } C \left(\frac{1000 \text{ Kg}}{1 \text{ ton}} \right) \left(\frac{1 \text{ Kgmol}}{12 \text{ kg}} \right) = 83.3333 \text{ Kgmol } C$$

$$\text{Kgmol } H_2O = \frac{83.3333 \text{ Kgmol}}{2} = 41.6666$$

$$41.6666 \text{ Kgmol } H_2O = \left(\frac{18 \text{ Kg}}{1 \text{ Kgmol}} \right) \left(\frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ Kg}} \right) = 0.75 \text{ ton } H_2O$$

$$(100) * (0.75 \text{ ton } H_2O) = 75 \text{ ton } H_2O$$

Flujo de Oxígeno requerido, de acuerdo a las reacciones el flujo molar de oxígeno es la mitad de la alimentación del carbón.

$$1 \text{ ton } C \left(\frac{1000 \text{ Kg}}{1 \text{ ton}} \right) \left(\frac{1 \text{ Kgmol}}{12 \text{ kg}} \right) = 83.3333 \text{ Kgmol } C$$

$$Kgmol O_2 = \frac{83.3333 Kgmol}{2} = 41.6666$$

$$41.6666 Kgmol O_2 = \left(\frac{32 Kg}{1 Kgmol} \right) \left(\frac{1 ton}{1000 Kg} \right) = 1.3333 ton O_2$$

$$(100) * (1.3333 ton O_2) = 133.33 ton O_2$$

Si tenemos que el porcentaje de Oxígeno en el aire es del 21%, entonces la cantidad de aire que se ha de suministrar al proceso será:

$$133.33 ton O_2 \left(\frac{100\%}{21\%} \right) = 634.904 ton Aire$$

- Mezclador

$$A = Flujo del Carbón = 100 \frac{ton}{día}$$

$$B = Flujo de Agua = 75 \frac{ton}{día}$$

$$C = Flujo de la mezcla$$

$$A + B = C = 175 \frac{ton}{día}$$

- Gasificador

Primera reacción generación de Monóxido de Carbono, se obtiene un mol por cada mol de carbono alimentado. Se ve afectada por la cantidad de ceniza que entra y la eficiencia del reactor.

$$Flujo de ceniza = 100 \frac{ton}{día} * 4\% = 4 \frac{ton}{día}$$

$$100 \frac{ton}{día} - 4 \frac{ton}{día} = 96 \frac{ton}{día} C \left(\frac{1000 Kg}{1 ton} \right) \left(\frac{1 Kgmol}{12 Kg} \right) = 8000 Kgmol C * .97$$

$$= 7760 Kgmol C$$

Monóxido de Carbono generado

$$7760 Kgmol \left(\frac{28 kg}{1 Kgmol} \right) \left(\frac{1 ton}{1000 kg} \right) = 217.28 \frac{ton}{día} CO$$

Segunda reacción

El flujo de syngas se obtiene de la reacción de Monóxido de Carbono y agua, se ve afectado por la eficiencia del gasificador.

$$F_{syngas} = (FCO + FH_2O) * (E)$$

$$F_{syngas} = \left(217.28 \frac{ton}{día} + 75 ton H_2O \right) * (.97) = 283.51 \frac{ton}{día}$$

$$FAire = \left(634.904 \frac{ton}{día} \right) - (133.33 ton O_2 * 0.97) = 505.57 \frac{ton}{día}$$

El flujo de agua que debe salir hacia el scrubber debe ser aproximadamente del 35% del flujo del syngas misma que se obtiene de la corriente de agua de proceso y del sobrante de la reacción.

$$F_{agua} = \left(96.9785 \frac{ton}{día} \right) + (75 ton H_2O * 0.03) = 99.2285 \frac{ton}{día}$$

$$P_{syngas} = 30 atm \left(\frac{1.033 \frac{Kg}{cm^2}}{1 atm} \right) = 31$$

$$F_{ceniza} = (100 * 4\%) + (96 * 0.03) = 6.88$$

Del flujo de cenizas tenemos que el 10% se va hacia el scrubber y el otro 90% hacia los filtros.

Flujo de ceniza

Scrubber	Filtros
0.688 ton/día	6.192 ton/día

- Separador de ceniza gruesa

$$\text{Flujo } H_2O = 6.192 - 0.24 = 5.952 \frac{\text{ton}}{\text{día}}$$

Malla (diámetro de abertura)	Masa retenida(ton/día)	Porcentaje de masa retenida
5-2 mm	3.8688	65
2-1.25 mm	1.0713	18
1.25-.4 mm	0.8332	14
Masa separada en el filtro de ceniza gruesa	5.7733	97%

- Filtro al vacío para ceniza fina

$$\text{Flujo } H_2O = 6.192 * \left(\frac{4}{100}\right) = 0.24 \frac{\text{ton}}{\text{día}}$$

$$\begin{aligned} \text{Flujo ceniza fina} &= F_{\text{ceniza filtros}} - F_{\text{ceniza gruesa}} = 5.962 \frac{\text{ton}}{\text{día}} - 5.773 \frac{\text{ton}}{\text{día}} \\ &= .188 \frac{\text{ton}}{\text{día}} \end{aligned}$$

- Scrubber

$$F_{\text{agua}} = \left(96.9785 \frac{\text{ton}}{\text{día}}\right) + (75 \text{ ton } H_2O * 0.03) = 99.2285 \frac{\text{ton}}{\text{día}}$$

Flujo de syngas 33.33% H_2 + 33.33% CO +33.33% CO_2

$$\text{Flujo } H_2 = 283.51 \frac{\text{ton}}{\text{día}} * \left(\frac{33.33\%}{100\%}\right) = 94.5 \frac{\text{ton}}{\text{día}}$$

$$\text{Flujo } CO = 283.51 \frac{\text{ton}}{\text{día}} * \left(\frac{33.33\%}{100\%}\right) = 94.5 \frac{\text{ton}}{\text{día}}$$

$$\text{Flujo } CO = 283.51 \frac{\text{ton}}{\text{día}} * \left(\frac{33.33\%}{100\%}\right) = 94.5 \frac{\text{ton}}{\text{día}}$$

$$F_{ceniza} = 0.688 \frac{ton}{día}$$

3.9 Filosofía de operación.

El proceso de Gasificación Texaco (TGP) es un proceso de gasificación comercial que convierte materiales orgánicos en gas de síntesis, una mezcla de Hidrógeno y Monóxido de Carbono. La alimentación (lechada de carbón bituminosos-agua) reacciona con una cantidad limitada de Oxígeno (oxidación parcial) en un reactor revestido de refractario a una temperatura de 2500°F (1370 °C), y a una presión de 440 libras por pulgada cuadrada (30 atm). Estas condiciones severas destruyen hidrocarburos y compuestos orgánicos en la alimentación y evitan la formación de subproductos orgánicos indeseables asociados con otros procesos de conversión de combustibles fósiles.

El TGP produce un gas de síntesis que se puede utilizar como alimento para las instalaciones de síntesis química o como combustible limpio para la producción de energía eléctrica. La composición del producto de gas de síntesis seco consiste en 26% de Hidrógeno, 27% de Monóxido de Carbono, 12% de Dióxido de Carbono, 34% de agua y otro 1%. Ningún contaminante orgánico, excepto el Metano (55 ppm), excedió 0,1 ppm. ⁸¹

- Banda transportadora (MOTR-100).
Se carga manualmente con carbón a un diámetro de partícula establecido (1 mm) controlando la escala de velocidad de la cinta de pesaje para lograr la velocidad de alimentación deseada.
- Mezclador (FA-100).
Este equipo es atmosférico recibiendo la carga de carbón directamente de la banda transportadora a su vez es alimentado con agua proveniente del límite de batería, para formar la mezcla deseada en proporción 2 de agua por 1 de carbón de acuerdo a la reacción química.

⁸¹ United States Environment Protection Agency. (1992). Texaco Gasification Process. Cincinnati, OH: EPA 540/R-94/514a

- Bomba (GA-100).

A través de esta bomba se succiona la lechada proveniente de la corriente de salida del mezclador para posteriormente descargar y suministrar la alimentación al gasificador.

- Gasificador (DC-200).

Recibe la alimentación proveniente de la bomba GA-01, una vez calentada la alimentación y cuando la temperatura es superior a 400°C tiene lugar la pirolisis dando parte a un residuo carbonoso o char, formado principalmente por carbono y gases condensables (hidrocarburos ligeros y pesados) y no condensables (metano, vapor de agua, monóxido de carbono, hidrógeno y dióxido de carbono). Cuando la temperatura del char supera los 700 °C, tienen lugar las reacciones propias de gasificación, que se dividen en reacciones heterogéneas (el char reacciona con oxígeno, vapor de agua, dióxido de carbono e hidrógeno) y homogéneas (los gases reaccionan entre sí). Aquí se produce la mezcla del gas final.

Para obtener un buen rendimiento de la mezcla gaseosa resultante (contenidos altos en hidrógeno y monóxido de carbono) es necesaria una temperatura de 2500°F (1370 °C). Para evitar problemas técnicos debidos a la fusión y la aglomeración de cenizas.

- Exclusa Cerrada (FA-200).

Receptor de residuos provenientes del gasificador (ceniza caliente- húmeda), baja la presión con la que se reciben dichos residuos, enfría los residuos mediante una corriente de agua proveniente del Tanque de Descarga.

- Receptor de escoria gruesa (FA-201).

Recibe los residuos provenientes de la exclusiva cerrada a una presión y temperatura más baja de la inicial.

- Tamizadora (FD-200).

Capta el flujo proveniente del receptor de escoria e inicia el proceso de tamizado en el cual se separan las partículas gruesas de las finas. Se desechan todas las cenizas gruesas.

- Receptor de cenizas finas (FA-202).
Capta la mezcla (cenizas finas-agua) proveniente de la tamizadora para posteriormente mandarla a un filtro a vacío, además recibe agua previamente filtrada en el equipo FG-200 y darle salida como caudal de alimentación a un condensador.
- Filtro a vacío (FG-200).
Extrae todo el contenido de agua presente en la mezcla cenizas finas –agua caliente, para reutilizar toda el agua extraída y mandarla al condensador EA-200. Las cenizas finas secas son desechadas.
- Condensador (EA-200).
Recibe agua caliente filtrada en FG-200 para utilizarla como alimentación de agua fría en Tanque de Descarga.
- Tanque de descarga (FA-203).
Se alimenta con la corriente de salida del condensador EA-200. Utiliza este caudal como medio de enfriamiento para los residuos en la Exclusa Cerrada.
- Scrubber (DA-300).
Posee una alimentación proveniente de DA-400 la cual se utilizará para realizar el lavado del gas de síntesis (syngas) proveniente de la salida del gasificador. Este equipo tiene dos salidas, una de ellas es la salida de syngas limpio la cual funciona como alimentación al intercambiador EA-300, la salida restante contiene agua caliente con residuos de ceniza la cual se dirige al intercambiador EA-301.
- Condensador (EA-300).
Disminuye la temperatura y presión del gas de síntesis limpio proveniente del Scrubber facilitando así la alimentación al tanque de alta presión.
- Condensador (EA-301).

Tiene dos corrientes de alimentación ambas de agua a alta temperatura con cenizas, una proveniente directamente del gasificador y otra del Scrubber, en este equipo ambas corrientes se enfrían para utilizarse como flujo de alimentación al Clarificador.

- Clarificador (FG-300).
Entra una corriente de agua sucia proveniente del condensador (EA-301) a una temperatura más baja, posteriormente el clarificador separa los sólidos suspendidos en dicha corriente mediante filtración con la ayuda del filtro (FG-300) el cual funciona a vacío. A la salida se obtiene una corriente de agua limpia con una temperatura aún menor, la cual funciona como alimentación a la Torre Flash (DA-400).
- Filtro a vacío (FG-301).
Recibe una corriente de salida proveniente del clarificador la cual contiene una mezcla de ceniza - agua, esta mezcla se separa mediante la acción de vacío, para así desechar cenizas y recircular el total de agua extraída a la Torre Flash (DA-400).
- Tanque reductor de presión en gas (FA-300).
Se alimenta mediante una corriente que contiene Syngas limpio proveniente de la salida del condensador (EA-300). A esta corriente de alimentación se le disminuirá la presión y será dividida en 2 corrientes de salida, una dirigida a la Torre Flash (DA-400) y la otra dirigida a el Tanque de baja presión (FA-501).
- Tanque a baja presión (FA-501).
Recibe Syngas a baja presión proveniente del Tanque (FA-300) con el objetivo de acondicionar la corriente de entrada, para así abastecer a la unidad removedora de gas ácido, y eliminar los desechos mediante otra corriente de salida.
- Torre flash (DA-400).
Posee 3 corrientes de alimentación dos de ellas son de agua limpia una proveniente del Clarificador (FG-300) y la otra de recirculación de agua

extraída mediante vacío con el Filtro (FG-301) la tercer corriente contiene Syngas a baja presión proveniente de una de las salidas del Tanque (FA-300). La torre separara la corriente de Syngas entrante con el objetivo de extraer todos los componentes no deseados contenida en ella. La corriente de Syngas pura fungirá como alimentación del Condensador (EA-400), los componentes no deseados arrastrados por el agua se desecharán mediante una corriente de salida que se recirculará al Scrubber (DA-300).

- Condensador (EA-400).

Su función es reducir la temperatura de Syngas puro proveniente de la Torre (DA-400), para alimentar al Tanque (FA-500).

- Tanque a baja presión (FA-500).

Recibe Syngas a baja presión proveniente de la Torre (DA-400) con el objetivo de acondicionar la corriente de entrada, para así abastecer a la unidad removedora de azufre, y eliminar los desechos mediante otra corriente de salida.

3.11 Aplicación de la metodología ¿Qué pasa si?

3.11.1 Gasificador

¿Qué pasa si...	Consecuencia/ Riesgo	Protecciones	Recomendaciones
Mayor cantidad de oxígeno?	Aumentaría la presión, por lo tanto existiría un riesgo latente de explosión	Mantenimiento en la válvula de oxígeno. Alarmas por alta presión y flujo de oxígeno.	Asegurarse de que la válvula se encuentre en la posición adecuada y en buen estado.
Mayor cantidad de materia prima?	Aumentaría el nivel, por lo que no hay suficiente energía para producir syngas, mayor tiempo de residencia. Posible obstrucción en los conductos, puede apagar la flama	Regular la alimentación de materia prima. Instalar alarma por alto nivel	No sobrecargar el gasificador
Mayor cantidad de combustible	Posible generación de atmósfera explosiva, se tendría mayor temperatura de operación, aumentaría la presión, y la combustión sería completa.	Mantenimiento o regulación de la válvula de combustible. Instalar un controlador de flujo.	Asegurarse de que la válvula se encuentre en la posición adecuada.
Aumento de presión?	Posible deformación del equipo, riesgo de explosión. El syngas podría salir contaminado.	Mantener estable la presión dentro del gasificador, con base en las condiciones óptimas de operación. Instalar una alarma por alta presión, así como un controlador de presión para asegurar las condiciones óptimas de operación.	Mantener la presión adecuada y monitorear constantemente, para reducir riesgos
Aumento de temperatura?	Posible generación de atmósfera explosiva, se tendría mayor temperatura de operación, aumentaría la presión, y la combustión sería completa.	Mantenimiento o regulación de la válvula de combustible Instalar un controlador de flujo, así como termopares.	Monitorear la temperatura en el gasificador. Regular la válvula de combustible o la flama en el piloto.
Aumenta la producción de cenizas?	Se produciría menor Syngas. Al aumentar la cantidad de cenizas, se podría obstruir parcial, o totalmente los conductos de salida, provocando un aumento de presión en el gasificador,	Regular la válvula de combustible y de aire. Asegurarse de que el sistema de alimentación funcione correctamente.	Mantener una temperatura, flujo de aire, presión y alimentación constante.

	incrementando la posibilidad de generar una atmosfera explosiva o de deformar el equipo.	Realizar mantenimiento continuo de la descarga de cenizas.	
Hay nula o menor cantidad de oxígeno?	La reacción no se llevaría a cabo, o la producción de Syngas es muy baja. Existiría un gasto innecesario tanto de combustible, como de materia prima, por lo que se tendría un desperdicio energético y de producción, generando pérdidas económicas.	Asegurar la correcta alimentación de oxígeno. Realizar mantenimiento periódico a la válvula encargada de suministrar el oxígeno. Instalar un controlador de flujo.	Asegurarse de que la válvula se encuentre en la posición adecuada. No se recomienda la operación del gasificador a menos de que se tenga el nivel de oxígeno adecuado.
Hay nula o menor cantidad de materia prima?	No habría producción de Syngas, por lo que se tendría un desaprovechamiento energético.	Asegurar el correcto funcionamiento del sistema de alimentación.	No operar a menos de que funcione correctamente el sistema de alimentación.
No hay o hay menor alimentación de combustible?	No se alcanzaría la temperatura de operación, no habría producción de Syngas, habría mayor producción de cenizas generando un posible bloqueo en los conductos.	Asegurar la correcta apertura de la válvula de alimentación de combustible. Instalar un controlador de flujo, así como un sensor infrarrojo para el piloto y termopares.	Aumentar el flujo de combustible con una apertura de válvula adecuada.
No hay o hay menor presión?	No se llevaría a cabo la reacción, asimismo se podría obtener una reacción incompleta, teniendo pérdidas de materia prima. Se tendría una mayor producción de cenizas, generando un posible bloqueo en la descarga de cenizas.	Ya que puede existir una pérdida de presión por fugas, se recomienda realizar mantenimiento periódico a empaques y soldaduras. Instalar un controlador de presión.	No operar a menos de que las condiciones de operación sean adecuadas.
No hay o hay menor temperatura?	No hay flujo de combustible o no hay el necesario, por lo que se tendría una pérdida de materia prima o una nula producción de Syngas. Podría existir una falla en el quemador.	Regular la apertura de la válvula de combustible para aumentar el flujo. Instalar un sensor de nivel en las cenizas, así como un medidor de flujo en la entrada de combustible.	Asegurar el correcto funcionamiento del quemador y de la válvula de combustible. Corroborar que la descarga de cenizas no se encuentre obstruida.
No hay descarga pero	Aumentaría la presión en el gasificador, podría	Instalar un sensor de nivel en el gasificador.	Realizar mantenimiento periódico a la purga

la alimentación es continua?	<p>generar una obstrucción total o parcial en la salida de Syngas. Podría contaminar el producto.</p> <p>El nivel aumentaría considerablemente por lo que se podría dañar el equipo.</p>		para asegurar su correcto funcionamiento.
-------------------------------------	--	--	---

3.11.2 Scrubber (Lavador de Gases)

¿Qué pasa sí...	Consecuencia/Riesgo	Protecciones	Recomendaciones
¿Mayor composición de oxígeno?	Mayor aprovechamiento del proceso de combustión para la limpieza del syngas, riesgo de obtener un syngas con la composición deseada.	Instalar un medidor y controlador de flujo, analizador total de oxígeno	Controlar la reacción desde el gasificador para asegurar no rebasar los límites permitidos de Oxígeno
Mayor Flujo de Entrada de Agua?	Menos tiempo de enfriamiento de la corriente de proceso	Instalar un medidor y controlador de flujo, alarmas por alto flujo	Regular apertura de válvula de entrada de agua
Mayor Temperatura en Flujo de entrada de agua?	Tiempo tardío o nulo enfriamiento de la corriente de proceso (Syngas)	Instalar termopares y alarmas por alta temperatura	Revisar y corregir falla en el sistema de enfriamiento
Mayor Presión en Flujo de entrada de agua?	Poca o nula transferencia de masa de el/los componentes de la corriente de proceso/ Arrastre de componentes no deseados en la corriente de Syngas	Instalar un medidor y controlador de flujo a la entrada del Scrubber	Regular apertura de válvula
Mayor cantidad de cenizas a la salida?	Taponamiento de conducto de salida del Scrubber/Arrastre de cenizas en el Syngas	Medidor de nivel a la salida del Scubber	Mantenimiento preventivo a filtros
Mayor Temperatura de entrada de Syngas?	Mayor tiempo de enfriamiento de la corriente de Syngas/Riesgo de atmósfera explosiva	Instalar Termopares y alarmas por muy alta temperatura.	Revisar falla en el sistema de calentamiento del gasificador.
Mayor Presión de entrada de Syngas?	Posible deformación del equipo y fuga de Syngas/Riesgo de atmósfera explosiva	Instalar medidores y controladores de presión además de alarmas por muy alta presión	Regular apertura de válvula y revisar falla en las condiciones de operación del gasificador

Mayor Flujo de entrada de Syngas?	Mayor tiempo de enfriamiento de la corriente de proceso (Syngas)/Cambio en la composición en la corriente de proceso	Instalar medidores y controladores de flujo, además de alarmas por muy alto flujo	Regular apertura de válvula
Menor o nula composición de Oxígeno?	Reacción con un 100% de conversión/Riesgo nulo	Analizador total de oxígeno	No aplica
Menor o nulo Flujo de Entrada de Agua?	Poca o nulo enfriamiento de la corriente de proceso.	Instalar un medidor y controlador de flujo, alarmas por bajo flujo	Regular apertura de válvula de entrada de agua
Menor o nula Temperatura en Flujo de entrada de agua?	Menor tiempo de enfriamiento de la corriente de proceso Syngas.	Instalar termopares y alarmas por baja temperatura	Revisar y corregir falla en el sistema de enfriamiento
Menor o nula presión en flujo de entrada de agua?	Poca o nula transferencia de masa de el/los componentes de la corriente de proceso/ Arrastre de componentes no deseados en la corriente de Syngas	Instalar un medidor y controlador de flujo a la entrada del Scrubber	Regular apertura de válvula
Menor o nula cantidad de cenizas a la salida?	Arrastre de cenizas en la corriente de proceso/Cambio en la composición de la corriente de proceso	Medidor de nivel a la salida del Scrubber	Mantenimiento preventivo a filtros
Menor o nula Temperatura de entrada de Syngas?	Menor tiempo de enfriamiento de la corriente de Syngas/Riesgo nulo	Instalar Termopares y alarmas por muy baja temperatura.	Revisar falla en el sistema de calentamiento del gasificador
Menor o nula Presión de entrada de Syngas?	Posibles fugas en el equipo y fuga de Syngas/Riesgo de atmósfera explosiva	Instalar medidores y controladores de presión además de alarmas por muy baja presión	Regular apertura de válvula y revisar empaques y soldaduras
Menor o nulo flujo de entrada de Syngas?	Nula producción de Syngas/Pérdidas económicas	Instalar medidores y controladores de flujo, además de alarmas por muy bajo flujo	Regular apertura de válvula Revisar condiciones de operación del gasificador.

3.11.3 Torre flash

¿Qué pasa sí...	Consecuencia/ Riesgo	Protecciones	Recomendaciones
Aumenta la presión?	Puede existir sobre presión en el equipo, lo cual puede deformarlo, asimismo puede ocasionar fisuras en los empaques y/o soldaduras, provocando una pérdida de producto y generando una atmosfera explosiva.	Instalar una válvula controladora de presión, así como una PSV conectada a un tanque de almacenamiento ya que el syngas está totalmente limpio.	Regular apertura de válvulas y revisar condiciones de operación de la torre flash.
Aumenta la temperatura?	Afectaría la separación del syngas, en el cual se podría arrastrar trazas de vapor de agua contaminando el producto final.	Instalar un indicador de temperatura, y alarmas por muy alta temperatura.	Revisar la temperatura del agua proveniente del clarificador, asimismo, la temperatura de entrada del syngas.
Aumenta el flujo de agua y/o syngas?	Al aumentar el flujo de agua existe la posibilidad de inundar la torre. Mientras que si aumenta el flujo de syngas puede que el agua proveniente del clarificador no sea la suficiente para realizar el enfriamiento.	Instalar controladores indicadores de flujo, así como alarmas por alto flujo tanto de agua como de syngas.	Regular la apertura de válvulas, para el correcto funcionamiento de la torre.
Aumenta el nivel?	Se podría inundar la torre provocando falla en los equipos anteriores. Mientras que el syngas no se podría separar.	Instalar alarmas por alto nivel, así como una purga.	Mantenimiento periódico a la válvula de alimentación y a la válvula de salida de agua.
No hay o hay menos presión?	Podría ser causado por fugas en el equipo anterior, éste es el tanque reductor de presión. Otra posible causa sería la falla en la torre misma, causado por fugas.	Instalar alarmas por muy baja y baja presión. Así como una válvula controladora de presión.	Mantenimiento periódico a los equipos, principalmente en empaques y soldaduras.

No hay o hay menos flujo de agua y/o SYNGAS?	Al no existir o haber poco flujo de agua, cabe la posibilidad de que la falla provenga del clarificador, ya que éste puede estar total o parcialmente obstruido por cenizas. Y al no existir flujo de syngas, el problema puede ser causado desde el gasificador.	Instalar alarma por bajo y muy bajo flujo, así como un indicador controlador de flujo a la entrada de la torre.	Se recomienda monitorear el flujo continuamente, para asegurar el correcto funcionamiento de la misma.
No hay o hay menos nivel?	No hay flujo de entrada, por lo que no existe nivel. La descarga de agua podría estar totalmente abierta provocando que disminuya rápidamente el nivel. Otra razón puede ser la total obstrucción del clarificador.	Instalar alarmas por bajo y muy bajo nivel. Así como indicadores de nivel y de flujo a la entrada y salida de agua.	Mantenimiento al clarificador, regular la apertura de las válvulas de agua.

3.11.4 Clarificador

¿Qué pasa sí...	Consecuencia/Riesgo	Protecciones	Recomendaciones
Hay más flujo?	Se obtendría mayor cantidad de agua con cenizas, por lo que la tubería tendría un mayor desgaste. A su vez, podría generar incrustaciones generando bloqueos en los conductos. Podría saturar el medio filtrante y generar una inundación del gasificador, lo cual afectaría al proceso en general.	Se recomienda regular la apertura de la válvula de entrada al clarificador. Instalar un sensor de nivel y un controlador de flujo.	Dar mantenimiento periódico al medio filtrante, para evitar bloqueos en el clarificador, así como en las tuberías.
Hay mayor cantidad de cenizas?	Se podría saturar rápidamente el medio filtrante, por lo que se tendrían bloqueos en los conductos, provocando una falla	Se recomienda instalar una purga, así como medidores de presión, para evitar la saturación del medio	Se recomienda revisar el gasificador ya que el problema podría provenir de esta etapa del proceso. Así como darle un adecuado

	<p>en el clarificador en donde existiría una posible inundación del gasificador afectando al proceso en general.</p>	<p>filtrante y prevenir incrustaciones.</p>	<p>mantenimiento al medio filtrante</p>
<p>Hay más nivel?</p>	<p>Se obtendría mayor cantidad de agua con cenizas, por lo que la tubería tendría un mayor desgaste. A su vez, podría generar incrustaciones generando bloqueos en los conductos.</p> <p>Podría saturar el medio filtrante y generar una inundación del gasificador, lo cual afectaría al proceso en general.</p>	<p>Se recomienda regular la válvula de entrada o de salida del clarificador.</p> <p>Se recomienda instalar un medidor de nivel y uno de flujo</p>	<p>Dar mantenimiento periódico al medio filtrante para asegurar el correcto funcionamiento del equipo. Asegurar la correcta apertura de las válvulas de entrada y de salida del clarificador para evitar posible inundación de los equipos.</p>
<p>No hay o hay menos flujo?</p>	<p>Se debería revisar la válvula de entrada al clarificador, ya que puede provocar una inundación en el gasificador, dañando el equipo.</p>	<p>Instalar un medidor de flujo, así como una alarma por bajo y muy bajo flujo.</p>	<p>Asegurar la correcta apertura de la válvula de entrada.</p>
<p>No hay o hay menos nivel?</p>	<p>Se debería revisar la válvula de entrada al clarificador, ya que puede provocar una inundación en el gasificador, dañando el equipo.</p>	<p>Instalar un medidor de nivel, así como una alarma por bajo y muy bajo nivel.</p>	<p>Asegurar la correcta apertura de la válvula de entrada.</p>
<p>Hay más flujo y más nivel?</p>	<p>La válvula de entrada estaría completamente abierta, mientras que la descarga parcialmente cerrada. Podría inundar el gasificador y el medio filtrante se saturaría rápidamente generando bloqueos. Las tuberías podrían desgastarse rápidamente.</p>	<p>Asegurar la correcta apertura de la válvula de alimentación de combustible.</p> <p>Instalar un controlador de flujo, y de nivel, así como alarmas por alto y muy alto flujo y nivel.</p>	<p>Realizar una periódica revisión de las válvulas asegurando su correcta posición. Asimismo y de ser necesario, realizar una radiografía de las tuberías.</p> <p>Dar mantenimiento periódico al medio filtrante para asegurar su correcto funcionamiento.</p>
<p>Hay más cantidad de cenizas y más flujo?</p>	<p>Esto provocaría un mayor desgaste por fricción de las tuberías y del equipo, ya que el</p>	<p>Asegurar la correcta apertura de la válvula de entrada, asimismo el correcto</p>	<p>Realizar una periódica revisión de las válvulas asegurando su correcta posición.</p>

	<p>líquido cuenta con demasiadas partículas en suspensión.</p> <p>El medio filtrante se saturaría rápidamente, generando posibles bloqueos, provocando una inundación en el gasificador afectando directamente la producción.</p>	<p>funcionamiento del gasificador, ya que esta falla puede provenir de él.</p> <p>Insatilar una alarma por alto flujo, y de ser necesario un analizador de composición.</p>	<p>Realizar mantenimiento periódico del medio filtrante.</p>
--	---	---	--

3.11.5 Filtros al vacío

¿Qué pasa sí...	Consecuencia/ Riesgo	Protecciones	Recomendaciones
Hay más flujo?	Habría una mayor cantidad de cenizas por lo que saturaría el medio filtrante rápidamente. Por otra parte, no tendría el suficiente tiempo para realizar la filtración por lo que ésta sería incompleta.	Se recomienda instalar un medidor de flujo, así como alarmas por alto flujo.	Se recomienda dar mantenimiento periódico a los medios filtrantes. Y una purga para poder eliminar el exceso de ceniza que se pueda acumular en el filtro.
Hay más nivel?	La filtración no se llevaría a cabo de forma correcta, siendo ésta incompleta.	Se recomienda instalar un medidor de nivel, asimismo instalar alarmas por alto nivel.	Realizar mantenimiento periódico al medio filtrante. De ser necesario reemplazar el medio.
Hay más presión?	Ya que esto se debería a una falla en el sistema de vacío, no se llevaría a cabo la filtración con la misma eficiencia. Se tendrían fugas en las líneas de vacío.	Instalar un medidor de presión para asegurar que los filtros trabajan a presión negativa y se pueda llevar a cabo la filtración de forma adecuada.	Se recomienda instalar una bomba de vacío o eyector de repuesto, y dar mantenimiento continuo a todas las soldaduras y empaques.
No hay o hay menos flujo?	Existiría la posibilidad de inundación en el equipo antepuesto. O podría ser un problema en el proceso, ya que el equipo anterior podría ocasionar la falta de flujo. Por otra parte podrían existir bloqueos parciales o totales en las tuberías.	<p>Asegurarse que la falta de flujo no se deba a un bloqueo en las tuberías o un bloqueo en el equipo anterior.</p> <p>Instalar un medidor de flujo, así como alarmas por bajo y muy bajo flujo</p>	<p>Revisar la correcta apertura de la válvula de entrada.</p> <p>Si la falta de flujo se debe por bloqueos en las tuberías realizar un mantenimiento periódico a las tuberías.</p>
No hay o hay menos nivel?	Existirían posibles fugas en los empaques y soldaduras, por lo que	Asegurarse que la falta de nivel no se deba a un bloqueo en	Revisar la correcta apertura de la válvula de entrada. Así como dar

	se estaría perdiendo toda el agua que se usaría con propósitos de enfriamiento. Habría una posible inundación en el equipo anterior.	las tuberías o un bloqueo en el equipo anterior. Instalar un medidor de nivel, así como alarmas por bajo y muy bajo nivel.	mantenimiento a empaques y soldaduras Si la falta de nivel se debe por bloqueos en las tuberías realizar un mantenimiento periódico a las tuberías.
No hay o hay menos mantenimiento del medio filtrante?	Podría causar un bloqueo total del medio filtrante, por lo que no se llevaría a cabo la filtración generando una posible inundación en el equipo anterior.	Instalar una purga y revisar periódicamente los filtros para asegurar su correcto funcionamiento.	Realizar mantenimiento periódico al medio filtrante. De ser necesario reemplazar el medio.

3.11.6 Tanques de almacenamiento

¿Qué pasa sí...	Consecuencia/ Riesgo	Protecciones	Recomendaciones
Hay mayor flujo de syngas	Al haber un mayor flujo de syngas, hay riesgo de que aumente la presión y se dañen los empaques y soldaduras.	Regular la apertura de la válvula para disminuir el flujo de syngas. Instalar un sensor y alarma por alta presión.	Revisar periódicamente la integridad de los empaques y soldaduras.
Hay mayor presión	Daño en empaques y soldaduras, riesgo de explosión	Instalar válvula de alivio y regular flujo de syngas	Realizar purgas programadas para desalojar el aire que pudiera estar dentro del tanque.
Hay mayor temperatura	Riesgo de explosión por sobrecalentamiento del syngas.	Instalar un sistema de enfriamiento	Los tanques de almacenamiento deberán estar en lugar alejado de altas temperaturas debidas al proceso.
No hay flujo de syngas	Pérdidas económicas y baja presión.	Regular la apertura de la válvula de alimentación	Instalar un medidor de flujo así como alarma por muy bajo flujo
No hay presión o hay poca presión	Generar una despresurización	Regular la apertura de la válvula de alimentación	Instalar alarma por muy baja presión

Hay flujo de aire además de flujo de syngas	Atmosfera explosiva	Instalar una analizador de flujo	Realizar purgas programadas para desalojar el aire.
--	---------------------	----------------------------------	---

3.11.7 Bombas

¿Qué pasa sí...	Consecuencia/Riesgo	Protecciones	Recomendaciones
Hay más flujo	Alta vibración y desviación de la flecha del motor	Regular apertura de válvula	Alarma por vibración alta, mantenimiento periódico de la flecha
Hay más presión en la succión	Mayor presión en la descarga por lo que puede dañar los empaques de las válvulas posteriores	Regular apretura de válvula antes de la succión	Alarma por alta presión
Hay más temperatura en el motor	Sobrecalentamiento del motor y puede ocasionar un fallo total de la bomba	Alarma por alta temperatura	Deberán ser colocadas en lugares ventilados.
Hay más temperatura en el flujo de succión	Aumenta la temperatura del motor ocasionando sobrecalentamiento	Alarma por alta temperatura	Se deberán escoger bombas de acuerdo a la parte del proceso donde funcionarán
Hay flujo a dos fases	Puede ocasionar cavitación y fallo de la bomba	Analizador de flujo	Mantenimiento periódico de la bomba
Hay más cantidad de cenizas	Se pueden obstruir la succión y descarga de la bomba así como la pieza giratoria causando un daño total	Analizador de flujo	Realizar un mantenimiento adecuado de los filtros para evitar la mayor cantidad de cenizas.
No hay flujo	Riesgo de cavitación y fallo por sobrecalentamiento	Regular apertura de válvula, verificar que no esté obstruida la succión.	Alarma por muy bajo flujo
No hay presión o hay muy baja presión	Puede forzar el motor de la bomba si requiere gran cantidad de trabajo para transportar los fluidos o si estos contienen cenizas.	Regular la apertura de las válvulas, verificar que no hay obstrucciones	Alarma por muy baja presión

3.11.8 Mezclador

¿Qué pasa sí...	Consecuencia/ Riesgo	Protecciones	Recomendaciones
Más nivel	Falla en el sistema automatizado de alimentación/ Desbordamiento de materia prima, desgaste de la flecha, posible avería del motor	Indicador y alarmas por alto nivel	Remover exceso de materia prima, mantenimiento periódico al sistema automatizado de alimentación.
Más alimentación de carbón	Falla en el sistema automatizado de alimentación/ Mezcla incompleta, desgaste de la flecha, posible avería del motor, obstrucción del conducto de salida	Indicador y alarmas por alto nivel	Remover exceso de materia prima, mantenimiento periódico al sistema automatizado de alimentación.
Más alimentación de agua	Válvula de alimentación totalmente abierta/Riesgo de desbordamiento de la materia prima, cambio en la composición de la mezcla	Instalar controlador y alarma por alto flujo	Regular apertura de válvula y retirar exceso de materia prima
Mayor diámetro de partícula	Obstrucción de conductos, desgaste de la flecha, posible avería de motor, paro temporal de la planta	Tener stock de materia prima que cumpla con los requisitos del proceso	Cambio de lote o de proveedor. Contar con un laboratorio de control de calidad
Mayor mantenimiento a flecha	Mayor eficiencia y menor tiempo de mezclado	Tener un mezclador relevo y/o refacciones en stock	Revisión y mantenimiento de la flecha, motor y partes móviles del mezclador
Menor o nivel nulo	Falla en el sistema automatizado de alimentación/Baja producción, desaprovechamiento energético	Indicador y alarmas por bajo nivel	Revisión y mantenimiento periódico al sistema automatizado de alimentación.
Menor o nula alimentación de carbón	Falla en el sistema automatizado de alimentación/ Baja producción, desaprovechamiento energético	Indicador y alarmas por bajo nivel	Revisión y mantenimiento periódico al sistema automatizado de alimentación.

Menor o nula alimentación de agua	Válvula de alimentación parcial o totalmente cerrada/Riesgo de desgaste en partes móviles del mezclador, cambio en la composición de la mezcla	Instalar controlador, medidor y alarma por baja flujo	Regular apertura de válvula
Menor diámetro de partícula	Tiempo de mezclado menor/Cambio en composición de la mezcla	Tener stock de materia prima que cumpla con los requisitos del proceso	Cambio de lote o de proveedor. Contar con un laboratorio de control de calidad
Menor o nulo mantenimiento a flecha	Menor eficiencia y mayor tiempo de mezclado	Tener un mezclador relevo y/o refracciones en stock	Revisión y mantenimiento de la flecha, motor y partes móviles del mezclador

3.11.9 Intercambiadores de calor

¿Qué pasa sí...	Consecuencia/Riesgo	Protecciones	Recomendaciones
Aumento de temperatura?	Existe una falla en el sistema de refrigeración. Salida de syngas caliente, ceniza caliente en filtros, aumento de presión, recirculación de agua caliente contaminada	Instalar un sensor y alarma por alta temperatura, corregir la falla en el sistema de enfriamiento.	Mantenimiento periódico al intercambiador de calor. Aumentar caudal del fluido frío
Mayor cantidad de flujo?	Apertura de válvula incorrecta ,aumento de temperatura en syngas, menor intercambio energético, posible saturación de filtros y clarificador, agua de recirculación caliente	Instalar un medidor de flujo, regular apertura de válvula, medidor de presión en filtros, controlador de flujo.	Asegurarse que la válvula se encuentre en posición adecuada.
No hay o hay menor cantidad de flujo?	Apertura de válvula incorrecta, falla en el sistema de recirculación, bomba dañada, conductos obstruidos, presión baja, fugas.	Instalar un medidor de flujo y de presión. Mantenimiento a bombas y conductos especialmente donde hay acumulación de ceniza.	Asegurarse que la válvula se encuentre en posición adecuada, que las bombas operen normalmente y exista una presión adecuada.
No hay o hay menor	Deficiencia energética en el proceso, intercambiador	Radiografía del intercambiador de calor, instalar	Mantenimiento periódico al intercambiador de calor.

intercambio de calor?	posiblemente incrustado, bajo caudal de enfriamiento.	termopares y medidor de presión.	Revisar que el caudal de fluido de enfriamiento sea óptimo.
No hay temperatura?	Falla general en el proceso. No hay producción	Corregir rápidamente la falla en el proceso	No operar a menos de que la falla haya sido totalmente corregida.
Además de más temperatura menos intercambio de calor?	Apertura de válvula incorrecta, fallo en el sistema de enfriamiento, syngas, cenizas y agua de recirculación caliente, aumento de presión, falla en filtros y bombas. Intercambiador de calor incrustado.	Instalar medidores de temperatura y flujo. Alarmas por alta temperatura y bajo flujo.	Asegurarse que la válvula se encuentre en posición adecuada. Mantenimiento periódico al intercambiador de calor.
Además de más temperatura menos flujo?	Bajo nivel en la torre de enfriamiento, intercambiador de calor incrustado, fallo en bombas, posible obstrucción en conductos, falla en el equipo anterior al intercambiador de calor.	Instalar sensor de nivel en torre de enfriamiento, medidores de temperatura y flujo. Regular apertura de válvula de fluido de enfriamiento. Purga en conductos saturados.	Asegurarse que la válvula se encuentre en posición adecuada. Mantenimiento periódico al intercambiador de calor.

3.12 Aplicación de la metodología HazOp

nodo	nombre	falla	Causa	frecuencia	efectos	método de detección	respuesta operativa	medidas adicionales	recomendaciones
1	gasificador	más flujo de oxígeno	válvula 2 más abierta	desconocida	generación de mezcla explosiva, cambio de composición, incremento de temperatura, mayor dificultad de separación	analizadores totales de oxígeno	regular la apertura de válvula	N/A	instalar alarma por altos niveles de oxígeno, analizador de oxígeno, alarma por alta temperatura
		más materia prima	sistema automatizado de alimentación y/u operador	desconocida	obstrucción del quemador, reacción nula, aumento de presión en el sistema	analizador ir (piloto) y analizador de gases (salida de syngas)	cierre de válvula de alimentación de combustible, purga del equipo, cierre de alimentación de materia prima	N/A	instalar una psv, alarma por alta presión, alarma por baja temperatura, analizador de gases
		más alimentación de combustible	válvula más abierta	desconocida	incremento en el calor de reacción, atmósfera explosiva, aumento de presión	sensor ir, sensor de temperatura	cierre de válvula de alimentación de combustible	N/A	instalar medidor de flujo, termopares, alarma por alta presión y temperatura
		más presión	taponamiento de conductos	desconocida	deformación del equipo, riesgo de explosión, pérdidas humanas	manómetros	alivio y/o desfogue de gasificador, limpieza de conductos obstruidos	N/A	instalar alarma por alta presión, controlador de presión, válvula de alivio

		mas temperatura	mayor flujo de combustible, falla del sistema de enfriamiento y obstrucción de conductos	desconocida	daño al material refractario, daño a partes internas, cambio en la composición del gas	termopares	restaurar el sistema de enfriamiento, regular válvula de combustible, suspender el suministro de materia prima	N/A	instalar alarma por alta temperatura, alarma por bajo flujo en el sistema de enfriamiento
		más flujo de salida de syngas	aumento de presión	desconocida	deformación del conducto de salida, daño al depurador de syngas, atmósfera explosiva	indicador de presión, indicador de flujo	regular apertura de válvula	N/A	instalar psv, alarma por alto flujo, controlador de flujo
		más producción de ceniza	sistema automatizado de alimentación, disminución de flama en quemador	desconocida	obstrucción del conducto de salida, aumento de presión residuos en syngas, cambio de composición en syngas	sensor de nivel	paro en el sistema de alimentación	N/A	sensor de nivel, mantenimiento en el conducto de salida
		menos flujo de oxígeno	obstrucción del conducto, válvula parcialmente cerrada	desconocida	reacción incompleta	analizador total de oxígeno	regular válvula	N/A	instalar alarma por bajo nivel de oxígeno
		menos materia prima	falla en el sistema automatizado de alimentación	desconocida	poca obtención de productos, mal uso de la energía, menor eficiencia en el proceso	sensor de nivel	revisar y corregir la falla en el sistema automatizado de alimentación	N/A	instalar alarma por bajo nivel de carbón

		menos flujo de combustible	válvula parcialmente cerrada	desconocida	disminución de la temperatura, reacción incompleta, mayor producción de ceniza	medidor de flujo	regular apertura de válvula	N/A	instalar controlador de flujo, alarma por bajo flujo
		menos presión	fugas en soldaduras y empaques	desconocida	escape de syngas, atmósfera explosiva, reacción incompleta	medidor de presión	detección de fugas	N/A	instalar timer, alarma por baja presión, mantenimiento a empaques y soldaduras
		menos temperatura	menos flujo de combustible	desconocida	mayor producción de ceniza, reacción incompleta, menor cantidad de syngas	termopares	regular válvula de combustible y válvula de agua de enfriamiento	N/A	instalar alarmas por baja temperatura, controlador de flujo de combustible y agua de enfriamiento
		menos flujo de salida de syngas	reacción incompleta, falla en sistema de alimentación	desconocida	menor obtención de productos, de aprovechamiento de energía	medidor de flujo	revisar sistema de alimentación y temperatura de reacción	N/A	instalar alarma por flujo
		menos producción de ceniza	reacción con 100% de eficiencia	nunca	sin efectos	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		además de más oxígeno, más materia prima	falla en el sistema automatizado de alimentación, válvula reguladora de oxígeno más abierta	desconocida	mayor cantidad de cenizas, menor producción de syngas, menor eficiencia en el proceso, deformación de equipo	sensor de nivel, analizador total de oxígeno	regular apertura de válvula, detectar falla en alimentación	N/A	instalar alarma por alto nivel de carbón, alarma por alto flujo de oxígeno, psv

		además de más oxígeno, más alimentación de combustible	válvulas de alimentación más abiertas	desconocida	incremento de temperatura, aumento de presión, incendio y explosión	termopares, medidor de presión	regular apertura de válvulas	N/A	instalar alarmas por alta presión y temperatura, psv, controlador de flujo para alimentaciones
		además de más oxígeno, más presión	obstrucción de conductos, válvula de alimentación de oxígeno más abierta	desconocida	deformación del equipo, riesgo de explosión, pérdidas humanas, aumento de temperatura	medidor de presión, medidor de flujo	regular apertura de válvulas	N/A	instalar alarmas por alta presión, psv, termopares, limpieza de conductos
		además de más oxígeno, más temperatura	mayor flujo de combustible, falla en medidor de temperatura, válvula de oxígeno más abierta	desconocida	aumento de presión, riesgo de explosión, deformación del equipo	termopares, medidor de presión, medidores de flujo	regular apertura de válvulas	N/A	instalar alarmas por alta presión y temperatura, psv, instalar sensor IR en el piloto
		además de más oxígeno, más flujo de salida de syngas	mayor apertura de válvula de oxígeno	desconocido	cambio en la composición de salida, aumento de presión	analizador de gases	regular apertura de válvula de alimentación de oxígeno	N/A	instalar analizador total de gases, medidor de flujo, controlador de presión
		además de más oxígeno, más producción de ceniza	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		además de más oxígeno, menos alimentación de materia prima	falla en el sistema de alimentación de materia prima y válvula de oxígeno más abierta	desconocido	menor obtención de productos, mal uso de la energía	sensor de nivel y analizador de gases	revisar sistema de alimentación y regular válvula de apertura de oxígeno	N/A	instalar alarma por bajo nivel de materia prima, alarma por alto nivel de oxígeno, analizador total oxígeno

		además de más oxígeno menos alimentación de combustible	válvula de alimentación de combustible parcialmente cerrada y válvula de oxígeno más abierta	desconocido	reacción incompleta, menor temperatura, menos obtención de producto	medidor de flujo, termopar, analizador de gases	regular apertura y cierre de válvulas	N/A	instalar alarmas por bajo flujo de combustible, por alto nivel de oxígeno, analizador total de gases
		además de más oxígeno, menos presión	fugas en soldaduras y empaques	desconocido	baja temperatura, reacción incompleta, mal uso de la energía, pérdida de producto	medidor de presión, medidor de flujo	revisión de empaques y soldaduras, detección de fugas	N/A	mantenimiento a empaques y soldaduras, timer
		además de más oxígeno, menos temperatura	menos flujo de combustible, válvula de oxígeno más abierta	desconocido	reacción incompleta, mayor producción de ceniza, obstrucción de la descarga automatizada de ceniza	termopar, medidor de flujo	regular válvula de combustible y oxígeno	suspender sistema de alimentación automatizado	mantenimiento de la descarga de ceniza, sensor IR en el piloto
		además de más oxígeno, menos flujo de salida de syngas	no aplica	nunca	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		además de más oxígeno, menos producción de ceniza	no aplica	nunca	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica

		además de menos oxígeno, más materia prima	falla en sistema de alimentación, cierre parcial de válvula de oxígeno	desconocido	reacción incompleta, mayor producción de ceniza	indicador de nivel, analizador de gases	suspender el sistema de alimentación automatizado alimentación, regular válvula de oxígeno	N/A	instalar un sensor de nivel, alarma por alto nivel de materia prima, timer, alarma por bajo nivel de oxígeno
		además de menos oxígeno, más alimentación de combustible	válvula de alimentación parcialmente cerrada, válvula de combustible más abierta	desconocido	menor temperatura, mal uso de la energía, menor presión, reacción incompleta	termopar, sensor en el piloto, analizador de gases, medidor de flujo	regular apertura de válvulas	N/A	instalar termopares, sensor IR en el piloto, controlador de flujo, bypass en la alimentación de oxígeno
		además de menos oxígeno, más presión	no aplica	nunca	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		además de menos oxígeno, más temperatura	no aplica	nunca	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		además de menos oxígeno, más flujo de salida del syngas	no aplica	nunca	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica

		además de menos oxígeno, más producción de ceniza	válvula de alimentación parcialmente cerrada	desconocido	reacción incompleta, menor temperatura, menos obtención de producto, obstrucción de conductos	analizador de gases, sensor de nivel, sensor de flujo	regular apertura de válvula de alimentación de oxígeno	N/A	instalar alarma por bajo nivel de flujo de oxígeno, por alto contenido de ceniza, mantenimiento de la descarga
		además de menos oxígeno, menos materia prima	falla en el sistema de alimentación de materia prima y válvula de oxígeno parcialmente cerrada	desconocida	menor cantidad de productos	indicador de nivel, medidor de flujo	revisión de sistema de alimentación, regular apertura de válvula de alimentación de oxígeno	N/A	mantenimiento al sistema de alimentación, alarma por bajo nivel de materia prima y por bajo flujo de oxígeno
		además de menos oxígeno, menos alimentación de combustible	válvulas parcialmente cerradas, obstrucción	desconocida	menor temperatura, reacción incompleta, pérdida de materias primas	termopares, medidor de flujo	regular apertura de válvulas de alimentación	N/A	bypass, instalar termopares, alarmas por bajo flujo de oxígeno y combustible
		además de menos oxígeno, menos presión	válvula parcialmente cerrada, obstrucción, fugas en empaques o soldaduras	desconocida	menor temperatura, reacción incompleta, pérdida de materias primas	termopares, medidor de presión	regular apertura de válvulas de alimentación, revisión de soldaduras y empaques	N/A	bypass, instalar termopares, alarmas por baja presión, mantenimiento a soldaduras y empaques, timer
		además de menos oxígeno, menos flujo de salida del syngas	válvula de alimentación de oxígeno parcialmente cerrada u obstruida	desconocida	reacción incompleta, pérdida de materias primas	medidor de flujo	regular apertura de válvula de alimentación de oxígeno	N/A	instalar alarmas de bajo flujo, analizador total de gases, bypass

		además de menos oxígeno, menos producción de ceniza	no aplica	nunca	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		no hay oxígeno	válvula totalmente cerrada u obstruida, falla en el controlador de la válvula o compresor	desconocida	reacción y producción nula, materia prima estancada	medidor de flujo	apertura de válvula, revisar compresor	N/A	instalar alarma por muy bajo flujo, bypass, compresor de relevo
		no hay materia prima	falla total en el sistema automatizado de alimentación	desconocida	reacción nula, mal uso de la energía	indicador de nivel	revisar sistema automatizado de alimentación	N/A	mantenimiento al sistema automatizado de alimentación, alarma por muy bajo nivel de materia prima
		no hay combustible	válvula totalmente cerrada u obstruida, falla en el controlador de la válvula o compresor	desconocida	reacción y producción nula, materia prima estancada, atmósfera explosiva	medidor de flujo	apertura de válvula, revisar compresor	N/A	instalar alarma por muy bajo flujo, bypass, compresor de relevo, válvula de alivio
		no hay presión	fugas en soldaduras y empaques	desconocida	reacción y producción nula	medidor de presión, visual	paro total del equipo	análisis de daños, contratar analista de daños	instalar timer, alarma por muy baja presión, mantenimiento a empaques y soldaduras

		no hay salida de syngas	no hay materia prima, obstrucción de conductos, fugas en soldaduras y empaques, no hay combustible	desconocida	reacción nula, mal uso de la energía energético o de materia prima	medidor de flujo	paro total del equipo	N/A	instalar medidor de flujo, alarma por muy bajo flujo de syngas mantenimiento general al gasificador
		no hay producción de ceniza	reacción al 100%	nunca	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
2	lavador de gases (scrubber)	más presión	más flujo de syngas, válvula de descarga cerrada o parcialmente abierta, obstrucción de la línea de descarga	desconocida	daño en el equipo e instrumentos	medidor de presión	apertura de válvulas de descarga, mantenimiento del equipo	manómetro	instalar psv, alarma por alta presión
		más temperatura	falla en el sistema de refrigeración	desconocida	Corrosión	medidor de temperatura	detección y corrección de falla en el sistema de refrigeración	N/A	instalar alarma por alta temperatura, termopar
		más condensados	flujo excesivo de refrigerante	desconocida	cambio de composición del syngas	medidor de temperatura, analizador de gases, medidor de flujo	regular el flujo de refrigerante	N/A	instalar termopar, analizador total de gases, alarma por alto flujo de refrigerante
		más flujo de refrigerante	válvula de entrada totalmente abierta	desconocida	más condensados y menor temperatura de salida del syngas	medidor de flujo	regular apertura de válvula	N/A	alarma por alto flujo

		más flujo de syngas	válvula del gasificador totalmente abierta	desconocida	aumento de presión, contaminación del producto	medidor de flujo, medidor de presión, analizador de gases	regular la apertura de válvula	tanque de almacenamiento de reserva para syngas	instalar alarma por alta presión y alto flujo, psv
		menos presión	flujo de syngas menor, fugas	desconocida	pérdida de producto	medidor de presión, sensor de presión	detección de fugas	contratación de personal especializado para las reparaciones	mantenimiento en empaques y soldaduras, alarma por baja presión
		menos temperatura	falla en el sistema de refrigeración	desconocida	más condensados, posible obstrucción de descarga de condensados	medidor de flujo, medidor de temperatura	regular válvula de entrada de refrigerante	N/A	instalar termopar, alarma por baja temperatura y por alto flujo
		menos condensados	entrada de syngas a mayor temperatura	desconocida	cambio de composición de syngas	analizador de gases	aumentar el flujo de refrigerante	N/A	instalar analizador total de gases
		menos flujo de refrigerante	válvula parcialmente cerrada	desconocida	aumento de temperatura, menos condensados, contaminación de syngas	medidor de temperatura, medidor de flujo, analizador de gases	regular apertura de válvula	N/A	instalar termopar, alarma por bajo flujo, analizador total de gases
		menos flujo de syngas	válvula parcialmente cerrada	desconocida	aumento de condensados, obstrucción en la descarga	medidor de flujo	regular apertura de válvula	N/A	instalar alarma por bajo flujo

	además de más presión más temperatura	falla en sistema de refrigeración, válvula de syngas totalmente abierta, obstrucciones	desconocida	deformación del equipo, no hay condensado contaminación de productos	medidor de flujo y de temperatura	regular apertura de válvula de syngas, y de refrigerante	verificar que no haya obstrucciones en el equipo	alarma por alta presión y temperatura, termopares, analizador total de gases, psv
	además de más presión más condensados	válvula de syngas y refrigerante totalmente abierta	desconocida	cambio de composición de syngas, daño parcial en el equipo, incrustaciones en descarga de condensado, corrosión	medidor de flujo, medidor de presión	regular apertura de válvulas, depurar condensados	indicador de nivel	alarma por alta presión, por alto flujo y por alto nivel de condensados, psv
	además de más presión más refrigerante	válvula de syngas y refrigerante totalmente abierta	desconocida	cambio de composición de syngas, daño parcial en el equipo, incrustaciones en descarga de condensado, corrosión	medidor de flujo, medidor de presión	regular apertura de válvulas, depurar condensados	indicador de nivel	alarma por alta presión, por alto flujo y por alto nivel de condensados, psv
	además de menos presión más temperatura	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica

	además de menos presión más condensados	válvula de syngas parcialmente cerrada, fugas en empaques o soldaduras	desconocida	cambio de composición de syngas, pérdida de producto	indicador de presión, indicador de nivel, medidor de flujo	regular apertura de válvula de syngas	revisión de empaques y soldaduras	instalar alarma por bajo flujo, baja presión y alto nivel, mantenimiento del equipo
	además de menos presión más refrigerante	válvula de syngas parcialmente cerrada, válvula de refrigerante totalmente abierta	desconocida	mayor cantidad de condensados	indicador de flujo, medidor de nivel, medidor de presión	regular apertura de válvulas	N/A	instalar alarma por baja presión, alto flujo
	además de menos presión más flujo de syngas	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
	además de más presión menos temperatura	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
	además de más presión menos condensados	válvula de syngas totalmente abierta y del refrigerante parcialmente cerrada	desconocida	contaminación de productos, daño al equipo	medidor de presión, indicador de flujo, analizador de gases	regular apertura de válvulas	N/A	instalar alarma por alta presión, por alto y bajo flujo, analizador total de gases, psv

	además de más presión menos refrigerante	válvula de syngas totalmente abierta y del refrigerante parcialmente cerrada	desconocida	contaminación de productos, daño al equipo	medidor de presión, indicador de flujo, analizador de gases	regular apertura de válvulas	N/A	instalar alarma por alta presión, por alto y bajo flujo, analizador total de gases, psv
	además de más presión menos flujo de syngas	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
	además de menos presión menos temperatura	fugas en soldaduras y empaques	desconocida	pérdida de producto y exposición a sustancias tóxicas y nocivas, atmósfera explosiva en la planta	medidores de presión y temperatura	revisión de empaques y soldaduras, detección de fugas	mantenimiento por personal calificado	mantenimiento periódico del equipo, alarma por baja temperatura y baja presión
	además de menos presión menos condensados	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
	además de menos presión menos refrigerante	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
	además de menos presión menos flujo de syngas	válvula de alimentación de syngas parcialmente cerrada	desconocida	menor obtención de productos	medidor de flujo, medidor de presión	regular apertura de válvula de syngas	N/A	alarma por bajo flujo y por baja presión

		no hay presión	fugas en soldaduras y empaques	desconocida	pérdida de productos, atmosfera explosiva en la planta	indicador de presión	detección de fallas en el equipo	de ser necesario, reemplazar el equipo	mantenimiento periódico, alarma por muy baja presión
		no hay temperatura	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		no hay condensados	fallo total en el sistema refrigerante, falla en bomba	desconocida	contaminación de productos	medidor de nivel, medidor de flujo	detectar y corregir falla en sistema de refrigeración	mantenimiento periódico a la bomba	instalar bypass para reproceso de syngas, instalar alarma por muy bajo flujo
		no hay flujo de syngas	válvula totalmente cerrada u obstruida	desconocida	no hay producción	indicador de flujo	apertura de válvula	N/A	instalar alarma por muy bajo flujo
3	torre flash	más presión	válvula de entrada totalmente abierta, válvula de descarga totalmente cerrada	desconocida	deformación del equipo, falla en empaques y soldaduras, atmosfera explosiva	indicador de presión	regular apertura de válvulas	de ser necesario, mantenimiento a empaques y soldaduras	instalar alarma por alta presión, psv
		más temperatura	falla en el intercambiador que entra al clarificador	desconocida	arrastre de vapor en la corriente de syngas	indicador de temperatura	revisar el equipo anterior y corregir falla	N/A	instalar alarma por alta temperatura
		más flujo	válvula totalmente abierta	desconocida	inundación de la torre, contaminación del syngas	medidor de flujo	regular apertura de válvula	N/A	instalar alarma por alto flujo, por alto nivel, instalar indicadores de nivel, purga
		menos presión	fugas en el equipo, menor producción de syngas, fugas en el equipo anterior	desconocida	menor separación, menor obtención de productos	indicador de presión	mantenimiento a empaques y soldaduras	N/A	alarma por baja presión

		menos temperatura	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		menos flujo	válvula parcialmente cerrada	desconocida	menor separación de syngas	indicador de flujo	regular apertura de válvula	N/A	instalar alarma por bajo flujo y por bajo nivel, instalar indicador de nivel
		además de más presión, más temperatura	falla en el tanque reductor de alta presión, falla en el condensador	desconocida	riesgo de explosión, deformación del equipo, pérdida de syngas	indicador de presión y temperatura	revisar falla en equipos anteriores	mantenimiento periódico a equipos	instalar alarma por alta temperatura y alta presión, psv, termopares
		además de más presión, más flujo	válvula totalmente abierta, válvula de salida de syngas totalmente cerrada	desconocida	riesgo de explosión, deformación del equipo, pérdida de syngas, atmosfera explosiva	indicadores de presión, indicador de flujo	regular apertura de válvulas	N/A	instalar alarma por alta presión, alto flujo, alto nivel, psv, controlador de flujo, purga
		además de menos presión, más temperatura	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		además de menos presión, más flujo	fuga en tanque reductor de presión, válvula alimentadora de agua totalmente abierta	desconocida	perdida de syngas, posible inundación de la torre	medidores de presión, medidor de flujo	regular apertura de válvula	mantenimiento al equipo anterior	instalar alarmas por alto flujo, alto nivel, por baja presión, controlador de flujo, purga
		además de más presión, menos temperatura	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		además de más presión, menos flujo	mayor alimentación de syngas, menor alimentación de agua	desconocida	separación incompleta, riesgo de explosión deformación del equipo	indicador de presión y de flujo	regular apertura de las válvulas	N/A	instalar alarmas por alarmas por alta presión, por bajo flujo, por bajo nivel, psv

		además de menos presión, más temperatura	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		además de menos presión, más flujo	válvula totalmente abierta, falla en empaques y soldaduras	desconocida	contaminación de syngas, posible inundación de torre	medidor de presión y flujo	regular apertura de válvula,	N/A	instalar alarmas por alarmas por baja presión, por alto flujo, por alto nivel, purga, indicador de nivel, controlador de flujo
		además de menos presión, menos temperatura	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		además de menos presión, menos flujo	válvulas parcialmente cerradas	desconocida	menor separación, menor obtención de productos	indicador de presión y de flujo	regular apertura de válvulas	N/A	instalar alarmas por bajo flujo y baja presión, instalar controlador de flujo, indicador de nivel
		no hay presión	válvula totalmente cerrada, falla total en el equipo	desconocida	no hay separación, no hay producción	indicador de presión	regular apertura de válvula	mantenimiento periódico a empaques y soldaduras	instalar alarma por muy baja presión
		no hay temperatura	válvula totalmente cerrada	desconocida	no hay separación, no hay producción	indicador de temperatura	regular apertura de válvula	N/A	instalar alarma por muy baja temperatura, termopares
		no hay flujo	válvula totalmente cerrada	desconocida	no hay separación, no hay producción	indicador de flujo	regular apertura de válvula	N/A	instalar alarma por muy bajo flujo y muy bajo nivel, indicador de nivel

4	clarificador	más flujo	válvula más abierta	desconocida	mayor obtención de agua con ceniza, desgaste de la tubería por fricción, incrustaciones, filtración incompleta, saturación del medio filtrante, inundación de gasificador	controlador de flujo	regular apertura de válvula	realizar radiografía en tuberías de manera periódica	alarma por alto flujo y por alto nivel
		más cantidad de cenizas	reacción incompleta en el gasificador	desconocida	obstrucción de conductos y medio filtrante, desgaste de la tubería por fricción, filtración incompleta, saturación del medio filtrante, inundación de gasificador	medidor de presión	revisión de gasificador y entrada al clarificador	mantenimiento periódico	instalar purga, alarma por baja presión, por alto nivel
		más nivel	válvula de descarga totalmente cerrada, aumento en el flujo de entrada, bloqueo por cenizas	desconocida	inundación del gasificador, pérdida de materia prima, mal uso de la energía	indicador de nivel, medidor de flujo	regular apertura de válvula	mantenimiento a tuberías y válvulas	alarma por alto nivel
		menos flujo	válvula parcialmente cerrada u obstruida	desconocida	menor recuperación de agua	medidor de flujo	regular apertura de válvula	mantenimiento a tuberías y válvulas	alarma por bajo flujo

	menos cantidad de cenizas	no aplica	desconocida	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
	menos nivel	válvula de descarga totalmente abierta y válvula de entrada parcialmente cerrada, obstrucción de tuberías, bajo flujo de entrada	desconocida	menor obtención de agua necesaria para la torre flash	indicador de nivel, medidor de flujo	regular apertura de válvulas	mantenimiento a tuberías y válvulas	alarma por bajo nivel
	además de más flujo, más cantidad de cenizas	reacción incompleta en gasificador, válvula más abierta	desconocida	obstrucción de conductos, saturación del medio filtrante, inundación de gasificador	medidor de nivel, medidor de flujo	regular apertura de válvulas	mantenimiento a tuberías y válvulas, revisar gasificador	instalar purga, cambio del medio filtrante, alarma por alto flujo y alto nivel
	además de más flujo, más nivel	válvula más abierta, obstrucción en la descarga	desconocida	inundación del gasificador, saturación del medio filtrante	medidor de nivel, medidor de flujo	regular apertura de válvulas	N/A	alarma por alto nivel y por alto flujo, cambio del medio filtrante
	además de menos flujo, más cantidad de cenizas	reacción incompleta en gasificador	desconocida	obstrucción de conductos, desgaste de tuberías por fricción, saturación del medio filtrante, menor suministro de agua para la torre flash	medidor de flujo	revisar entrada de clarificador	revisión de gasificador, radiografía periódica de tuberías	alarma por bajo flujo
	además de menos flujo, más nivel	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica

		además de más flujo menos cantidad de cenizas	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		además de más flujo menos nivel	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		además de menos flujo menos cantidad de cenizas	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		además de menos flujo menos nivel	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		no hay flujo	válvula totalmente cerrada u obstruida	desconocida	inundación del gasificador, contaminación de productos, pérdida de materia prima	medidor de flujo	regular apertura de válvula	mantenimiento a válvulas y tuberías	instalar alarma por muy bajo flujo, purga en tubería
		no hay cenizas	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		no hay nivel	válvula totalmente cerrada u obstruida, flujo nulo	desconocida	inundación del gasificador, contaminación de productos, pérdida de materia prima	medidor de nivel	regular apertura de válvula	mantenimiento a válvulas y tuberías, revisión de gasificador	instalar alarma por muy bajo nivel y muy bajo flujo, purga en tubería
5	filtros al vacío	más flujo	menor cantidad de cenizas, válvula totalmente abierta	desconocida	saturación del medio filtrante	medidor de flujo	regular apertura de válvula	analizador total de carbón	instalar alarma por alto nivel de flujo, bypass

		más nivel	válvula totalmente abierta, obstrucción del medio filtrante	desconocida	aumento de presión, saturación del medio filtrante	medidor de nivel	regular apertura de válvula, realizar purga de filtro	analizador total de carbón	alarma por alto nivel, bypass
		más presión	falla en el vacío	desconocida	no hay filtración	medidor de presión	regular apertura de válvula	N/A	Instalación de alarma por alta presión, instalar válvulas de alivio.
		más mantenimiento al medio filtrante	no aplica	no aplica	pérdidas económicas	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		menos flujo	válvula parcialmente cerrada, obstrucción por partículas gruesas de cenizas	desconocida	saturación de contenedor de ceniza fina	medidor de flujo	purga del contenedor de ceniza y regular apertura de válvula	N/A	instalación de alarma por bajo flujo
		menos nivel	menor cantidad de flujo, obstrucción en la entrada, fugas	desconocida	menor obtención de agua de recirculación, mal uso de la energía	medidor de nivel	regular apertura de válvula	N/A	instalación de alarma por bajo nivel, mantenimiento por bajo nivel
		menos presión	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		además de más flujo más nivel	válvula totalmente abierta, obstrucción del conducto de salida	desconocida	saturación del medio filtrante, contaminación del agua de recirculación	medidores de flujo y nivel	purga de filtro y regular apertura de válvula	analizador total de carbón	alarmas por alto flujo y nivel
		además de más flujo más presión	válvula totalmente abierta, falla en vacío, mayor caudal de agua de enfriamiento	desconocida	saturación del medio filtrante, filtración incompleta	medidores de flujo y presión	regular apertura de válvula y vacío	analizador total de carbón	instalación de alarmas por alta presión y alto flujo

		además de más flujo más mantenimiento al medio filtrante	no aplica	no aplica	más gasto económico	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		además de menos flujo más nivel	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		además de menos flujo más presión	válvula parcialmente cerrada, falla en el vacío	desconocida	filtración incompleta, menor cantidad de agua de recirculación	medidores de flujo y presión	regular apertura de válvula	analizador total de carbón	regulador de vacío, alarmas por bajo flujo y alta presión
		además de menos flujo más mantenimiento al medio filtrante	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		además de más flujo menos nivel	fugas en el filtro	Desconocida	pérdida de agua de recirculación, aumento de presión	medidores de nivel y flujo	regulación de apertura de válvulas	mantenimiento preventivo	alarma por alto flujo y alarma por bajo nivel
		además de más flujo menos presión	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		además de más flujo menos mantenimiento al medio filtrante	válvula totalmente abierta, saturación del medio filtrante	desconocida	saturación de medio filtrante, filtración incompleta, menor cantidad de agua de recirculación	medidor de flujo	regulación de apertura de válvula	analizador total de carbón	alarma por alto flujo
		además de menos flujo menos nivel	fugas, obstrucciones y válvula parcialmente cerrada	desconocida	Menor nivel de agua de recirculación, mal uso de la energía	medidores de flujo y nivel	regulación de apertura de válvula y purga del filtro	mantenimiento preventivo	alarmas por bajo flujo y nivel

		además de menos flujo menos presión	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		además de menos flujo menos mantenimiento al medio filtrante	válvula parcialmente cerrada y saturación del medio filtrante	desconocida	filtración incompleta	medidor de flujo	regulación de apertura de válvula	analizador total de Carbono	instalación de alarma por bajo flujo
		no hay flujo	válvula totalmente cerrada	desconocida	obstrucción del equipo receptor de cenizas finas	medidor de flujo y nivel	apertura de válvula y purga del receptor de cenizas	N/A	alarma por bajo flujo y nivel
		no hay nivel	obstrucción y fugas en el filtro	desconocida	obstrucción del equipo receptor de cenizas finas	medidor de flujo y nivel	apertura de válvula y purga del receptor de cenizas	N/A	alarma por bajo flujo y nivel
		no hay presión	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		no hay mantenimiento al medio filtrante	medio filtrante agotado	desconocida	no hay filtración	analizador total de carbono	cambiar medio filtrante	N/A	mantenimiento preventivo
6	tanques de almacenamiento	más presión	mayor flujo de syngas	desconocida	riesgo de explosión, daño en el equipo	medidor de presión	regular apertura de válvulas	N/A	instalar alarma por alta presión, psv
		más nivel	mayor flujo de syngas	desconocida	riesgo de explosión, daño en el equipo	medidor de nivel	regular apertura de válvulas	N/A	instalar alarma por alto nivel, psv
		menos presión	falla en sistema de presurización, fugas	desconocida	pérdida de producto, pérdidas económicas, genera atmósfera explosiva	medidor de presión	mantenimiento en soldaduras y empaques	N/A	instalar alarma por baja presión, mantenimiento periódico del equipo

	menos nivel	menor flujo de entrada, fugas	desconocida	pérdida de producto, pérdidas económicas, genera atmósfera explosiva	medidor de nivel	mantenimiento en soldaduras y empaques	regular apertura de la válvula	alarma por bajo nivel, mantenimiento periódico del equipo
	además de más presión más nivel	válvula de entrada totalmente abierta	desconocida	riesgo de explosión, daño en el equipo, pérdidas económicas	medidor de presión y de nivel	purga de tanque, regular apertura de válvula	N/A	instalar alarma por alto nivel y presión, instalar psv
	además de menos presión, más nivel	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
	además de más presión menos nivel	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
	además de menos presión menos nivel	válvula parcialmente cerrada, fugas	desconocida	pérdida de producto, pérdidas económicas, genera atmósfera explosiva	medidor de presión y nivel	regular apertura de válvula, mantenimiento a empaques y soldaduras	N/A	instalar alarma por baja presión y bajo nivel, mantenimiento periódico del equipo
	no hay presión	válvula totalmente cerrada, falla total del equipo, falla en torre flash y scrubber	desconocida	pérdida de producto, aumento de presión en scrubber y torre flash, genera atmósfera explosiva, daño al equipo	medidor de presión	regular apertura de válvula, válvula de alivio en scrubber y torre flash	mantenimiento o cambio del tanque	instalar alarma por muy baja presión, mantenimiento periódico al equipo
	no hay nivel	válvula totalmente cerrada, falla total del equipo, falla en torre flash y scrubber	desconocida	pérdida de producto, aumento de presión en scrubber y torre flas, genera	medidor de nivel	regular apertura de válvula, válvula de alivio en scrubber y torre flash	mantenimiento o cambio del tanque	instalar alarma por muy bajo nivel, mantenimiento periódico al equipo

					atmósfera explosiva, daño al equipo				
7	bombas	más flujo	válvula totalmente abierta	desconocida	sobrecalentamiento del motor, mayor vibración, mayor flujo de descarga	medidor de flujo, sensor de vibración	regular apertura de válvula	N/A	alarma por alto flujo, por alta vibración, controlador de flujo, indicador de temperatura en el motor
		más temperatura	sobrecarga de flujo, flujo a alta temperatura, falta de mantenimiento	desconocida	fallo de bomba, posible falla en motor	indicador de temperatura	mantenimiento al equipo, corrección en falla de equipo anterior	N/A	instalar alarma por alta temperatura
		más presión	mayor caudal de entrada	desconocida	mayor presión de descarga	medidor de presión	regular apertura de válvula	N/A	instalar alarma por alta presión y sensor de vibración
		más sólidos en suspensión	mezcla o filtración incompleta	desconocida	obstrucción en succión, sobrecarga del motor	analizador de sólidos, medidor de flujo, indicador de temperatura	mantenimiento a los filtros	N/A	instalar alarma por bajo flujo, alarma por alta temperatura
		flujo a dos fases	fuga en syngas, falla en el vacío	desconocida	cavitación de la bomba, fallo de bomba, falla en piezas interiores de la bomba	analizador de flujo	corregir fuga y vacío	N/A	alarma por alta y baja presión, sensor de vibración
		menos flujo	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		menos temperatura	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		menos presión	válvula parcialmente cerrada	desconocida	mayor vibración, sobrecalentamiento de la bomba, menor presión de descarga	medidor de presión	regular apertura de válvula	aumentar presión de entrada	instalar recirculación, alarma por baja presión

		además de más flujo, más temperatura	falla en equipo anterior, válvula totalmente abierta	desconocida	sobrecalentamiento del motor, mayor vibración, mayor flujo de descarga	medidor de flujo, medidor de temperatura	regular apertura de válvula, revisión del sistema de enfriamiento	mantenimiento al motor de la bomba	instalar alarma por alto flujo y alta temperatura
		además de más flujo, más presión	válvula totalmente abierta	desconocida	mayor flujo de descarga, sobrecarga del motor	medidor de flujo y de presión	regular apertura de válvula	N/A	instalar alarma por alta presión y alto flujo
		además de más flujo, más sólidos en suspensión	mezcla o filtración incompleta	desconocida	obstrucción de conductos, bajo o nulo flujo de descarga, desgaste de tuberías	analizador de flujo, medidor de flujo	revisar filtros y mezclador	mantenimiento de filtros y mezclador	alarma por bajo flujo en descarga
		además de menos flujo, más sólidos en suspensión	válvula parcialmente cerrada, falla en filtros y mezclador	desconocida	obstrucción en conductos, sobrecarga de bomba	medidor de flujo, analizador de flujo	regular apertura de válvula	mantenimiento al motor de la bomba	alarma por bajo flujo
		además de menos flujo, menos presión	válvula parcialmente cerrada, fugas en el vacío	desconocida	mayor vibración, sobrecalentamiento de la bomba, menor presión de descarga	medidor de presión y flujo	aumentar presión y flujo, regular apertura de válvulas	N/A	instalar alarma por baja presión y bajo flujo, instalar recirculación
		no hay flujo	válvula totalmente cerrada, obstrucción de conductos	desconocida	cavitación de la bomba, no hay descarga, falla de la bomba	indicador de flujo	regular apertura de válvula, limpieza de ductos	N/A	instalar alarma por muy bajo flujo
		no hay presión	no hay flujo a la entrada, obstrucción de conductos	desconocida	falla de la bomba, no hay descarga	medidor de presión	regular apertura de válvula, limpieza de ductos	N/A	instalar alarma por muy baja presión
8	mezclador	más nivel	falla en el sistema de alimentación, obstrucción en conducto de salida	desconocida	mezcla incompleta, desgaste de la flecha, falla en	medidor de nivel	remover exceso de materia prima	N/A	instalar alarma por alto nivel, recirculación

				motor, derrame de la mezcla				
	más alimentación de carbón	fallo en el sistema automatizado de alimentación	desconocida	mezcla incompleta, desgaste de la flecha, falla en motor, bloqueo en conducto de salida	indicador de nivel	remover exceso de materia prima	N/A	mantenimiento al sistema de alimentación, instalar alarma por alto nivel
	más alimentación de agua	válvula de alimentación totalmente abierta	desconocida	cambio en la composición de, mayor gasto energético, menor poder calorífico del carbón	medidor de flujo	regular apertura de válvula	N/A	instalar controlador de flujo y alarma por alto flujo
	mayor diámetro de partícula	falla del proveedor	desconocida	obstrucción de conductos desgaste de la flecha, falla en el motor	visual	cambio de lote o de proveedor	paro temporal de la planta	tener stock de materia prima
	más mantenimiento a la flecha	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
	menos nivel	falla en el sistema de alimentación de materia prima	desconocida	baja producción, mal uso de la energía, pérdidas económicas	sensor de nivel	revisar sistema automatizado de alimentación	mantenimiento al sistema de alimentación	instalar alarma por bajo nivel, sensor de nivel
	menos alimentación de carbón	falla en el sistema de alimentación de materia prima	desconocida	baja producción, mal uso de la energía, pérdidas económicas	sensor de nivel	revisar sistema automatizado de alimentación	mantenimiento al sistema de alimentación	instalar alarma por bajo nivel, sensor de nivel
	menos alimentación de agua	válvula parcialmente cerrada	desconocida	desgaste en piezas internas, desgaste de la flecha, posible falla en motor, obstrucción de conducto de salida	medidor de flujo	regular apertura de válvula	N/A	instalar alarma por bajo flujo

		menor diámetro de partícula	falla del proveedor	desconocida	mayor gasto energético, bajo poder calorífico del carbón	visual	cambio de lote o de proveedor	paro temporal de la planta	tener stock de materia prima
		menos mantenimiento a la flecha	falta de presupuesto	desconocida	mezcla incompleta, sobrecalentamiento del motor, obstrucción de conductos	analizador total de carbón	reparación o cambio de flecha	mezclador de relevo	instalar sensores de vibración, alarmas por alta, muy alta, baja y muy baja vibración, alarma por alta, muy alta temperatura en el motor, flechas en stock
		además de más nivel, mayor diámetro de partícula	falla del proveedor, obstrucción de conductos, válvula de agua totalmente abierta	desconocida	posible desborde, pérdida de materia prima, mezcla incompleta, sobrecalentamiento del motor	sensor de nivel, medidor de flujo, visual	purga, cambiar lote o cambio de proveedor	N/A	materia prima en stock, sensor de nivel, instalar alarma por alto nivel, controlador de flujo
		no hay nivel	falla en el sistema de alimentación de materia prima, válvula totalmente cerrada	desconocida	no hay producción	medidor de flujo y medidor de nivel	apertura de válvula, mantenimiento al sistema de alimentación	N/A	alarma por muy bajo nivel y muy bajo flujo
		no hay mantenimiento a la flecha	no hay presupuesto, negligencia del operador	desconocida	no hay producción, falla total del motor, obstrucción de conductos	visual, no hay flujo de entrada en el gasificador	cambio de flecha o mantenimiento de la flecha	adecuada capacitación de operadores	inspección periódica del equipo, mezclador de relevo
9	intercambiador de calor	más temperatura	falla en el sistema de refrigeración	desconocida	syngas caliente, recirculación de agua caliente, menor intercambio de calor, aumento de presión	sensor de temperatura	revisar y corregir falla en el sistema de enfriamiento	mantenimiento periódico	instalar alarma por alta temperatura, termopares
		más flujo	válvula totalmente abierta	desconocida	syngas caliente, menor intercambio energético	medidor de presión y	regular apertura de válvula	N/A	instalar alarmas por alta presión y alto flujo

					medidor de flujo			
más intercambio de calor	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
menos temperatura	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
menos flujo	falla en bomba, obstrucción en los conductos o equipo anterior, bajo nivel de agua en torre de enfriamiento	desconocida	deficiencia en el enfriamiento de syngas, clarificador y cenizas	medidor de flujo, medidor de nivel en torre de enfriamiento, medidores de temperatura	corregir fallas en sistema de enfriamiento	mantenimiento periódico a los equipos	instalar alarma por bajo flujo, bajo nivel en torre, termopares	
menos intercambio de calor	falla del intercambiador	desconocida	falla general del proceso	medidor de temperatura y de presión	mantenimiento del equipo	radiografía del intercambiador de calor	instalar medidor de presión y termopares	
además de más temperatura, más flujo	válvula totalmente abierta, falla en el intercambiador	desconocida	poco intercambio energético	medidor de flujo y de temperatura	regular apertura de válvulas, mantenimiento al equipo	N/A	instalar termopares, controlador de flujo	
además de más temperatura, más intercambio de calor	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	
además de menos temperatura, más flujo	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	

		además de menos temperatura, más intercambio de calor	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		además de más temperatura, menos flujo	Falla del intercambiador de calor, falla en bomba, obstrucción en los conductos o equipo anterior, bajo nivel de agua en torre de enfriamiento	desconocida	falla general del proceso, deficiencia en el enfriamiento de syngas, clarificador y cenizas	medidor de temperatura y de presión, medidor de flujo, medidor de nivel en torre de enfriamiento	mantenimiento del equipo, corregir fallas en sistema de enfriamiento	radiografía del intercambiador de calor	instalar alarma por bajo flujo, bajo nivel en torre, medidor de presión y termopares
		además de más temperatura, menos intercambio de calor	falla en el intercambiador	desconocida	poco intercambio energético	medidor de flujo y de temperatura	mantenimiento al equipo	N/A	instalar termopares, controlador de flujo
		además de menos temperatura, menos flujo	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		además de menos temperatura, menos intercambio de calor	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica

		no hay temperatura	falla general del proceso	desconocida	no hay producción	visual	corregir falla en proceso	N/A	mantenimiento periódico a los equipos
		no hay flujo	falla general del proceso	desconocida	no hay producción	visual	corregir falla en proceso	N/A	mantenimiento periódico a los equipos
		no hay intercambio de calor	falla total en el sistema de enfriamiento	desconocida	no hay intercambio energético, syngas caliente, clarificador caliente, aumento de presión, posible generación de vapor, generar flujo a dos fases, riesgo de explosión	medidores de flujo, medidor de temperatura, medidor de presión	paro total de la planta	mantenimiento o cambio de intercambiador de calor	instalar alarmas por muy bajo flujo, por muy alta temperatura, por alta presión

3.13 Índice de instrumentos.

TAG	VARIABLE A MEDIR	SERVICIO/EQUIPO	AREA DE LA PLANTA	TIPO DE MONTAJE			
FE-101	Flujo	Mezclador (FA-100)	Acondicionamiento de materia prima	En campo			
FT-101				En campo			
FIC-101				Cuarto de control			
FAL-101				Cuarto de control			
FAH-101				Cuarto de control			
FALL-101				Cuarto de control			
FAHH-101				Cuarto de control			
FE-102				Cuarto de control			
FT-102				Cuarto de control			
FIC-102				Cuarto de control			
FAL-102				Cuarto de control			
FAH-102				Cuarto de control			
FALL-102				Cuarto de control			
FAHH-102				Cuarto de control			
FY-102				Cuarto de control			
LE-101				Nivel	Mezclador (FA-100)	Acondicionamiento de materia prima	En campo
LT-101	En campo						
LIC-101	Cuarto de control						
LY-101	Cuarto de control						
SE-101	Velocidad	Banda Transportadora (MOTR-100)	Acondicionamiento de materia prima	En campo			
ST-101				En campo			
SIC-101				Cuarto de control			
SY-101				Cuarto de control			
PI-101	Presión	Bomba (Típico de instalación) GA-100, GA-200, GA-400	Acondicionamiento de materia prima	Cuarto de control			
PE-101				En campo			
PT-101				En campo			
PI-102				Cuarto de control			
PAL-102				Cuarto de control			
PAH-102				Cuarto de control			
PC-102				Cuarto de control			
PY-102				Cuarto de control			
PI-103				Cuarto de control			
PE-102				Cuarto de control			
PT-102				Cuarto de control			
PI-104				Cuarto de control			
PAL-104				Cuarto de control			
PAH-104				Cuarto de control			
VE-101				Velocidad			En campo

VI-101				Cuarto de control
VT-101				En campo
VAL-101				Cuarto de control
VALL-101				Cuarto de control
VE-102		Bomba (Típico de instalación) GA-100, GA-200, GA-400	Acondicionamiento de materia prima	Cuarto de control
VI-102				Cuarto de control
VT-102				Cuarto de control
VAH-102				Cuarto de control
VAHH-102				Cuarto de control
TE-101				En campo
TT-101				En campo
TI-101	Temperatura	Bomba (Típico de instalación) GA-100, GA-200, GA-400	Acondicionamiento de materia prima	Cuarto de control
TAL-101				Cuarto de control
TAH-101				Cuarto de control
LE-201				Cuarto de control
LT-201				Cuarto de control
LH-201				En campo
LAHH-201	Nivel	Gasificador (DC-200)	Gasificación	En campo
LAL-201				En campo
LALL-201				En campo
LIC-201				En campo
FIC-201				Cuarto de control
FY-201				Cuarto de control
FAL-201				Cuarto de control
FALL-201				Cuarto de control
FAH-201				Cuarto de control
FAHH-201				Cuarto de control
FE-202				En campo
FT-202				En campo
FAL-202	Flujo	Gasificador (DC-200)	Gasificación	En campo
FALL-202				En campo
FAH-202				En campo
FAHH-202				En campo
FIC-202				En campo
FY-202				En campo
FI-203				Cuarto de control
FE-203				En campo
FIC-203				Cuarto de control
FY-203				Cuarto de control
TE-201				En campo
TT-201	Temperatura	Gasificador (DC-200)	Gasificación	En campo
TAH-201				Cuarto de control

TAHH-201				Cuarto de control
TAL-201				Cuarto de control
TALL-201				Cuarto de control
TIC-201				Cuarto de control
PE-201	Presión	Gasificador (DC-200)	Gasificación	En campo
PT-201				En campo
PAH-201				Cuarto de control
PAHH-201				Cuarto de control
PAL-201				Cuarto de control
PALL-201				Cuarto de control
PI-201				Cuarto de control
LE-202				Nivel
LT-202	En campo			
LTC-202	Cuarto de control			
LY-202	Cuarto de control			
FY-204	Flujo	Gasificador (DC-200)	Gasificación	Cuarto de control
FIC-204				Cuarto de control
FAL-204				Cuarto de control
FALL-204				Cuarto de control
FAH-204	Flujo	Gasificador (DC-200)	Gasificación	Cuarto de control
FAHH-204				Cuarto de control
FT-204				En campo
FE-204				En campo
TE-202	Temperatura	Gasificador (DC-200)	Gasificación	En campo
TT-202				En campo
TH-202				Cuarto de control
TAL-202				Cuarto de control
TI-202				Cuarto de control
FE-205				Flujo
FT-205	En campo			
FIC-205	Cuarto de control			
LE-203	Nivel	Exclusa Cerrada FA-200, Tanque de descarga FA-203, Tamizadora FD-200, Receptor de escoria fina FA-202	Gasificación	En campo
LT-203				Cuarto de control
LTC-203				Cuarto de control
LY-203				Cuarto de control
LE-204				En campo
LT-204				En campo
LIC-204				Cuarto de control
LY-204				Cuarto de control
LE-205				En campo
LT-205				En campo
LTC-205				Cuarto de control

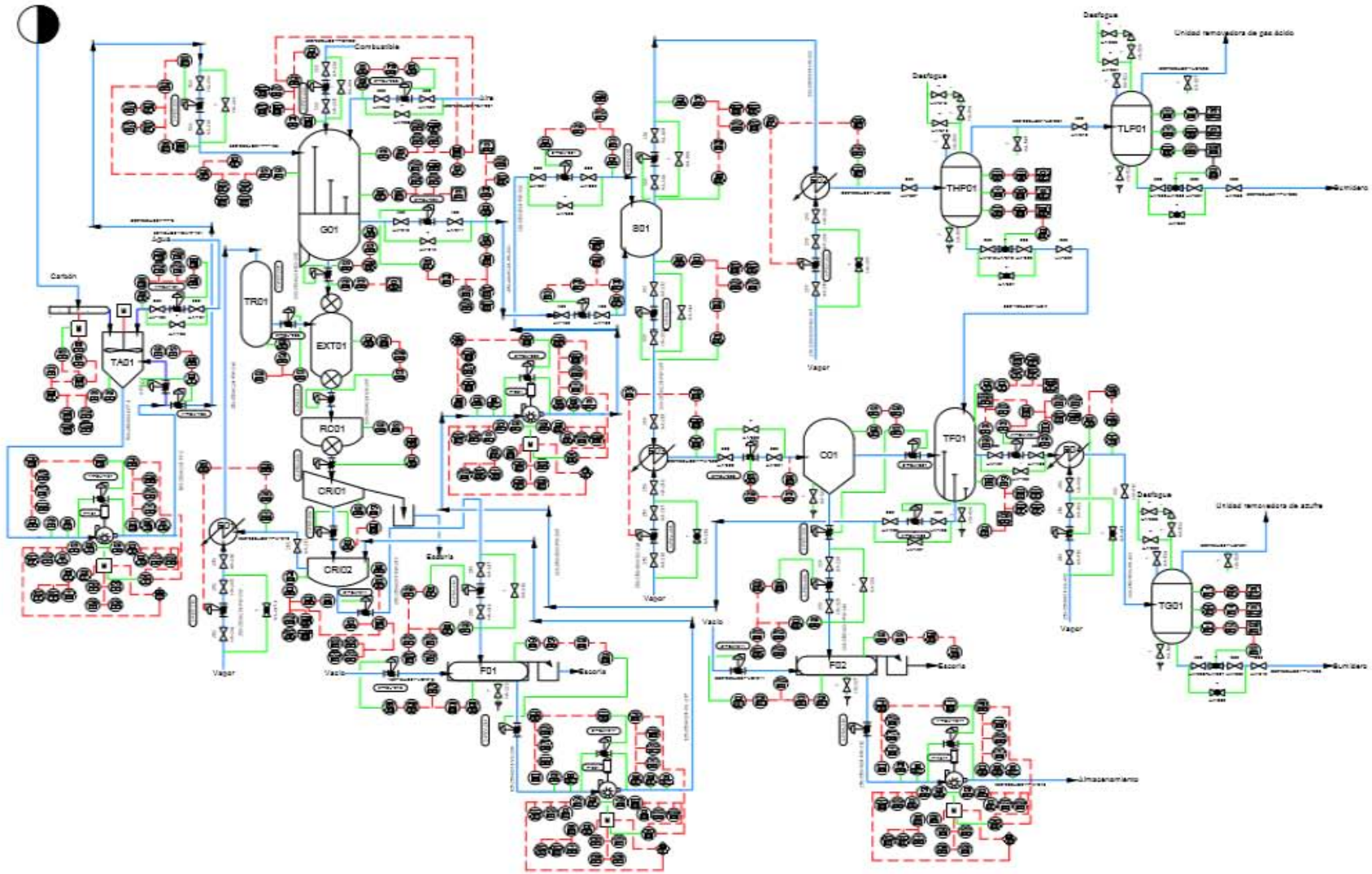
PE-203				En campo			
PI-203-A				Cuarto de control			
PY-203				Cuarto de control			
PC-204				Cuarto de control			
PAL-204				Cuarto de control			
PAH-204				Cuarto de control			
PI-204				Cuarto de control			
PT-204				Cuarto de control			
PE-204				En campo			
PI-204-A				Cuarto de control			
VE-201	Vibración	Bomba (Típico de instalación) GA-100, GA-200, GA-400	Gasificación	En campo			
VT-201				Cuarto de control			
VI-201				Cuarto de control			
VAL-201				Cuarto de control			
VALL-201				Cuarto de control			
TE-204	Temperatura	Bomba (Típico de instalación) GA-100, GA-200, GA-400	Gasificación	En campo			
TT-204				En campo			
TI-204				Cuarto de control			
TAL-204				Cuarto de control			
TAH-204				Cuarto de control			
VE-202	Vibración	Bomba (Típico de instalación) GA-100, GA-200, GA-400	Gasificación	En campo			
VT-202				En campo			
VI-202				Cuarto de control			
VAH-202				Cuarto de control			
VAHH-202				Cuarto de control			
PY-205				En cuarto de control			
FY-301	Flujo	Scrubber (DA-300)	Acondicionamiento de syngas	En cuarto de control			
FIC-301				En cuarto de control			
FAL-301				En cuarto de control			
FALL-301				En cuarto de control			
FT-301				En campo			
FE-301				En campo			
FE-302				En campo			
FT-302				En campo			
FAH-302				En cuarto de control			
FAHH-302				En cuarto de control			
FAL-302				En cuarto de control			
FALL-302				En cuarto de control			
FIC-302				En cuarto de control			
FY-302				En cuarto de control			
PY-301				Presión			En cuarto de control
PIC-301							En cuarto de control

PAH-301	Flujo			En cuarto de control			
PAHH-301				En cuarto de control			
PT-301				En campo			
PE-301				En campo			
FE-303				En campo			
FT-303				En campo			
FAH-303				En cuarto de control			
FAHH-303				En cuarto de control			
FAL-303				En cuarto de control			
FALL-303				En cuarto de control			
FIC-303				En cuarto de control			
FY-303				En cuarto de control			
PE-303				Presión	Bomba (Típico de instalación) GA-100, GA-200, GA-400	Acondicionamiento de syngas	En campo
PT-302	En campo						
PL-302	En cuarto de control						
PAL-302	En cuarto de control						
PAH-302	En cuarto de control						
PC-302	En cuarto de control						
PY-302	En cuarto de control						
PI-302A	En cuarto de control						
PI-303A	En cuarto de control						
PE-303	En campo						
PT-303	En campo						
PI-303	En cuarto de control						
PAH-303	En cuarto de control						
PAL-303	En cuarto de control						
PC-303	En cuarto de control						
VE-301	Vibración						En campo
VT-301							En campo
VI-301							En cuarto de control
VAL-301							En cuarto de control
VALL-301							En cuarto de control
VE-302				En campo			
VT-302				En campo			
VI-302				En cuarto de control			
VAH-302				En cuarto de control			
VAHH-302				En cuarto de control			
TE-302	Temperatura			En campo			
TT-302				En campo			
TI-302				En cuarto de control			
TAL-302				En cuarto de control			
TAH-302				En cuarto de control			

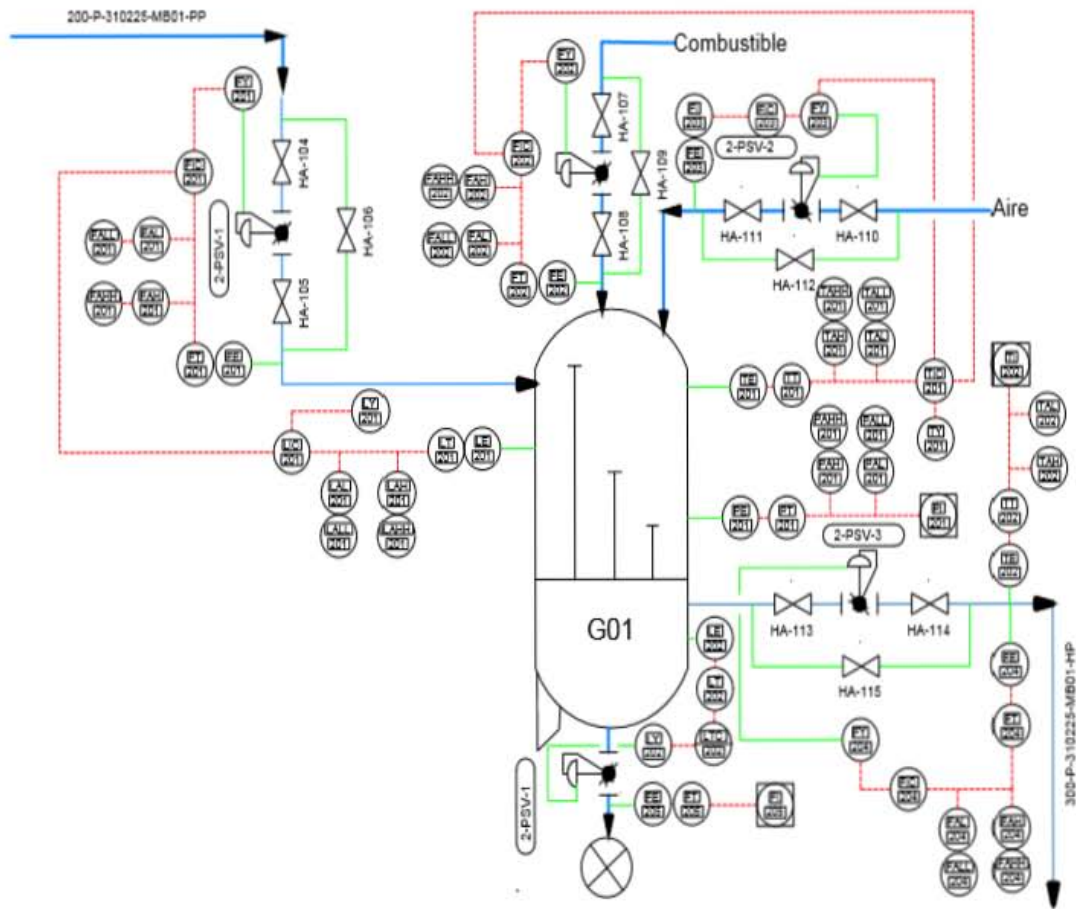
TAHH-303				En cuarto de control			
TI-303				En cuarto de control			
TC-303				En cuarto de control			
TIC-303				En cuarto de control			
TY-303				En cuarto de control			
FE-304	Flujo	Intercambiador (Típico de instalación) EA-200, EA-300, EA-301, EA-400	Gasificación - Acondicionamiento de Syngas- Separación de componentes	En campo			
FT-304				En campo			
FIC-304				En cuarto de control			
FY-304				En cuarto de control			
LE-301				Nivel			En campo
LT-301							En campo
LIC-301	En cuarto de control						
LY-301	Flujo	Clarificador (FG-300)	Acondicionamiento de syngas	En cuarto de control			
FE-305				En campo			
FT-305				En campo			
FAH-305				En cuarto de control			
FAHH-305				En cuarto de control			
FAL-305				En cuarto de control			
FALL-305				En cuarto de control			
FIC-305				En cuarto de control			
FY-305				En cuarto de control			
LE-401	Nivel			En campo			
LT-401				En campo			
LAL-401				En cuarto de control			
LALL-401				En cuarto de control			
LAH-401				En cuarto de control			
LAHH-401				En cuarto de control			
LIC-401				En cuarto de control			
LY-401				En cuarto de control			
TE-401	Temperatura	Torre Flash (DA-400)	Separación de componentes	En campo			
TT-401				En campo			
TIC-401				En cuarto de control			
TAH-401				En cuarto de control			
FIC-401	Flujo			En cuarto de control			
FY-401				En cuarto de control			
FAL-401				En cuarto de control			
FALL-401				En cuarto de control			
FAH-401				En cuarto de control			
FAHH-401				En cuarto de control			
FT-401				En campo			
FE-401	En campo						
PE-401	Presión			En campo			

PT-401				En campo
PAH-401				En cuarto de control
PAHH-401				En cuarto de control
PAL-401				En cuarto de control
PALL-401				En cuarto de control
PIC-401				En cuarto de control
PI-501		Tanque (Típico de instalación) FA-203, FA-300, FA-500, FA-501	Almacenamiento y distribución	En cuarto de control
PT-501				En campo
PI-501A				En cuarto de control
TI-501				En cuarto de control
TT-501	Temperatura			En campo
TI-501A				En cuarto de control
LI-501				En cuarto de control
LT-501				En cuarto de control
LIC-501				En cuarto de control
LY-501	Nivel			En cuarto de control

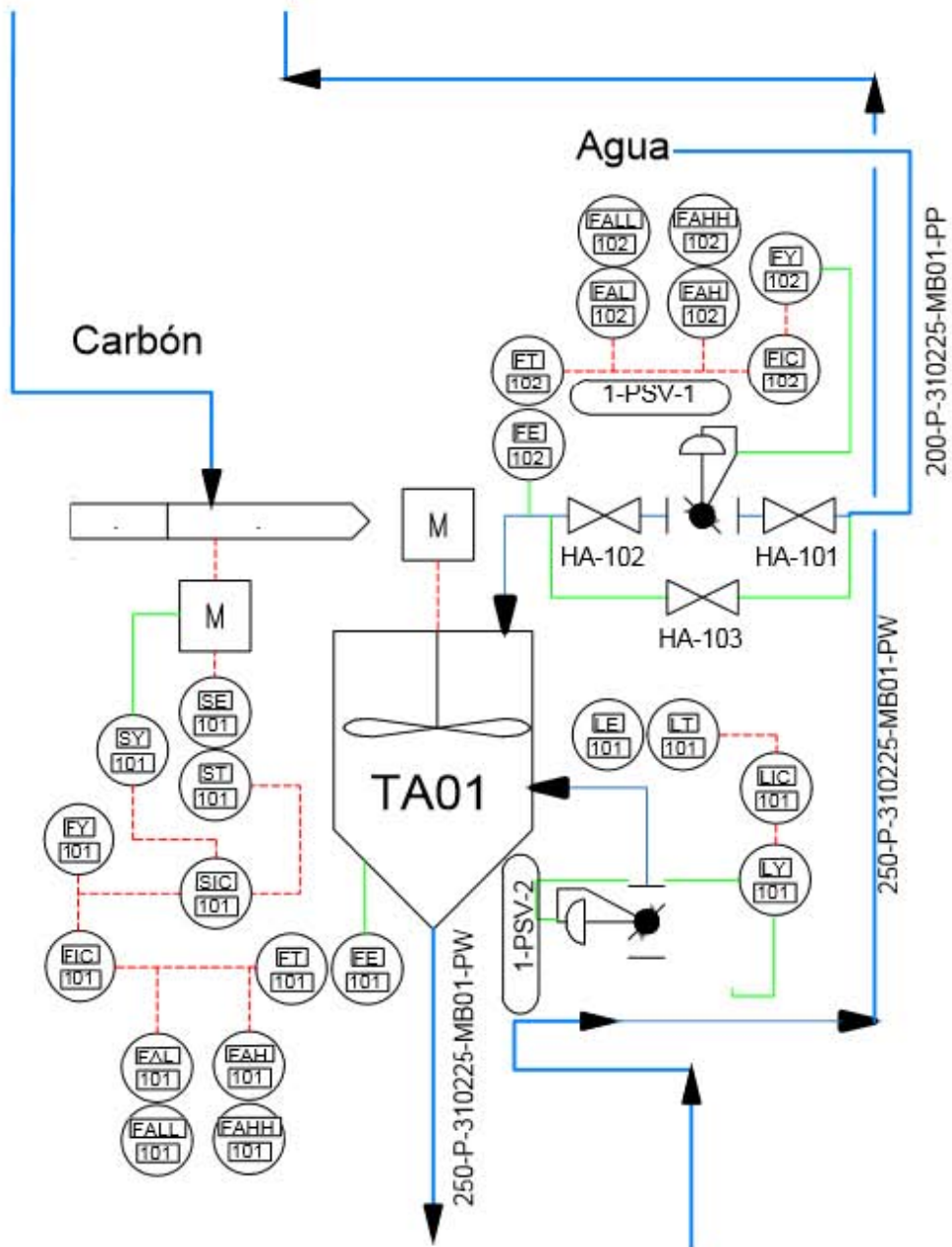
3.14 Diagrama de Tuberías e Instrumentación generado a partir de los análisis de riesgos



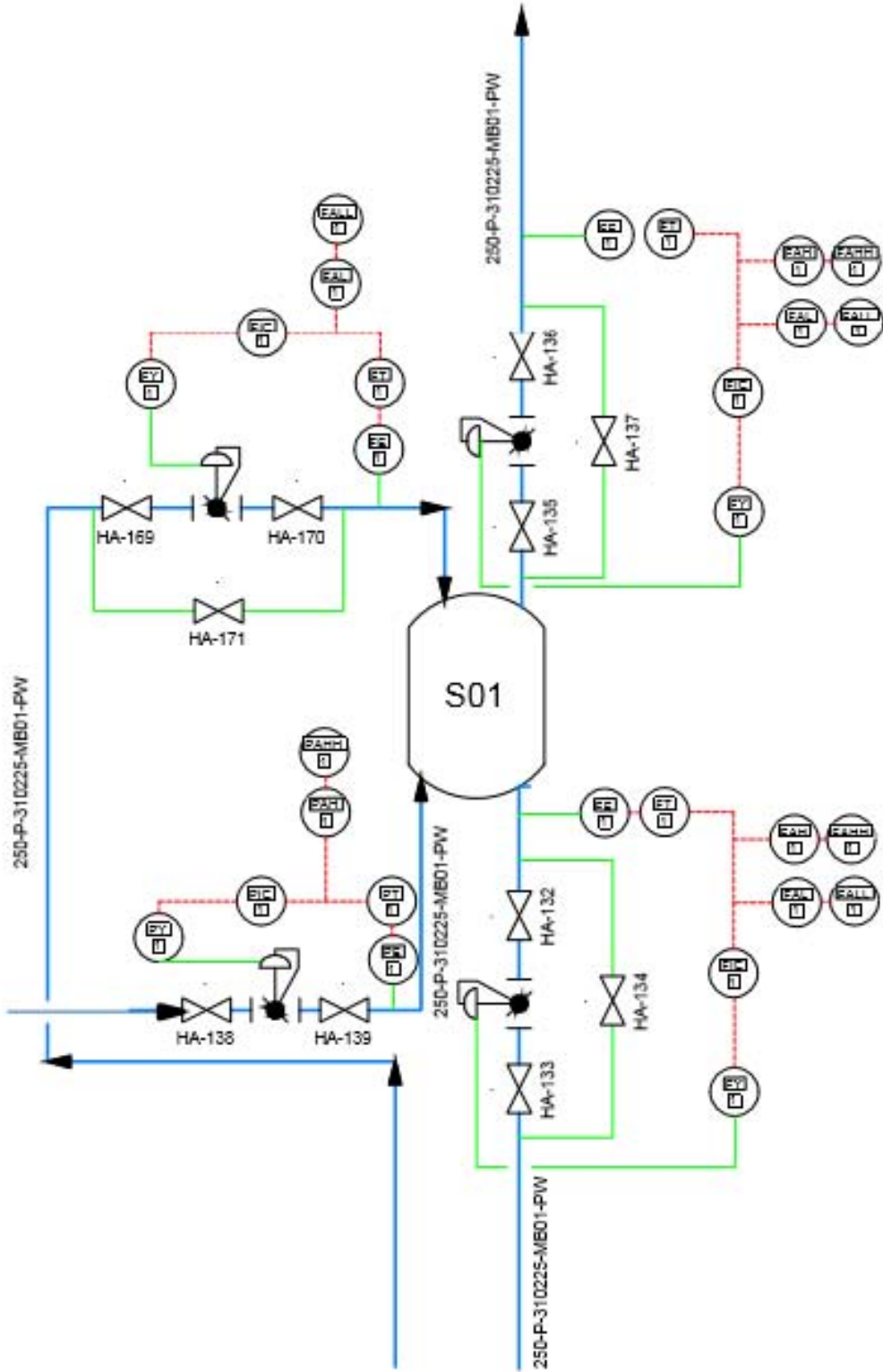
3.14.1 Nodo del gasificador



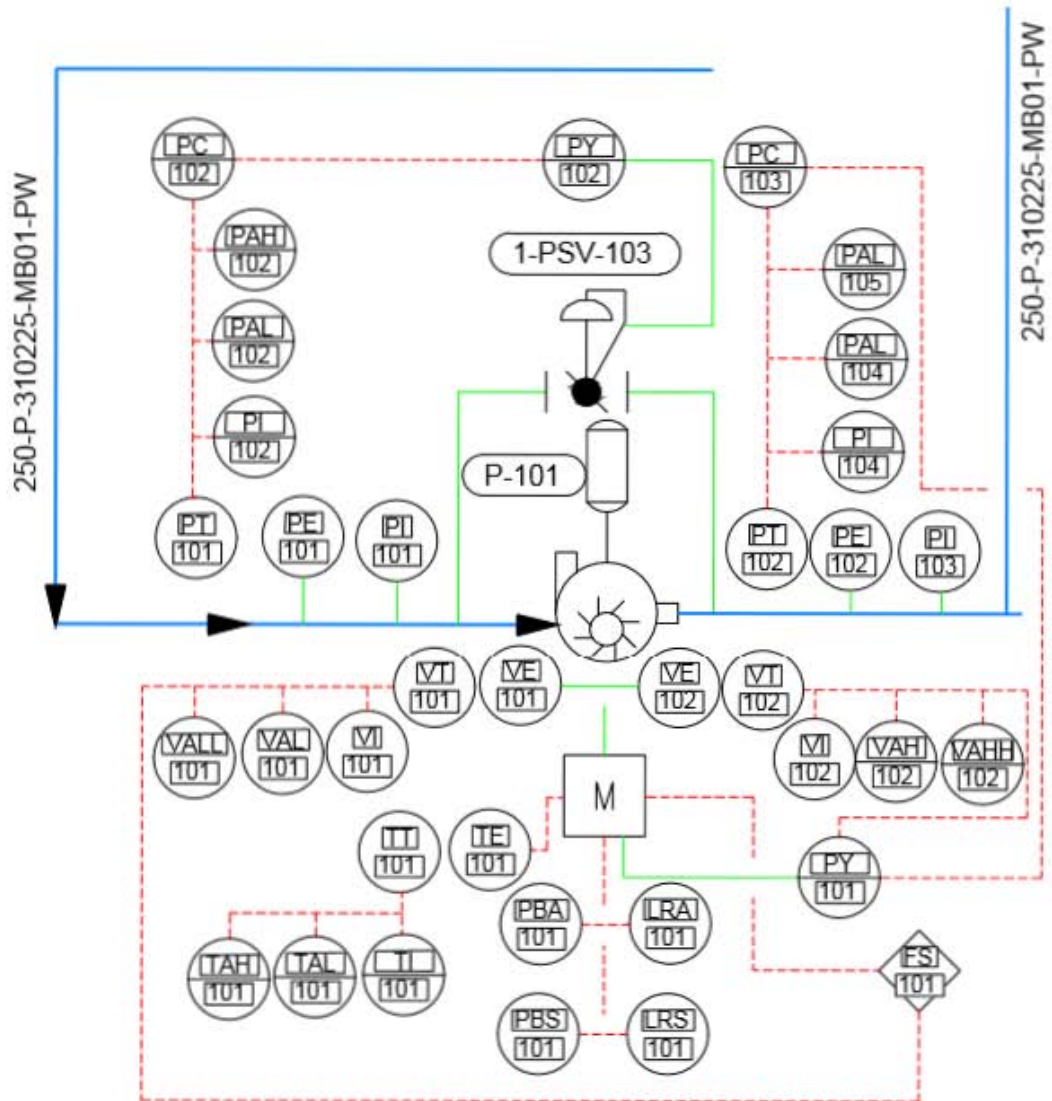
3.14.2 Nodo del mezclador



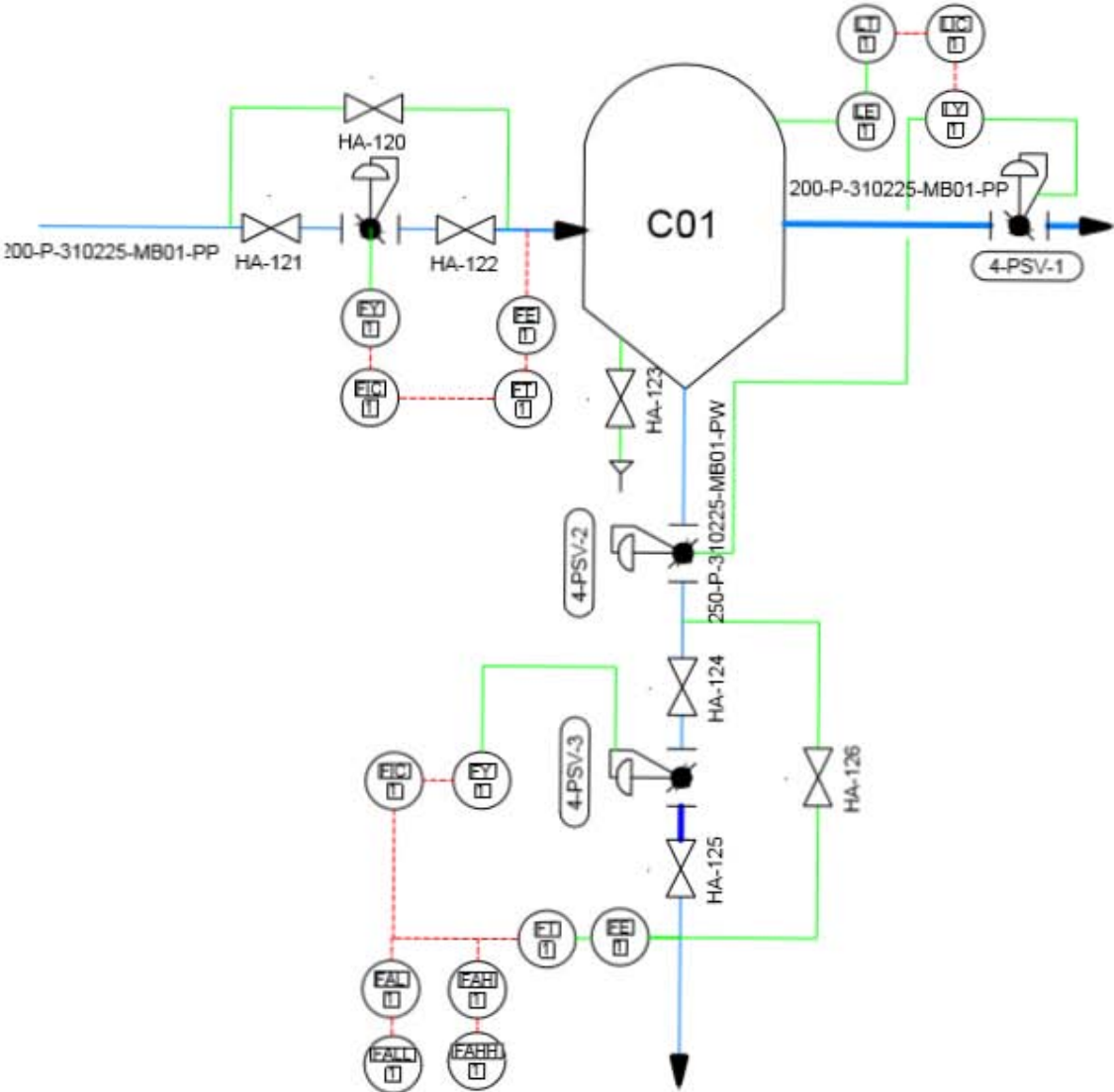
3.14.3 Nodo del scrubber



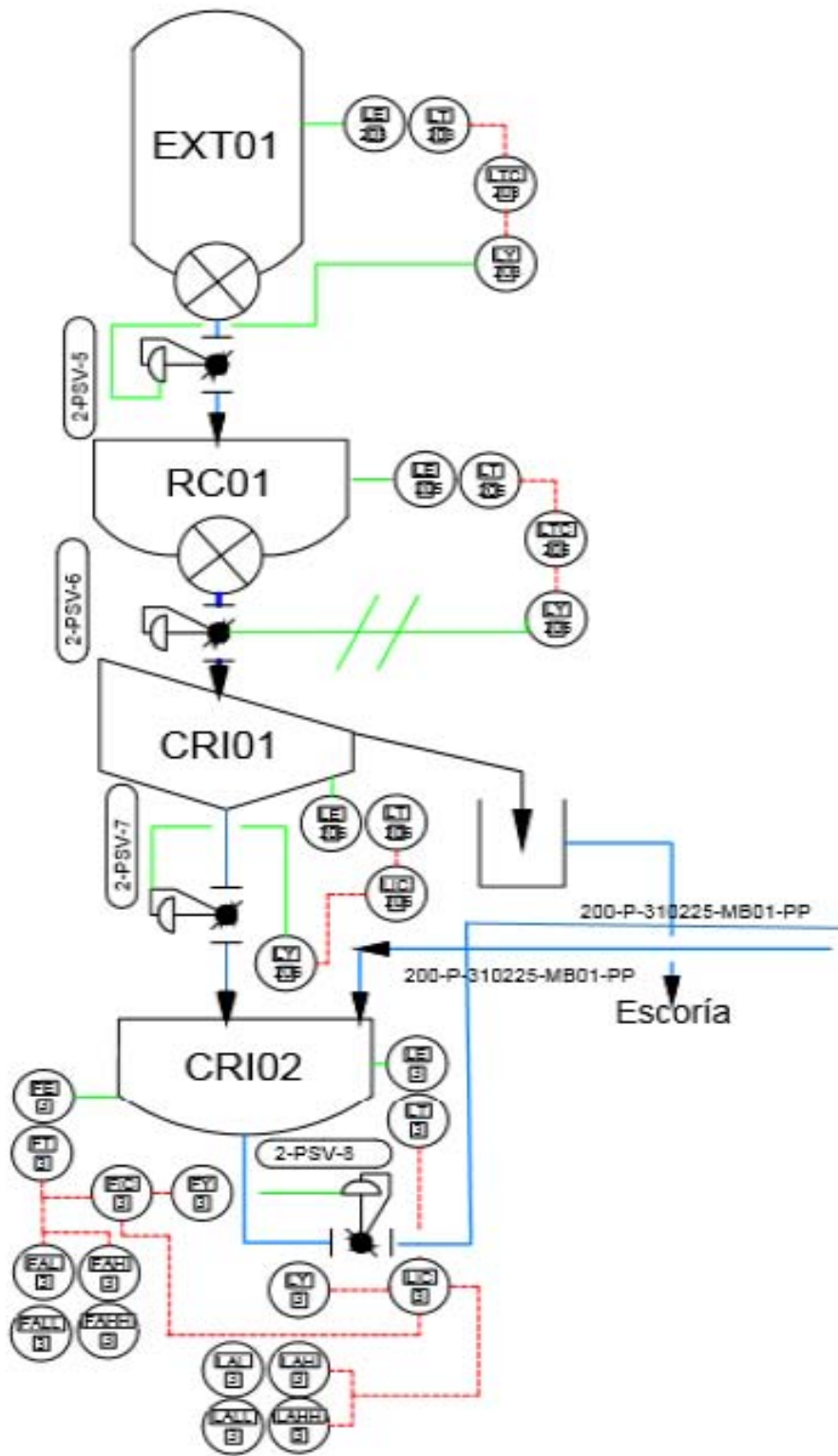
3.14.5 Nodo de las bombas



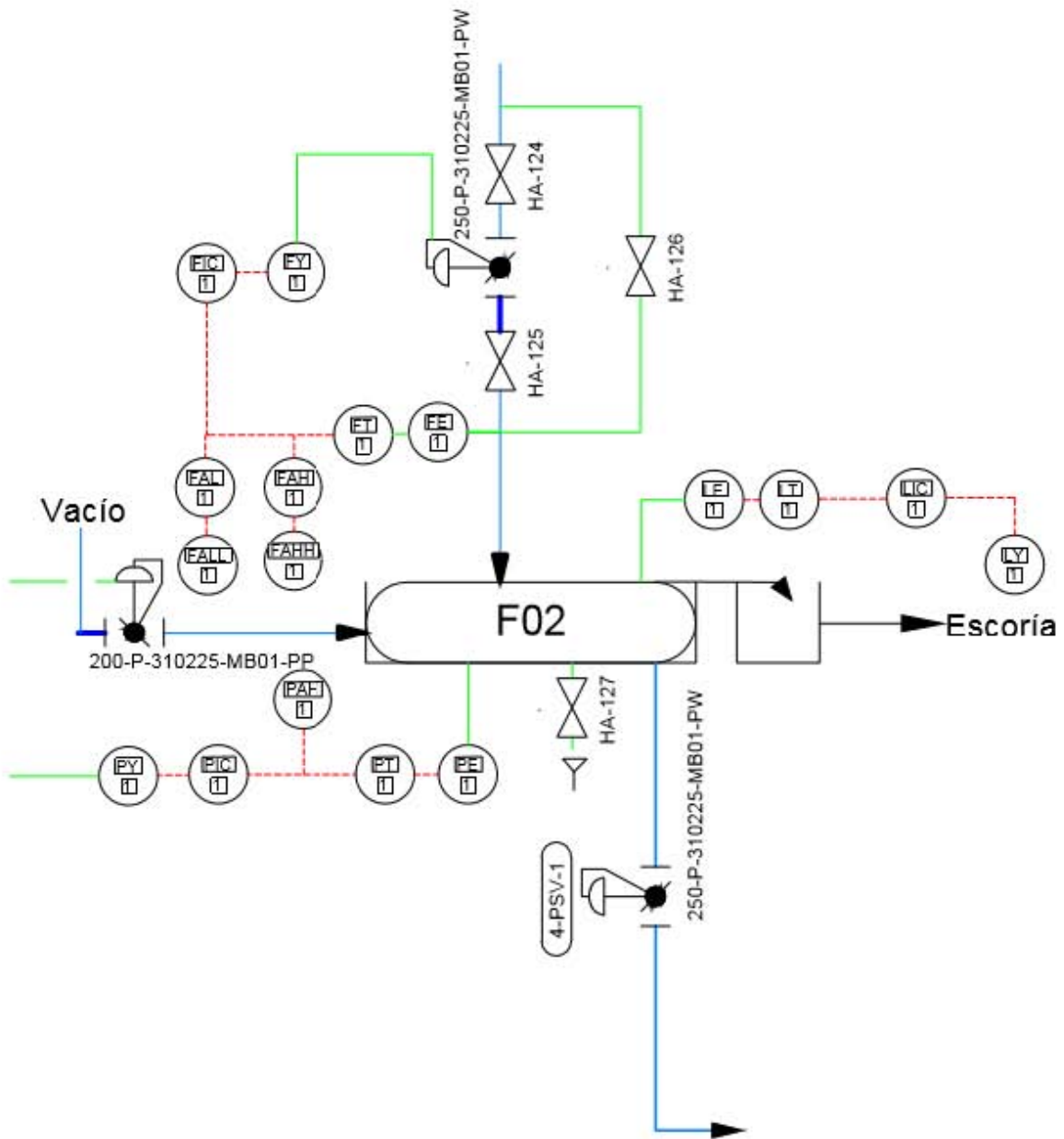
3.14.6 Nodo del clarificador



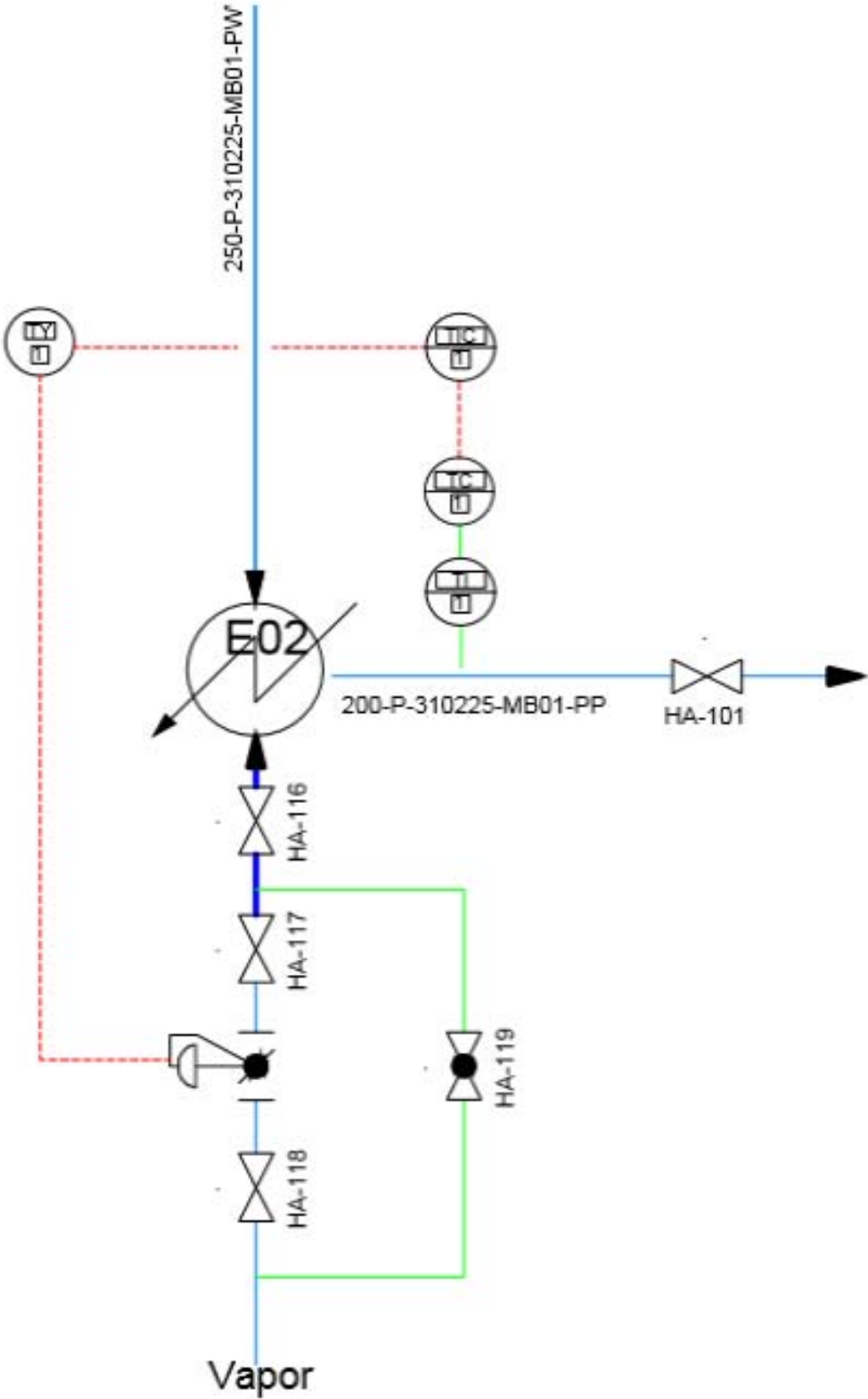
3.14.7 Nodo de las esclusas



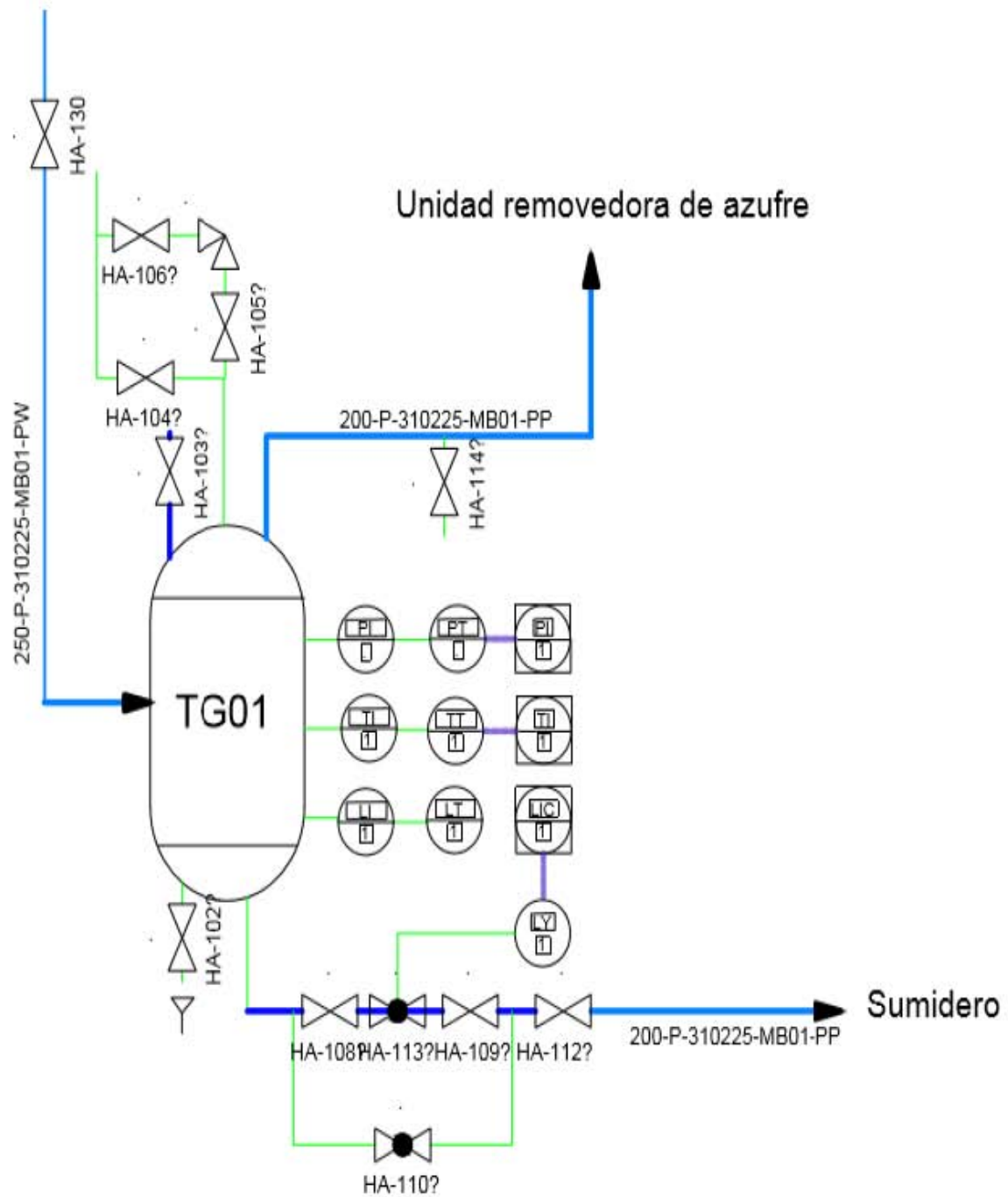
3.14.8 Nodo de los filtros



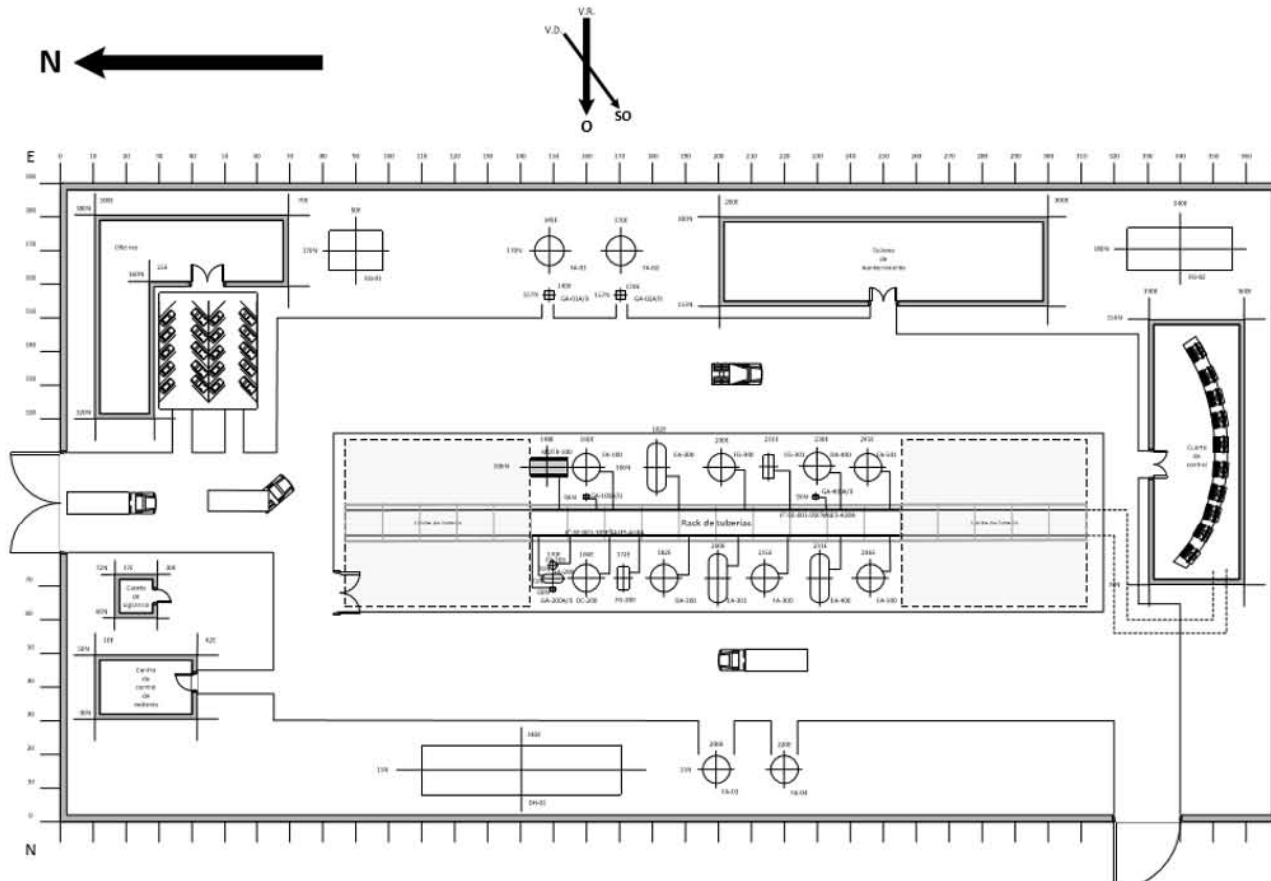
3.14.9 Nodo de los intercambiadores de calor



3.14.10 Nodo de los tanques



3.15 Propuesta de plano de Localización General (PLG)



Equipo	Clave de equipo
Banda transportadora	MOTR-100
Tanque de mezclado	FA-100
Bomba de alimentación al gualificador	GA-200A/B
Gualificador	DC-200
Filtro al vacío	FG-200
Bomba de recirculación	GA-200A/B
Intercambiador de calor	EA-200
Tanque de descarga	FA-200
Scrubber	DA-300
Intercambiador de calor	EA-300
Tanque reductor de presión	FA-300
Intercambiador de calor	EA-300
Clasificador	PG-300
Filtro al vacío	FG-300
Torre Wash	DA-400
Bomba de recirculación	GA-400A/B
Intercambiador de calor	EA-400
Tanque de almacenamiento de alta presión	FA-500
Tanque de almacenamiento de baja presión	FA-501
Tanque de agua de servicio	FA-01
Tanque de agua de proceso	FA-02
Tanque de agua de desecho	FA-03
Tanque de agua excedida	FA-04
Bomba de agua de servicios	GA-01A/B
Bomba de agua de procesos	GA-02A/B
Equipo de tratamiento de agua de lavandería	BG-01
Equipo de tratamiento de agua de sanitarios	BG-02
Equipo de tratamiento de agua de aceites	DH-01

Equipo eléctrico	Código de la línea
Línea de señales en rack, parte superior	8°-S.E.-001-492/SAL15-456A
Línea de señales en rack, parte inferior	8°-S.E.-002-492/SAL15-456A

NOTAS	Nomenclatura
Vientos recurrentes	V.R.
Vientos dominantes	V.D.
Señal eléctrica	S.E.

3.16 Análisis de resultados

De acuerdo al balance de materia con una base de cálculo de 100 toneladas de carbón y 75 Toneladas de agua por día se obtienen 95 toneladas por día de Hidrogeno, lo cual verifica la eficiencia del gasificador y del proceso, por lo cual es de suma importancia la inclusión de un sistema instrumentado producto de un análisis de riesgo para mantener las condiciones de operación adecuadas.

El gasificador es el equipo más importante del proceso de tal forma que si llegase a ocurrir alguna falla o disturbio en él no se podría asegurar una correcta producción, por esta razón el gasificador requiere de un gran número de elementos que tengan función de control, medición y seguridad de proceso. La elección de materia prima es de vital importancia para asegurar una alta conversión de ella en producto deseado (Hidrogeno) y así reducir la producción de desechos o subproductos (ceniza, CO₂) que resultan innecesarios.

Mediante la aplicación de metodologías de análisis de riesgo se encontraron los eventos iniciadores de disturbio para cada equipo, como resultado de ello se encontró que la metodología HazOp es la más adecuada para la elección de los instrumentos requeridos para hacer segura cualquier operación así como efectuar las recomendaciones pertinentes. Sin embargo un análisis cuantitativo como un Árbol de Eventos con datos estadísticos correspondientes a cada disturbio posible superaría los datos obtenidos por ambas metodologías.

Los principales disturbios considerados y controlados son:

Aumento y disminución de presión así como de temperatura, lo cual puede ocasionar una reacción incompleta, baja o nula producción de syngas y con ello de Hidrogeno, producción excesiva de cenizas provocando obstrucción en conductos o fallas en filtros.

En el Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI) se representan todos los instrumentos de medición y control necesarios en el proceso, además se anexan todos los instrumentos resultantes de la aplicación de metodologías de análisis de riesgo (¿Qué pasa si?, HazOp), requeridos para concebir un proceso seguro.

CONCLUSIONES

Aunque el carbón sea sucio y altamente contaminante, sigue siendo barato. Por esta simple razón continúa fungiendo como la principal fuente de energía del mundo, proporcionando un cuarto de la energía primaria y más del 40% de la electricidad, se pronostica que continúe haciéndolo durante muchos años. El reto, entonces, es cómo generar energía con carbón de una forma más ecológica.

En momentos en que los intentos por desarrollar un sistema de captura y almacenamiento de carbono están estancados, una serie de países ensaya distintas maneras de explotar sus abundantes reservas de carbón. No todos tienen como motivación razones ambientales. También hay razones económicas y el deseo de alcanzar la independencia energética.

La principal tecnología que se está usando es llamada gasificación del carbón. Es decir, en lugar de quemar el combustible fósil, éste se transforma químicamente en un gas natural sintético o gas de síntesis. El proceso existe desde hace décadas, pero el alza en los precios del gas hace que ahora sea más viable económicamente.

Las metodologías aplicadas como una herramienta indispensable para la instrumentación adecuada en cada equipo, siempre teniendo como objetivo principal la seguridad de proceso y personal.

Es de vital importancia conocer perfectamente el proceso ya que es el punto de partida para delimitar tanto los eventos iniciadores de un posible disturbio y las consecuencias derivadas de él, de tal manera que se pueda aplicar una metodología para emitir una concreta y confiable respuesta operativa o recomendación adicional.

Para poder emitir una recomendación o mejora para la seguridad en cada equipo o nodo, es necesario tomar en cuenta todas las posibles desviaciones que puedan afectar al proceso y con base en ello generar la solución más adecuada.

Realizar un análisis de riesgo es de vital importancia para corroborar que todas las operaciones en un proceso estén en óptimo funcionamiento y sean seguras, o en su defecto tener una medida aplicable para contrarrestar cualquier disturbio.

Para realizar un proyecto de análisis de riesgo que involucre datos estadísticos es conveniente elaborar un plan de trabajo que considere un periodo de tiempo razonable para la recopilación de información debido a no ser de fácil acceso. Asimismo, es necesario contar con la instalación de la planta, para realizar observaciones directas del proceso y realizar entrevistas al personal que labora en las instalaciones. Por lo tanto, la aplicación de un método estadístico se encuentra limitado a contar con los datos necesarios.

De la misma forma, se puede concluir que desde un punto de vista teórico y con las limitantes presentes en el desarrollo de los análisis de riesgos, los objetivos propuestos se cumplen, debido a que se logra la correcta instrumentación, control y seguridad de la etapa de gasificación en la generación de hidrógeno a partir de carbón mineral, con base en los resultados obtenidos a partir de la generación de los dos análisis de riesgos. Sin duda alguna, para que los resultados de la aplicación de las metodologías de análisis de riesgos sean completamente satisfactorios, cubriendo todos los ámbitos de protección, control e instrumentación, es necesaria la participación de un grupo multidisciplinario, compuesto por distintos expertos en cada área involucrada dentro de la planta. Sin embargo, es necesario recalcar que exclusivamente contemplando el área de procesos, los métodos contemplados y aplicados son los adecuados.

ANEXOS

Definiciones.

Accidente. Es aquel incidente que ocasiona afectaciones a los trabajadores, a la comunidad, al ambiente, al equipo y/o instalaciones, al proceso, transporte y distribución del producto y que debe ser reportado e investigado para establecer las medidas preventivas y/o correctivas, que deben ser adoptadas para evitar su recurrencia.

Administración de cambios de proceso. Es la aplicación sistemática de políticas, prácticas y procedimientos de la organización en las tareas de identificación, evaluación, autorización e instalación de cualquier tipo de cambio o alteración, permanente o temporal, a la tecnología e instalaciones que modifique el riesgo o altere la seguridad y confiabilidad de las instalaciones o sistemas.

Análisis de consecuencias. Estudio y predicción cualitativa de los efectos que pueden causar eventos o accidentes que involucran fugas de tóxicos, incendios o explosiones entre otros, sobre la población, el ambiente y las instalaciones.

Análisis de riesgos de procesos. Conjunto de metodologías que consisten en la identificación, análisis y evaluación sistemática de la probabilidad de ocurrencia de daños asociados a los factores externos (fenómenos naturales y sociales), fallas en los sistemas de control, los sistemas mecánicos, factores humanos y fallas en los sistemas de administración; con la finalidad de controlar y/o minimizar las consecuencias al personal, la población, el ambiente, a la producción y/o a las instalaciones.

Árbol de eventos. Es un diagrama lógico-gráfico en el cual se describen posibles estados finales, resultado de las diferentes trayectorias que puede seguir un evento no deseado.

Árbol de fallas. Es un diagrama lógico-gráfico en el que se muestran todas las combinaciones creíbles de fallas o eventos que causarán una falla específica de interés, llamado evento tope. Es una técnica o proceso de razonamiento deductivo que utiliza símbolos lógicos Booleanos (compuertas “o” (OR) y compuertas “y” (AND)) para descomponer las causas de un evento tope en fallas básicas de equipos, errores humanos y/o circunstancias asociadas llamados eventos básicos.

Automatización. Es el acto o método de hacer que un proceso funcione sin la necesidad de la intervención de un operador.

Banda Muerta. Rango a través del cual puede variar la señal de entrada, hacia un dispositivo, sin que éste inicie una respuesta. Generalmente se expresa como un porcentaje del rango de operación.

Binario. Término aplicado a una señal que sólo tiene dos estados o posiciones discretas (on-off, alto-bajo, etcétera).

Caso más probable. Con base en la experiencia operativa, es el evento de liberación accidental de un material o sustancia peligrosa, que tiene la mayor probabilidad de ocurrir.

Caso alterno. Es el evento creíble de una liberación accidental de un material o sustancia peligrosa que es simulado, pero que no corresponde al peor caso ni al caso más probable.

Combustión. Reacción química de oxidación de un material combustible con desprendimiento de llamas, calor y gases.

Compuerta. Símbolo lógico booleano que se utiliza en los Árboles de Fallas, para unir la salida de un evento con sus correspondientes entradas (compuertas OR, AND, NOT, etc.).

Conjunto Mínimo de Corte. Combinación mínima de eventos básicos que provocan la ocurrencia del evento tope. Se pueden considerar como los modos de ocurrencia del evento tope.

Consecuencias. Efectos que pueden causar eventos o accidentes que involucran fugas y derrames de sustancias tóxicas, inflamables y/o explosivas.

Controlador. Dispositivo con una salida que varía para regular una variable de control de una manera específica. Un controlador manual varía su salida automáticamente en respuesta a una entrada directa o indirecta de un proceso variable. Un controlador manual es una estación manual de carga y su salida no depende de una medida de un proceso variable pero puede variarse solamente por medio de un procedimiento manual.

Controlador lógico programable. Un controlador, usualmente con entradas y salidas múltiples que contiene un programa alterable, es llamado de esta manera o comúnmente conocido como PLC.

Convertidor. Es un dispositivo que recibe información en determinada manera de un instrumento y transmite una señal de salida en otra forma. Un convertidor es también conocido como transductor, de cualquier forma, transductor es un término general, y su uso para conversión de señales no es recomendado.

Derrame. Cualquier descarga, evacuación, rebose, achique, o vaciamiento de hidrocarburos u otras sustancias peligrosas en estado líquido cuya presencia altere las condiciones naturales de un sitio y pongan en peligro uno o varios ecosistemas; puede presentarse en tierra, aguas superficiales o en el mar y se originan dentro o fuera de las instalaciones petroleras, durante las actividades de explotación, transformación, comercialización o transporte de hidrocarburos y sus derivados.

Desviación. Condición que se aparta de la intención del diseño del sistema o proceso.

Digital. Término aplicado a una señal o dispositivo que usa dígitos binarios para representar valores continuos o estados discretos.

Elemento final de control. Dispositivo que controla directamente los valores de la variable manipulada en un lazo de control. Generalmente el elemento final de control es una válvula de control.

Elemento primario. Sinónimo de sensor.

Escenario de riesgo. Determinación de un evento hipotético, en el cual se considera la ocurrencia de un accidente bajo condiciones específicas, definiendo mediante la aplicación de modelos matemáticos y criterios acordes a las características de los procesos y/o materiales, las zonas que potencialmente puedan resultar afectadas.

Estabilidad atmosférica. Describe el nivel de turbulencia en la atmósfera. Depende de la velocidad de viento, hora del día o de la noche y otras variables como la cantidad de radiación solar y nubosidad.

Estación de control. Una estación de carga manual que también proporciona un control en el cambio de manual a automático de los modos de control dentro de un lazo de control, a ésta también se le conoce como estación auto-manual.

Estación manual de carga. Dispositivo o función que tiene un ajuste de salida manual que es usado con un actuador o como más dispositivos. La estación no proporciona un cambio entre un modo de control automático o manual de un lazo de control. La estación puede tener indicadores integrados, luces u otras características. Esto es normalmente conocido como estación manual o cargador manual.

Evento. Suceso relacionado a las acciones del ser humano, al desempeño del equipo o con sucesos externos al sistema, que pueden causar interrupciones y/o problemas en el sistema. En este documento, evento es causa o contribuyente de un incidente o accidente o, es también una respuesta a la ocurrencia de un evento iniciador.

Evento Básico. Describe una condición normal o de falla en el árbol (falla de equipo, errores humanos, etc.). Definen el nivel de resolución del árbol de fallas.

Evento iniciador. Evento específico indeseado que constituye la base fundamental del Análisis de Árboles de Eventos. Está relacionado generalmente con un accidente o desviación del sistema a analizar.

Evento Intermedio. Falla que describe la señal de salida de una compuerta lógica.

Evento no Desarrollado. Falla específica en la cual no se han desarrollado las causas de ocurrencia de este evento por falta de información, o bien, por considerarse poco relevante.

Evento no deseado. Evento que implica la pérdida de un valor: salud, vida, producción, ambiente, capital, etc.

Evento Tope. Evento específico no deseado.

Explosión. Liberación súbita y violenta de energía que causa un cambio transitorio en la densidad, presión y velocidad del aire circundante a la fuente de energía. Esta liberación de energía puede generar una onda de presión con el potencial de causar daño en su entorno.

Fuga. Liberación repentina o escape accidental por pérdida de contención, de una sustancia en estado líquido o gaseoso.

Fuego. Consecuencia visible de la combustión.

Función. Propósito que debe cumplir un dispositivo de control.

Identificación. Secuencia de letras o dígitos, o ambos, usados para señalar un instrumento en particular o un lazo.

Incendio. Combustión no controlada.

Inflamabilidad. Mayor o menor facilidad con la que una sustancia puede arder en aire o en algún otro comburente.

Intención de diseño. Ver propósito de diseño.

Instrumentación. Colección de instrumentos o sus aplicaciones con el fin de observar mediciones, control, o cualquier combinación de estos.

Lazo. Combinación de uno o más instrumentos o funciones de control que señalan el paso de uno a otro con el propósito de medir y/o controlar las variables de un proceso.

Límite inferior de inflamabilidad; explosividad inferior (LIE). Es la concentración mínima de cualquier vapor o gas (% por volumen de aire), que se inflama o explota si hay una fuente de ignición presente a la temperatura ambiente.

Límite superior de inflamabilidad; explosividad superior (LSE). Es la concentración máxima de cualquier vapor o gas (% por volumen de aire), que se inflama o explota si hay una fuente de ignición presente a la temperatura ambiente.

Local. Es la localización de un instrumento que no está ni dentro ni sobre un panel o consola, ni está montado en un cuarto de control. Los instrumentos locales están comúnmente en el ámbito de un elemento primario o un elemento de control, la palabra “campo” es un sinónimo muy usado con local.

Luz del monitor. Sinónimo de luz piloto.

Luz piloto. Es una luz que indica cual número o condiciones normales de un sistema o dispositivo existe. Una luz piloto es también conocida como una luz monitor o de monitor.

Medida. Determinación de la existencia o magnitud de una variable.

Monitor. Término general para un instrumento o sistema de instrumentos usados para la medición o conocer la magnitud de una o más variables con el propósito de emplear la información en determinado momento. El término monitor no es muy específico, algunas veces significa analizador, indicador, o alarma.

Montado en panel. Término aplicado a un instrumento que está montado sobre un panel o consola y es accesible para un operador en uso normal.

Nodo. Sección del proceso o instalación sujeta a estudio que se aísla del resto para propósitos analíticos.

Nube tóxica o inflamable. Porción de la atmósfera con una concentración de material tóxico o inflamable que tiene el potencial de causar daño o entrar en combustión; su formación se debe a la liberación de una sustancia peligrosa.

Palabra Guía. Palabra o frase que combinada con una variable o parámetro, expresa y define una desviación a partir de la intención de diseño.

Panel. Estructura que tiene un grupo de instrumentos montados sobre ella. El panel puede consistir de una o varias secciones, cubículos, consolas o escritorios.

Panel local. Que no está en un panel central, los paneles locales están comúnmente en el ámbito de subsistemas de plantas o subáreas. El término instrumento local de panel no puede ser confundido con instrumento local.

Peligro. Es toda condición física o química que tiene el potencial de causar daño al personal, a las instalaciones o al ambiente.

Peor Caso. Corresponde a la liberación accidental del mayor inventario del material o sustancia peligrosa contenida en un recipiente, línea de proceso o ducto, la cual resulta en la mayor distancia hasta alcanzar los límites por toxicidad, sobre-presión o radiación térmica, de acuerdo a los criterios para definir las zonas intermedia de salvaguarda al entorno de la instalación. Para identificar los peores casos, no se requiere de un análisis de riesgos formal, ni conocer las causas que pudieran provocarlo ni su probabilidad de ocurrencia, simplemente consideramos que éste sucede.

Proceso. Es cualquier operación o secuencia de operaciones que involucren un cambio de energía, estado, composición, dimensión, u otras propiedades que pueden referirse a un dato. Serie continua y repetible de actividades relacionadas

que a través del uso de recursos convierte una o más entradas (insumos) en una o más salidas (productos), creando valor para el cliente.

Programa. Secuencia respetable de acciones que definen el nivel de las salidas como una compostura de las relaciones al establecimiento de las entradas.

Propósito de diseño. Rango de valores deseados o especificados por el diseñador sobre el comportamiento de una porción del sistema (incluye tanto las condiciones como las características de los elementos constituyentes de un sistema).

Relay. Dispositivo cuya función es pasar información sin alterarla o solo modificarla en determinada forma. Relay es comúnmente usado para referirse a dispositivos de cómputo.

Riesgo. Peligros a los que se expone el personal. Combinación de la probabilidad de que ocurra un accidente y sus consecuencias.

Sensor. Parte de un lazo o un instrumento que primero detecta el valor de una variable de proceso y que asume una correspondencia, predeterminación, y estado inteligible o salida. El sensor puede ser integrado o separado de un elemento funcional o de un lazo. Al sensor también se le conoce como detector o elemento primario.

Setpoint. El setpoint o punto de referencia puede ser establecido manualmente, automáticamente o programado. Su valor se expresa en las mismas unidades que la variable controlada.

Simulación. Representación de un evento o fenómeno por medio de sistemas de cómputo, modelos físicos o matemáticos u otros medios, para facilitar su análisis.

Sistemas de control distribuidos. Sistema el cual, mientras es funcionalmente integrado, consiste de subsistemas los cuales pueden ser físicamente separados y colocarse de una forma remota unos de otros.

Sustancia peligrosa. Es cualquier sustancia que cuando es emitida, puesta en ignición o cuando su energía es liberada (fuego, explosión, fuga tóxica) puede causar lesión, daños a las instalaciones debido a sus características de toxicidad, inflamabilidad, explosividad, corrosión, inestabilidad térmica, calor latente o compresión.

Switch. Dispositivo que conecta, desconecta, selecciona, o transfiere uno o más circuitos y no está diseñado como un controlador, un relay o una válvula de control.

Transductor. Término general para un dispositivo que recibe información en forma de uno o más cuantificadores físicos, modificadores de información y/o su forma si requiere, y produce una señal de salida resultante. Dependiendo de la aplicación un transductor puede ser un elemento primario, un transmisor un relay, un convertidor u otro dispositivo. Porque el término transductor no es específico, su uso para aplicaciones específicas no es recomendado.

Transmisor. Dispositivo que detecta la variable de un proceso a través de un sensor y tiene una salida la cual varía su valor solamente como una función predeterminada de la variable del proceso. El sensor puede estar o no integrado al transmisor.

Toxicidad. Propiedad de las sustancias para producir un efecto indeseado cuando un compuesto químico ha alcanzado una cierta concentración que afecta al cuerpo humano.

Válvula de control. Es un dispositivo, el más comúnmente usado, que actúa manualmente o por sí mismo, que directamente manipula el flujo de uno o más procesos.

Zona de amortiguamiento. Área donde pueden permitirse determinadas actividades productivas que sean compatibles, con la finalidad de salvaguardar a la población y al ambiente restringiendo el incremento de la población asentada.

Zona de riesgo. Área de restricción total en la que no se debe permitir ningún tipo de actividad, incluyendo asentamientos humanos, agricultura con excepción de actividades de forestación, cercamiento y señalamiento de la misma, así como el mantenimiento y vigilancia.

Zona intermedia de salvaguarda. Área determinada del resultado de la aplicación de criterios y modelos de simulación de riesgo que comprende las áreas en las cuales se presentarían límites superiores a los permisibles para la salud del hombre y afectaciones a sus bienes y al ambiente en caso de fugas accidentales de sustancias tóxicas y de la presencia de ondas de sobrepresión en caso de formación de nubes explosivas. Esta se conforma por la zona de alto riesgo y la zona de amortiguamiento.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía consultada:

- AgroWaste. (2004). *Gasificación*. España: AgroWaste.
- American National Standard. (1991). *ANSI/ISA-S5.4-1991. Instrument Loop Diagrams*. USA: American National Standard.
- American National Standard. (2009). *ANSI/ISA-5.1-2009. Instrumentation Symbols and Identification*. USA: American National Standard.
- API. (1993). *Process Measurement Instrumentation*. Washington D.C., USA: API.
- Ayyub, B. (2003). *Risk analysis in engineering and economics*. USA: Chapman & Hall/CRC.
- Botas, J., Calles, J., Et. Al. (2005). *La economía del hidrógeno – una visión global sobre la revolución energética del siglo XXI*. España: Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología (ESCET).
- Cantú Suárez, M. Ibarra Palafox, C. et. al. (2016). *Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, 2015*. México: Servicio Geológico Mexicano.
- Casal, J., Montiel, E., Et. Al. (1999). *Análisis del riesgo en instalaciones industriales*. Barcelona: Edicions UPC.
- Coordinación General de Minería. (2014). *Perfil de mercado del carbón*. México. Secretaría de Economía.
- Corona-Esquivel, R., Trilla, J, Et. Al. (2006). *Geología, estructura y composición de los principales yacimientos de carbón mineral en México*. Boletín de la sociedad geológica mexicana, 58, 140-160.
- Creus Solé, A. (2010). *Instrumentación Industrial*. Barcelona, España: Alfa Omega.
- Elard, F. León, D. (2006). *La importancia del carbón mineral en el desarrollo*. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG, 9.
- Environmental Protection Agency. (1995). *SITE Technology Capsule Texaco gasification process*. Cincinnati, USA: U.S. Environmental Protection Agency.

- Gadonneix, P. Barnés de Castro, F. et. al. (2010). *2010 Survey of Energy Resources*. Reino Unido: World Energy Council.
- Industrial Management. (2002). *OREDA Offshore Reliability Data*. USA: SINTEF
- Lipták, B. (1995). *Process Measurement and Analysis*. USA: CRS Press.
- Luhman, N. (1992). *Sociología del riesgo*. México: Walter de Gruyter y Co.
- Martínez, J. (2007). *Introducción al análisis de riesgos*. México: Limusa.
- Navarro, M. (2004). *Verificación del nivel de integridad de seguridad (SIL) de un sistema instrumentado de seguridad*. México: Universidad Simón Bolívar.
- National Risk Management Research Laboratory. (1995). *Texaco gasification process innovative technology evaluation report*. Cincinnati, USA: U.S. Environmental Protection Agency.
- Nolan, D. (2008). *Safety and security review for the process industries*. USA: William Andrew.
- Pemex. (2010). *NRF-045-PEMEX-2010. Seguridad Funcional - Sistemas instrumentados de seguridad para los procesos del sector industrial*. México: Pemex.
- Ragasol Barbey, Víctor. (2012). *Guía técnica para realizar Análisis de riesgos de procesos*. México: PEMEX.
- Sunggyu, L. (2007). *Gasification of coal*. UK: Taylor & Francis Group.
- United States Environment Protection Agency. (1992). *Texaco Gasification Process*. Cincinnati, OH: EPA 540/R-94/514a
- Venegas Riera, K., & Barreto Jijón, R. (2013). *La seguridad funcional en la industria de procesos (Maestría)*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Wolf, Franz, Vogel, Enrique. (enero-junio 1986). *Características del carbón vegetal en algunas especies madereras del noreste de México*. Revista de Ciencia Forestal, 11.