



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**SISTEMA DE CONTROL DE LA UNIDAD
TRATADORA DE GASES DE ÓXIDO DE ETILENO
PARA UNA PLANTA ETOXILADORA**

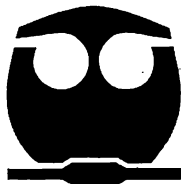
INFORME DE PRÁCTICA PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA



CÉSAR AUGUSTO MACHUCA MEJÍA



MÉXICO, D. F. NOVIEMBRE 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: PROFESOR: CELESTINO MONTIEL MALDONADO

VOCAL: PROFESOR: MODESTO JAVIER CRUZ GÓMEZ

SECRETARIO: PROFESOR: MARTÍN RIVERA TOLEDO

1ER. SUPLENTE: PROFESOR: JOSÉ MANUEL GARCÍA ANAYA

2DO. SUPLENTE: PROFESOR: JOSÉ ARTURO MORENO XOCHICALE

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: OXITENO MÉXICO S. A.
DE C. V. INTERIOR DEL RECINTO PORTUARIO. COATZACOALCOS, VE-
RACRUZ**

ASESOR DEL TEMA: DR. MARTÍN RIVERA TOLEDO



**SUPERVISOR TÉCNICO: ING. QUIM. ADM. RAÚL OMAR CHÁVEZ VAL-
DESPINO**



SUSTENTANTE: CÉSAR AUGUSTO MACHUCA MEJÍA

*Si se extiende la luz
toma la forma
de lo que está inventando la mirada.*

José Emilio Pacheco

*Ustedes firmaron un contrato para el cálculo de la estructura
con alguien que aspira a ser algo más que ingeniero,
que aspira a ser hombre.*

Ing. Heberto Castillo,
al responsabilizarse (cuando nadie más lo hizo) de una estructura dañana.

*La razón nos extraviará
si no va guiada por la práctica,
mientras que la práctica resultaría notablemente mejorada
con el añadido de la razón.*

Paul Feyerabend

Agradecimientos

A mi madre Rafaela por ser el mejor ejemplo de lo que significa ser humano.

A mi padre Eugenio por enseñarme el valor del trabajo.

A todos quienes me han acompañado en este camino, también soy la suma de sus experiencias.

T	U	A	L	E	G	R	I	A	V	L	O	I	C	I	R	Ñ	X	D	E
J	R	T	J	O	Ñ	A	Z	U	C	Y	H	M	Q	N	H	L	B	F	I
T	O	R	L	M	I	R	I	M	R	C	K	M	A	A	X	C	W	E	L
P	S	S	L	A	B	E	L	O	A	E	F	A	B	I	A	N	A	R	E
P	A	D	E	R	O	C	A	N	G	E	L	D	A	M	V	Y	U	U	K
G	N	T	O	L	Y	S	T	S	U	M	E	U	G	E	N	I	O	U	H
C	D	R	Y	A	K	I	R	E	L	I	U	T	H	D	H	E	I	R	A
I	Y	Q	B	A	L	D	O	S	W	S	L	N	O	R	A	Ñ	H	U	I
V	A	N	E	K	S	I	R	C	H	A	R	L	Y	O	H	G	C	E	C

Índice general

1. Introducción	3
1.1. Óxido de Etileno	4
1.2. Propiedades Físicoquímicas del OE	4
1.3. Inflamabilidad	6
1.4. Reactividad	7
1.5. Descomposición	8
1.6. Polimerización	9
1.7. Usos	9
2. Reacción	11
2.1. Monoetilenglicol	11
2.2. Reacciones Posibles dentro del Sistema	13
2.3. Absorción del OE	15
2.4. Hidrólisis del OE	16
3. Descripción del Proceso	18

3.1. Corriente 1: PSV's y Purgas	20
3.2. Corriente 2: Desfogue de Control de Presión	21
3.3. Corriente 3: No Condensables del Pre-scrubber	22
3.4. Descripción Detallada del Proceso	25
4. Procedimiento de Arranque de la Unidad	30
5. Filosofía de Control	33
5.1. Control de Reposición de Agua Suavizada	35
5.2. Control de Nivel del C-100	36
5.3. Control de pH	37
5.4. Control de Temperatura de Reacción en el R-100	38
6. Seguridad de Proceso	42
6.1. Eventos	44
6.2. Alarmas	44
6.3. Alarmas por Instrumentos Análogos	44
6.4. Instrumentos Discretos	45
6.5. Prioridad	45
6.6. Matriz de Causa-Efecto	59
6.7. <i>Interlocks</i> de Seguridad	60
6.8. Otras Condiciones de Seguridad	62
6.9. Arrestaflamas XE-101	62

6.10. Válvula de Alivio de Presión en la Descarga de la P-101	63
6.11. Tanques de Sello de las P-100 A/B	63
. Resultados	65
. Conclusiones	68
.. Glosario de Términos	78
.. Glosario de Siglas y Acrónimos	80
.. Glosario de Equipos	84
C.1. C-100	84
C.2. I-100	85
C.3. I-101	86
C.4. I-102	88
C.5. P-100A y P-100B	89
C.6. P-103	90
C.7. P-110	91
C.8. R-100	92
C.9. Tanques de sello de las bombas P-100A y P-100B	93
C.10.T-110 y T-120	97

Índice de figuras

1.1. Estructura de la molécula de OE mostrando el ángulo de sus enlaces.	4
1.2. Efecto de la presión sobre las regiones inflamables en una mezcla de OE – Aire – Nitrógeno a 20 °C. [9]	8
1.3. Distribución típica del uso del OE en el mercado mundial.	10
2.1. Reacción entre una molécula de agua con otra de OE para producir MEG. [21]	15
2.2. Vida media de 3 % m/m de OE en agua como función de pH y 8 y 20 °C. [26]	17
3.1. Diagrama de bloques del proceso general del lavador de gases. La línea punteada delimita los procesos y equipos tratados en este documento. . . .	19
3.2. Gráfica de región Explosivas y No Explosivas para el OE en Función de la Presión y Temperatura del Sistema.	23
3.3. Diagrama de Flujo de Proceso de la unidad lavadora de gases de OE.	24
5.1. Esquema de control en un sistema instrumentado. Caso temperatura del R-100.	34
5.2. Esquema del control de reposición de agua suavizada al lavador de gases.	36

5.3. Gráfica del comportamiento del sistema de control para la reposición de agua suavizada.	37
5.4. a) Cambio en una condición del proceso que afecta a nuestra variable. b) Reacción de la acción derivativa. c) Reacción de la acción Proporcional. d) Reacción de la acción integral. e) Suma de las acciones anteriores, control PID. f) Variación del <i>setpoint</i> de la variable monitoreada.	41
6.1. Arreglo para sello mecánico Plan 53A. Ilustración del fabricante Flowserve®.	64
7.1. Histórico de los valores monitoreados del AIT-101 durante diciembre 2016.	66
7.2. A la derecha: scrubber lavador de gases de OE. A la izquierda: pre-scruber.	67
C.1. Empaque Mellapak™ ubicado dentro de la sección de columna de la C-100, con el objetivo de aumentar el área de contacto entre el agua suavizada y el OE que fluyen en contracorriente.	85

Índice de tablas

1.1. Algunas propiedades del OE [4].	6
2.1. Clasificación del MEG de acuerdo a NFPA 704 y PEMEX Cangrejera.	12
3.1. Valores de control para la entrada de agua suavizada al sistema.	26
6.1. Clasificación de categoría por probabilidad de ocurrencia.	46
6.2. Clasificación de las categorías según sus consecuencias.	47
6.3. Matriz de clasificación del riesgo.	47
6.4. Acción esperada en función del tiempo de respuesta del operador	50
6.5. Listado de alarmas para la unidad lavadora de gases de OE.	58
6.6. Matriz Causa – Efecto para los interlocks de la unidad tratadora de gases.	62
C.1. Principales datos de diseño de la C-100.	85
C.2. Principales datos de diseño del I-100.	86
C.3. Principales datos de diseño del I-101.	87
C.4. Principales datos de diseño del I-102.	89
C.5. Principales datos de diseño de la P-100 A/B.	90

C.6. Principales datos de diseño de la P-103.	91
C.7. Principales datos de diseño de la P-110.	92
C.8. Principales datos de diseño del R-100.	93
C.9. Principales datos de diseño de los tanques de sello de las bombas P-100A y P-100B.	97
C.10.Principales datos de diseño de los tanques T-110 y T-120.	98

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo describir el funcionamiento de una unidad tratadora de gases para la Planta Etoxiladora de Oxiteno México ubicada dentro del recinto portuario de Coatzacoalcos, Veracruz.

Como se verá, el óxido de etileno es una sustancia sumamente reactiva y peligrosa; su manejo, almacenamiento, disposición y tratamiento requiere de monitoreo continuo y en caso de ser liberado al medio ambiente es necesario sea tratado para producir alguna sustancia menos agresiva, que para esta planta en específico se tratará de monoetilenglicol, sustancia que entre otros fines es ampliamente usada como anticongelante.

Durante dos años y medio de trabajo profesional en la planta de Coatzacoalcos, tuve la oportunidad de conocer y aportar soluciones desde la etapa de revisión de la ingeniería básica. De tal forma que tomé parte activa en la selección y montaje de equipos, definición de rutas para tuberías, apoyo desde la parte de Ingeniería de Proceso (mi especialidad, por cierto) hasta apoyo a los programadores del sistema de control distribuido y de paro por emergencia, pruebas de *interlocks* y en general todo lo relacionado a las etapas de pre-comisionamiento, comisionamiento y *start-up* de la planta tratadora de gases.

Lo descrito en el párrafo anterior es lo que trato de plasmar, de manera general y enfocándome a condiciones operativas, de control y seguridad, en el presente informe de práctica profesional, esperando que esto contribuya a que cada vez más empresas en el país se sumen al tratamiento de sus propios efluentes.

1 Introducción

Uno de los principales retos en la industria moderna es la reducción de los efluentes contaminantes generados en las diferentes etapas de un proceso productivo. Para el año 2000, sólo para la República Mexicana, se estimaba una generación anual de residuos industriales peligrosos de alrededor de 8 millones de toneladas [1]. Es importante señalar que dentro de este total se encuentran los más variados materiales y sustancias que van desde guantes con residuos de aceite o subproductos de una reacción hasta materiales de hospital. La norma mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005 establece cuáles son las características que deben tener una sustancia o material para ser clasificado como residuo peligroso. Con base en esta norma, el óxido de etileno (OE) se clasifica como reactivo, explosivo, tóxico ambiental e inflamable, además de estar dentro del Listado 4 – Tóxicos crónicos [2]. Esto hace que sea de suma importancia su tratamiento para los casos donde pueda ser expulsado al ambiente.

Dentro de mi estancia en la empresa Oxiteno México Planta Coatzacoalcos, se implementó un sistema lavador de gases para tratar los venteos de OE y transformarlos en monoetilenglicol (MEG), que es una sustancia menos peligrosa.

1.1. Óxido de Etileno

El óxido de etileno (OE), también referido como oxirano o epoxietano, es el éter cíclico más simple. Es un gas incoloro a presión atmosférica con olor dulce. La estructura del OE es mostrado en la Fig. 1.1. El enlace C-C es relativamente corto y los ángulos formados con el oxígeno bastante cerrados, esto provoca que el anillo C-O-C formado se encuentre altamente tensado y se pueda abrir fácilmente. Esta es la causa de la alta reactividad del OE [3].

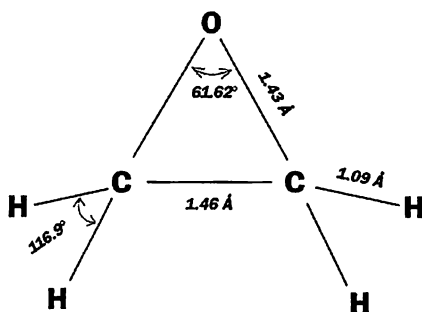


Figura 1.1: Estructura de la molécula de OE mostrando el ángulo de sus enlaces.

1.2. Propiedades Físicoquímicas del OE

Propiedades Físicoquímicas	Valores
Punto de ebullición a presión atmosférica	10.5 °C

Propiedades Fisicoquímicas	Valores
Punto de fusión	-111.3 °C
Punto de inflamación (vaso cerrado)	< -18 °C
Densidad (líquido) a 0 °C	890 kg/m ³
Densidad de vapor (aire = 1)	1.52
Calor de evaporación	578 kJ/kg a presión atmosférica y 10.5 °C
Calor específico - Líquido	1.97 kJ/kg·°C a 11 °C
	2.00 kJ/kg·°C a 20 °C
Calor específico - Gas	1.06 kJ/kg·°C a 25 °C
Calor de polimerización	2,093 kJ/kg·mol
Calor de descomposición de gas	83,700 kJ/kg·mol
Calor de combustión	27,649 kJ/kg·mol
Conductividad eléctrica del líquido puro	4x10 ⁻⁶ S/m
Energía mínima de ignición a 1 bar y 25 °C en aire	0.06 mJ
Punto de fusión del hidrato	11 °C (Máximo a 30 % de OE)
Temperatura de autoignición	429 °C
Temperatura de autodescomposición	560 °C

Propiedades Fisicoquímicas	Valores
Límites de explosividad (%LEL - %UEL)	2.6 % - 100 %
Olor de OE puro	No se percibe hasta que la concentración alcanza 500 - 700 ppm. aprox. Puede producirse adaptación.

Tabla 1.1: Algunas propiedades del OE [4].

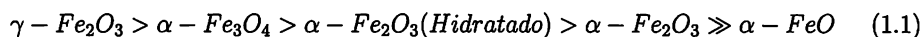
1.3. Inflamabilidad

El OE es inflamable en el aire en cualquier concentración superior a 2.6 % en volumen y no existe un límite superior de inflamabilidad porque la combustión es reemplazada por la descomposición exotérmica en las concentraciones más altas, hasta 100 % en volumen de vapor de OE [5].

Las mezclas de OE/aire tienen una energía de ignición muy baja, siendo 0.06 mJ el valor más bajo, muy similar al 0.02 mJ que se necesitaría para una mezcla hidrógeno/aire. Para darnos un ejemplo de esta pequeña cantidad de energía, una persona descalza caminando sobre una alfombra puede generar, a niveles adecuadamente bajos de humedad, una carga de 15 kV lo que provocaría una chispa con una energía de casi 17 mJ [6], valor muy por encima del 0.06 mJ necesarios para la ignición del OE.

De la Tabla 1.1 vemos que la temperatura de autoignición del OE en el aire es de

429 °C a presión atmosférica. Sin embargo, la presencia de contaminantes como óxido de hierro (III) puede reducir significativamente esa temperatura. Varios experimentos se encuentran reportados en la literatura [7], donde se comenta que superficies suficientemente grandes con presencia de óxido férrico Fe_2O_3 pueden causar la ignición de vapores de OE/Aire en una proporción de 60:40 a 140 °C. Incluso algunos investigadores [8] han estudiado el orden de reactividad de la herrumbre con el OE encontrando una mayor sensibilidad al γ - Fe_2O_3 y siguiendo el orden mencionado en la Ec. (1.1):



La Fig. 1.2 ilustra las regiones inflamables en una mezcla de OE – Aire – Nitrógeno en función de su concentración en porcentaje de volumen y a dos presiones diferentes de la mezcla gaseosa y a 20 °C.

1.4. Reactividad

El OE reacciona con grupos nucleófilos [10], siendo especialmente reactivo en presencia de agua, alcoholes, amoníaco, aminas, ácidos, bases y herrumbre, siendo estas reacciones sumamente exotérmicas incluso en presencia de sólo unas trazas de estos compuestos.

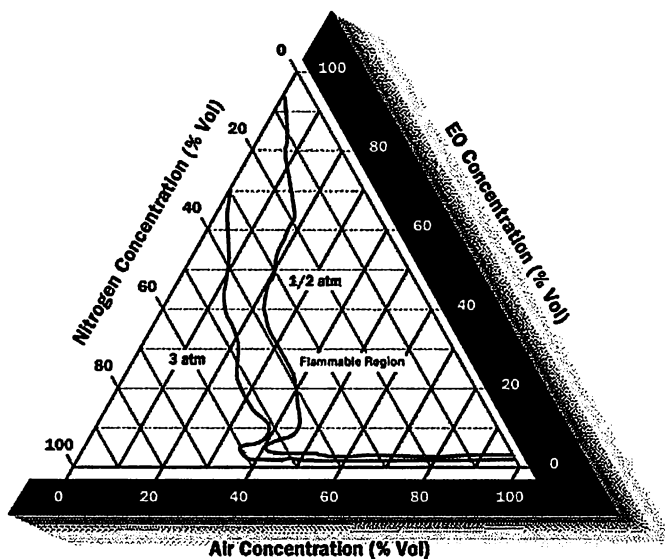


Figura 1.2: Efecto de la presión sobre las regiones inflamables en una mezcla de OE – Aire – Nitrógeno a 20 °C. [9]

1.5. Descomposición

La descomposición del OE se inicia si el producto se calienta por encima de 560 °C, temperatura de autodescomposición. Estos vapores son explosivos incluso en ausencia de aire y son catalizados por acetiluros metálicos o metales como el cobre, plata o mercurio. La herrumbre puede iniciar la descomposición a temperaturas más bajas, debido a puntos calientes causados por polimerización, siendo esta la causa más probable del lamentable y famoso accidente de la instalación de Union Carbide en Seadrift Texas, donde investigaciones posteriores demostraron que en presencia de óxido de hierro la descomposición del OE comenzaba alrededor de los 400 °C [11].

Los productos mayormente observados durante la descomposición incluyen etano, eti-

leno, metano, acetileno, acetaldehído, propano e hidrógeno [12].

1.6. Polimerización

La polimerización causada específicamente por temperatura inicia alrededor de los 100 °C. Como ya se indicado en otras partes de este reporte, esta reacción es extremadamente exotérmica y si no se controla la temperatura es autoacelerativa. Es así mismo importante evitar las impurezas o incompatibilidades de materiales para el almacenamiento de OE.

La polimerización del OE a temperatura ambiente resulta baja. El polímero formado es un líquido viscoso, térmicamente estable y soluble en el monómero. Cuando se expone al agua a temperaturas superiores de 50 °C produce polietilenglicol, que para el caso de este proyecto es un ejemplo de la reacción buscada pues se pretende reaccionar el OE con agua en exceso para producir monoetilenglicol.

1.7. Usos

Las características arriba descritas, además de ser fuertemente tomadas en cuenta para la fabricación, almacenamiento y transporte del OE, también son las causantes de sus usos en la industria de la transformación.

La Fig. 1.3 muestra la distribución del uso de OE típica en el mercado mundial [13], del cual se menciona que si bien esta distribución fue determinada en 1978, aún es aplicable en la actualidad. Es de resaltar que el mayor porcentaje, 65 % de OE manufacturado en el mundo, tiene destino final como anticongelante o para la fabricación de poliéster. Como

es mencionado al principio de este reporte, la empresa donde se desarrolló esta Planta Tratadora de Gases de OE participa en el mercado de tensoactivos, siendo de acuerdo a la Fig. 1.3, el tercer mercado de aplicaciones del OE. Esto quiere decir que si para el año 2000, la capacidad mundial de producción de OE era de alrededor de 14.4 millones de toneladas/año [14], cerca de 1.9 millones de toneladas de OE fueron destinadas a su uso en la industria de los tensoactivos.

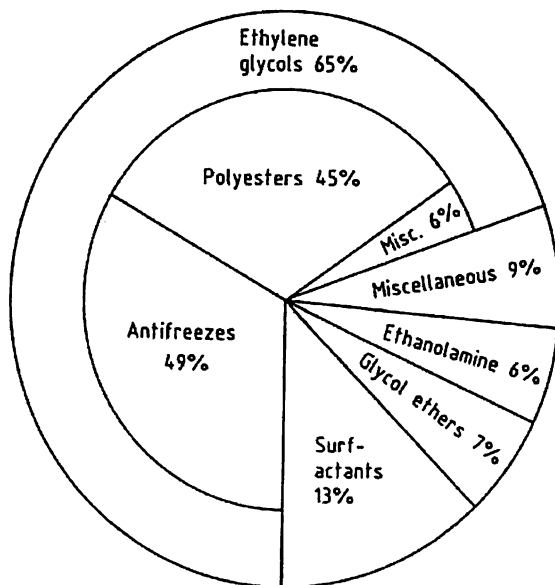


Figura 1.3: Distribución típica del uso del OE en el mercado mundial.

2 Reacción

2.1. Monoetilenglicol

Antes de pasar a la reacción entre OE y agua formando monoetilenglicol, se describen algunas características y usos que hacen que el producto de esta reacción tenga un nivel de peligrosidad y contaminación más bajo que el OE y justifique la transformación del OE en éste.

El monoetilenglicol (MEG) también llamado etilenglicol, glicol, etanodiol o glicol de etileno es el diol más simple, posee características incoloras, inodoras, es relativamente no volátil y a condiciones ambientales es un líquido higroscópico con baja viscosidad [15].

En el país es producido, entre otros, por Petróleos Mexicanos (PEMEX) quien lo clasifica de acuerdo al diamante de materiales peligrosos de la NFPA 704 como se muestra en la Tabla 2.1 [16].

Siendo para NFPA [17]:

1. Azul - Salud: 1 – Materiales que bajo condiciones de emergencia, pueden causar irritación significativa.

2. Rojo – Inflamabilidad: 1 – Materiales que deben ser precalentados antes de que una ignición pueda ocurrir. Los materiales con este grado requieren un considerable precalentamiento bajo todas las condiciones ambientales de temperatura antes de que una ignición y combustión puedan ocurrir.
3. Amarillo – Inestabilidad / Reactividad: 0 – Materiales que son normalmente estables, incluso en condiciones de fuego.
4. Blanco – Riesgos Específicos: Sin riesgo específico.

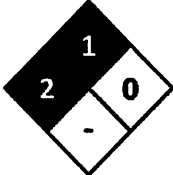
Tipo	Salud	Fuego	Reactividad	Riesgos Espec.	Clasif. Cangrejera
NFPA	1	1	0		
Cangrejera	2	1	0		

Tabla 2.1: Clasificación del MEG de acuerdo a NFPA 704 y PEMEX Cangrejera.

PEMEX Cangrejera comercializa al MEG bajo una clasificación 2 de Salud, es decir, que es un material que bajo condiciones de emergencia puede causar incapacitación temporal o lesiones residuales. Se observa que si bien el riesgo a la salud por manipulación inadecuada aumenta un nivel, su peligrosidad es bastante más baja que en el caso del OE.

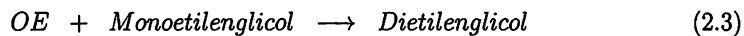
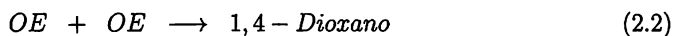
Comparando el MEG con el OE bajo una perspectiva ambiental, algunos estudios [18]

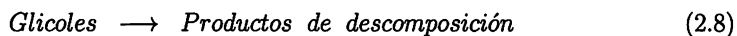
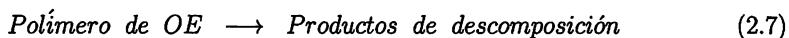
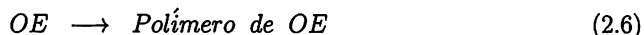
reportan que debido a la rápida biodegradación del MEG, éste no es persistente en el aire, superficie del agua, suelo o aguas subterráneas y es prácticamente no tóxico para los organismos acuáticos pues no se bioacumula en éstos.

Se desprende de esto que desde la perspectiva industrial, de salud y ambiental, es preferible tratar los efluentes que contengan OE para transformarlo en MEG.

2.2. Reacciones Posibles dentro del Sistema

Para conocer el proceso del lavador de gases primeramente debemos conocer las posibles reacciones entre el OE y el agua [19]:





En el presente trabajo sólo se tomará en cuenta la Reacción (2.1) debido a que es el principal effluente gaseoso presente en los puntos de venteos descritos en la Sección 3 además de que el agua siempre es suministrada en exceso y dada la estequiometría 1:1 de esta reacción, solamente tenemos formación de MEG en el lavador de gases.

En la Reacción (2.2), son necesarias dos moléculas de OE para la conformación de una molécula de 1,4-Dioxano y su tratamiento se realiza principalmente por medio de alguno de estos 4 procesos: oxidación avanzada usando peróxido de hidrógeno con luz ultravioleta, oxidación avanzada usando peróxido de hidrógeno con ozono; usando carbón activado granular o finalmente mediante biorremediación [20].

Para las demás Reacciones (2.3) a (2.8) sería necesario un exceso de OE lo que, como ya explicamos, no sucede en la unidad y por lo tanto, este trabajo se centra únicamente en la Reacción (2.1), ver Fig. 2.1.

Para que este proceso se lleve a cabo, son necesarios dos pasos:

1. Absorción del OE en agua. Este proceso se lleva a cabo en la columna empacada del lavador de gases, en la cual el gas con contenido de OE fluye a contracorriente por una columna empacada en la que agua suavizada es suministrada por la parte superior.
2. Reacción del OE con agua y la posterior formación del MEG. Como se explicará más adelante, este paso es favorecido tanto por pH como por temperaturas altas a diferencia del proceso de adsorción que es beneficiado con temperaturas más bajas. Esta es la causa de que estos dos procesos se lleven a cabo en equipos diferentes.

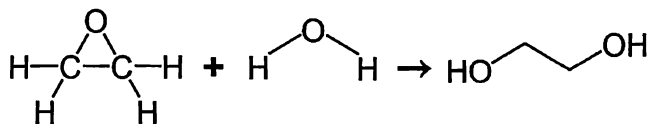


Figura 2.1: Reacción entre una molécula de agua con otra de OE para producir MEG. [21]

2.3. Absorción del OE

Los sistemas de venteo de gases con OE en columnas empacadas a contracorriente con agua son ampliamente usados en la industria química, donde la eficiencia de la absorción del OE mejora con temperaturas de proceso bajas [22] o aumentando el flujo de agua en contracorriente. Para el proceso presentado en este documento, la temperatura a controlar

en la recirculación a contracorriente será de 35 °C buscando precisamente aumentar la absorción del OE.

2.4. Hidrólisis del OE

En esta reacción de hidrólisis el OE en fase gaseosa que proviene de las purgas o desfogues del proceso entra en contacto con el agua suavizada de reposición en el scrubber produciendo MEG, de acuerdo a la siguiente estequiometría, también mostrada en la Reacción 2.9.



La rapidez de reacción del OE con agua para producir glicoles es significativamente mayor en un medio alcalino o ácido que en condiciones neutras, donde una fuerte aceleración ocurre en pH debajo de 4 o superior a 12 [23]. La Fig. 2.2 muestra que la reacción de OE con agua en ausencia de catalizador es relativamente lenta a 20 °C con una vida media de 20 días a pH neutro, mientras que a las mismas condiciones de pH pero disminuyendo la temperatura a 8 °C la vida media del OE aumenta hasta alrededor de 70 días. Se observa entonces que la hidrólisis del OE es favorecida por cambios tanto en pH como en temperatura. Esta es la razón por la que escogió durante el proyecto trabajar en un rango de pH de 8-10 y a una temperatura en el reactor tubular de 140 – 150 °C pues también la literatura reporta que de acuerdo a resultados experimentales, muy probablemente la

temperatura tenga un efecto mayor en la rapidez que el pH [24]. Además de que en la región alcalina la formación de espuma aumenta, registrándose un máximo en $\text{pH} = 10$ para experimentos de separación de proteínas usando fraccionamiento de espuma [25].

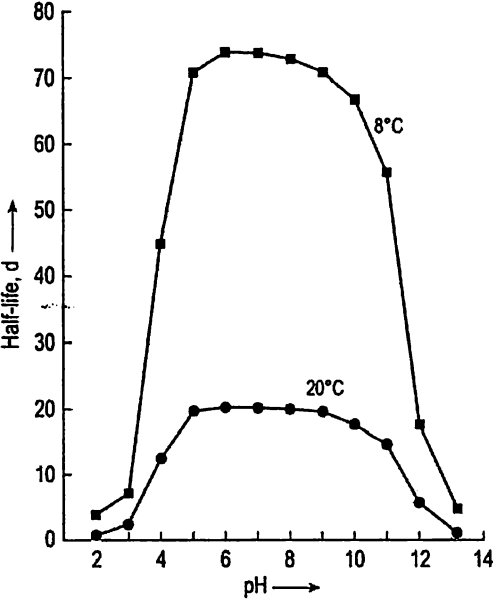


Figura 2.2: Vida media de 3 % m/m de OE en agua como función de pH y 8 y 20 °C. [26]

3 Descripción del Proceso

La unidad lavadora de gases recibirá los efluentes gaseosos de OE provenientes de:

1. Desfogues de las válvulas de seguridad de líneas de OE.
2. Purgas de líneas de OE.
3. Desfogue en el control de presión de los tanques de almacenamiento de OE.
4. Deodorizadores de las unidades etoxiladoras.

En este documento nos enfocaremos al análisis de los primeros tres puntos, pues el último referente a los efluentes provenientes de las unidades etoxiladoras es tratado en un equipo aparte llamado pre-scrubber, donde se tratan las trazas de materias primas y productos de las reacciones de etoxilación y donde es absorbido el 1,4-Dioxano que como es comentado en la Sección 2 recibe un tratamiento diferente. En el equipo denominado pre-scrubber también se pueden encontrar trazas de OE libre, sin embargo se decidió tratar estas trazas en este equipo aparte dada la naturaleza de las sustancias orgánicas que ahí llegan, pues al ser en la mayoría de los casos alcoholes grasos y polietilenglicoles de alto peso molecular hace que en los equipos donde se encuentren se mantengan temperaturas

más altas para evitar solidificaciones y reducir viscosidades, lo cual afectaría la absorción del OE. Por lo tanto, la composición de la corriente que se envía del pre-scrubber al scrubber es la de algunas trazas de agua y mayormente gases no condensables del proceso, siendo en este caso nitrógeno.

El diagrama de bloques simplificado se puede ver en la Fig. 3.1, la línea punteada delimita el proceso y equipos vistos en este documento. También se puede apreciar el Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) en la Fig. 3.3.

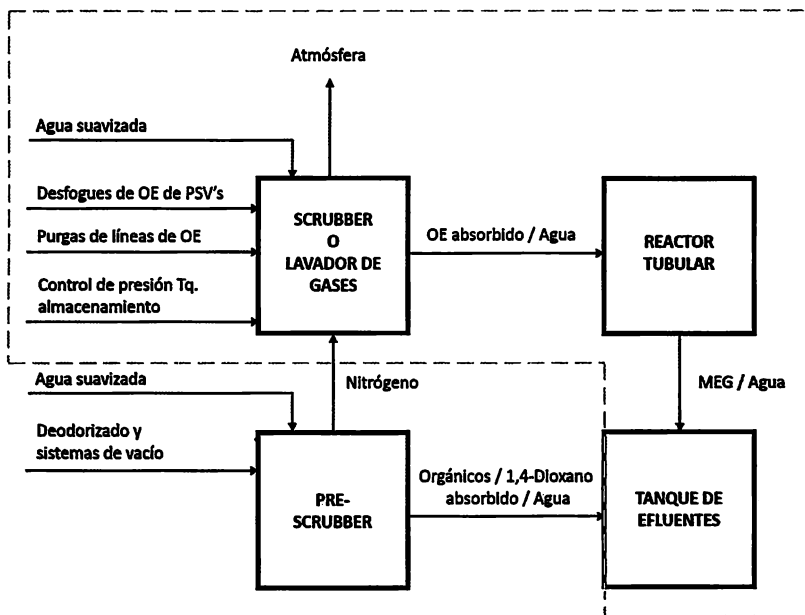


Figura 3.1: Diagrama de bloques del proceso general del lavador de gases. La línea punteada delimita los procesos y equipos tratados en este documento.

El scrubber fue diseñado considerando un efluente máximo a la entrada de óxido de etileno de 140 kg/h, de nitrógeno de 830 kg/h y de agua arrastrada del pre-scrubber de

30 kg/h, esto es tomando en cuenta las Corrientes 1, 2 y 3. La razón del alto flujo de nitrógeno se debe a que en los tanques donde se almacena siempre se mantiene la fase vapor en una región inerte al OE, como se vio en la Fig. 1.2.

La relación agua/OE mínima para mantener el sistema fuera de una región explosiva es de 22:1 (vol/vol) en sistemas abiertos y de 100:1 (vol/vol) en sistemas cerrados [27]. El scrubber es un recipiente atmosférico, por lo tanto es considerado un sistema abierto.

Tomando en cuenta la densidad mencionada en la Tabla 1.1 y que se busca tener un control de nivel de alrededor del 60 % en el scrubber, tenemos en el equipo una relación de alrededor de 30:1, es decir, aún en el caso crítico donde se considera el mayor envío de OE a la columna, tenemos alrededor del 35 % más de agua en el sistema que el requerido para no estar en una zona explosiva.

3.1. Corriente 1: PSV's y Purgas

Todas las purgas del sistema de almacenamiento y distribución de OE así como PSV's de las líneas, a excepción de las válvulas de seguridad de los tanques de almacenamiento de OE, son dirigidos a la unidad lavadora de gases. Estos venteos y purgas llegan en la Corriente 1 mostrada en el DFP, la cual no cuenta con un flujo constante establecido, pues la apertura de las PSV's se da principalmente por expansión térmica en la cual cantidades pequeñas de OE son emitidas. Para el caso de las purgas, se considera una corriente en su mayoría de nitrógeno con trazas de OE, pues éstas se llevan a cabo durante la finalización de la descarga de carrotanques, cuando ya todo el OE ha sido enviado al tanque almacén

y se precisa desconectar las tuberías. Cabe señalar que el evento de desfogue de una PSV no es común y se da sólo como accionamiento de una barrera de seguridad; los eventos de purgado o barrido de líneas se dan al finalizar las descargas de carrotanques de OE, en promedio esta operación se hace una vez al día.

Todas las purgas deberán realizarse, con al menos un nivel del 60 % en el lavador de gases C-100.

3.2. Corriente 2: Desfogue de Control de Presión

Esta es la principal alimentación de OE al sistema, pudiendo llegar a alcanzar un flujo máximo de 250 kg/h de una mezcla de OE y nitrógeno. Esta línea proviene de las válvulas de control de presión de los tanques de almacenamiento de OE, las cuales buscan mantener en todo momento a estos tanques dentro de la región no explosiva de acuerdo al rango de temperatura de operación que tienen de entre 15 a 20 °C.

La Fig. 3.2, muestra las regiones explosivas y no explosivas de un sistema cerrado de OE en función de la presión y temperatura [28]. Como se ha mencionado, el sistema de enfriamiento de los tanques de OE regula la temperatura en un rango de 15 a 20 °C, por lo que por cuestiones de seguridad se toma el peor de los casos, es decir donde el sistema de enfriamiento falle totalmente y los tanques puedan alcanzar la temperatura máxima del ambiente. Con esta nueva temperatura, se establece la presión máxima de operación y se da un rango de banda muerta de 10 psi al sistema para funcionamiento de las válvulas de control. Cabe aclarar que el sistema de control de presión es independiente para los

dos tanques de almacenamiento de OE que dispone la planta, quedando:

- Si la presión baja a menos de 60 psia, la válvula que inyecta nitrógeno al respectivo tanque de almacenamiento abrirá hasta llegar al *setpoint* de 65 psia.
- Si la presión aumenta a más de 70 psia, la válvula que desfoga nitrógeno más el óxido de etileno en equilibrio en la fase vapor abrirá y cerrará hasta que la presión llegue a 65 psia, esta es básicamente la principal corriente a tratar en el lavador de gases.
- Si los tanques de almacenamiento se encuentran entre los 60 y 70 psia, ambas válvulas permanecerán cerradas.

3.3. Corriente 3: No Condensables del Pre-scrubber

Como se ha comentado en secciones anteriores, esta corriente en su mayoría nitrógeno y vapor de agua, contendrá trazas de OE solamente en aquellas operaciones de deodorizado donde el OE libre en la fase gaseosa no haya alcanzado a ser absorbido dada la temperatura de operación del pre-scrubber que es más elevada. Es de aclarar que el pre-scrubber se mantiene a una temperatura aproximada de 70 °C, mientras que el scrubber se busca no tener una temperatura mayor a los 35 °C. En la literatura están reportados experimentos de solubilidad hasta 30 °C donde se comenta que la absorción a temperaturas superiores sería indeseada comercialmente en virtud de la solubilidad reducida y la rápida hidrólisis de OE a glicol [29]; sin embargo esta rápida hidrólisis es una característica deseada de

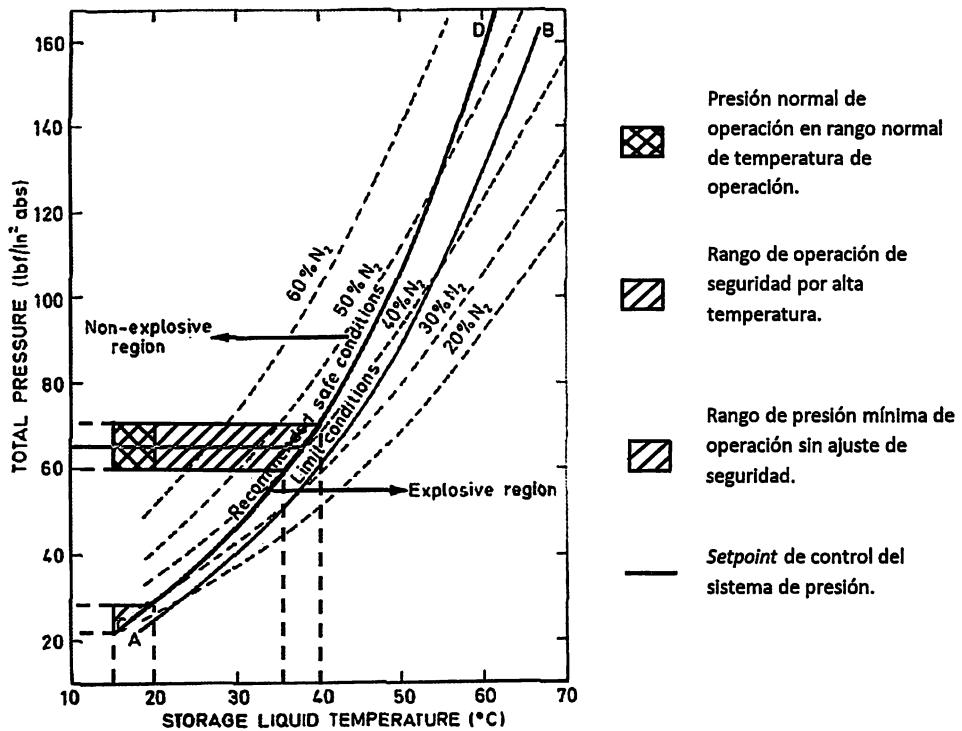


Figura 3.2: Gráfica de región Explosivas y No Explosivas para el OE en Función de la Presión y Temperatura del Sistema.

nuestro sistema.

Teniendo esta base, en el siguiente punto describimos de forma detallada el proceso del lavador de gases. La Fig. 3.3 muestra el DFP con todos los equipos y líneas comentadas en este informe. En él aparecen los valores de temperatura, flujos y las principales presiones de las corrientes del sistema. Se muestran los tags de los equipos e instrumentos y también los lazos de control que existen en la unidad lavadora de gases de OE.

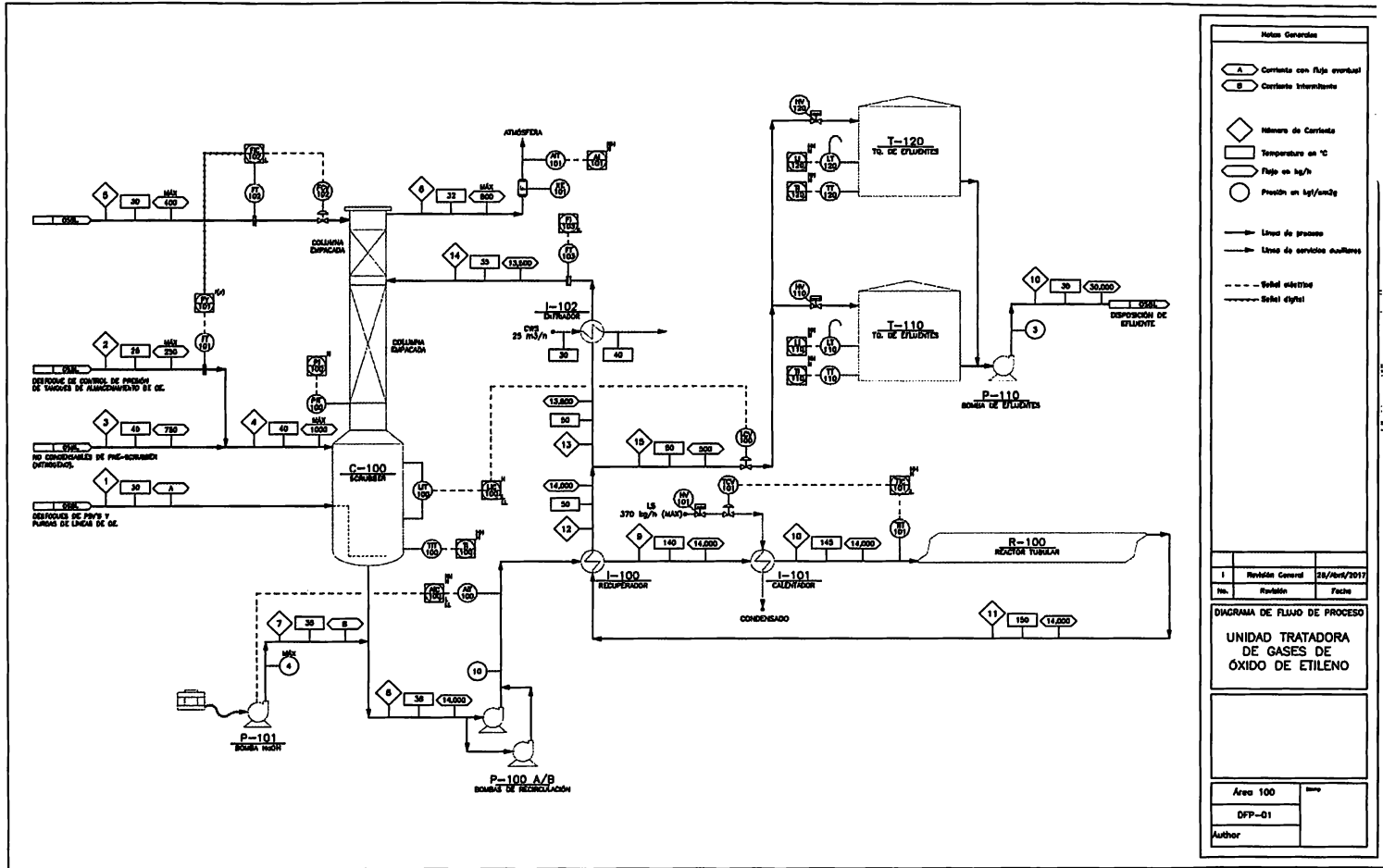


Figura 3.3: Diagrama de Flujo de Proceso de la unidad lavadora de gases de OE.

3.4. Descripción Detallada del Proceso

1. Todo el OE que entra en las Corrientes 1, 2 y 3 es absorbido por el agua cayendo en contracorriente en la columna empacada del scrubber, columna lavadora de gases o C-100.
2. El agua en contracorriente proviene de la recirculación de la misma columna, Corriente 14, y del agua suavizada que entra por la Corriente 5.

La recirculación, Corriente 14, será de alrededor de 13,500 kg/h y será una mezcla principalmente de agua suavizada con MEG.

El *setpoint* de la Corriente 5 dependerá del flujo de gases detectado en el transmisor de flujo FT-101 y el cual abrirá o cerrará la válvula de control de flujo FCV-102 en función del flujo detectado en el FT-102.

La Tabla 3.1, muestra los *setpoints* buscados en el FT-102. Por ejemplo, si el FT-101 estuviera registrando un flujo de gases de 3 kg/h y en ese instante el FT-102 estuviera registrando un flujo de agua suavizada de 300 kg/h, el control FIC-102 mandará a cerrar en un cierto porcentaje la válvula FCV-102 hasta alcanzar un flujo de 200 kg/h en el FT-102.

Otro ejemplo y una descripción más detallada de éste y los demás controles se muestran en la Sección 5 Filosofía de Control de este documento.

FT-101 (Flujo de OE + N₂)	FIC-102 <i>Setpoint</i>
< 5 kg/h	200 kg/h
≥ 5 kg/h y ≤ 250 kg/h	Lineal entre 200 kg/h y 400 kg/h
> 255 kg/h	400 kg/h

Tabla 3.1: Valores de control para la entrada de agua suavizada al sistema.

3. En el fondo del scrubber se conectarán dos bombas centrífugas (1 en reserva) para enviar a los demás equipos la Corriente 8 de alrededor de 14,000 kg/h de agua y OE. Las características de estas bombas se encuentran detalladas en la Sección 12 Glosario de Equipos.
4. Como fue descrito en la Sección 2, el pH aumenta la rapidez de la reacción, es por esto que la bomba de diafragma P-101 dosificará hidróxido de sodio NaOH al 50% vol/vol, comúnmente conocida como sosa cáustica, para regular el pH de la corriente de recirculación entre un valor de 8 y 10. Esta dosificación variable y en proceso no continuo es mostrada en la Corriente 7 que llega a la succión de las bombas de recirculación para aprovechar el mezclado provocado en el impulsor de las bombas.
5. A la salida de las P-100 A/B la corriente pasa por el recuperador de energía I-100, en este intercambiador de placas pasa por un lado la corriente fría proveniente de la descarga de las bombas y por el lado caliente pasa la salida del reactor tubular. Esta operación se hace para recuperar parte de la energía suministrada al sistema

en el paso siguiente y para disminuir el tamaño del enfriador en la llegada de la recirculación a la C-100 pues en este equipo se da un intercambio de calor que genera un delta de temperatura de alrededor de 100 °C.

6. El intercambiador de placas I-101, calentará la Corriente 9 hasta 145 °C usando vapor de baja o LS (*Low Steam*) de 8 kg_f/cm²g en uno de sus lados. Esta temperatura es medida por el transmisor indicador de temperatura TIT-101, controlada por el TIC-101 y regulada por la TCV-101. Además cuenta con una válvula de cierre rápido u on-off HV-101, que cuenta con *interlock* de seguridad más adelante descrito. El control de temperatura es mostrado en la Fig. 5.1 en la Sección 5 Filosofía de Control.
7. Si bien la reacción de formación de MEG comienza a darse desde el contacto del OE con el agua, es fundamentalmente en el reactor tubular R-100 donde la reacción se lleva a cabo completamente gracias al pH y sobre todo a la temperatura que ha alcanzado la corriente. Es por eso que en este reactor de tipo PFR (Flujo Pistón) el tiempo de residencia es fundamental para su diseño.
8. A la salida del R-100 la Corriente 11 entra por el lado caliente del recuperador de energía I-100, del cual se habló párrafos arriba, para ceder energía y bajar hasta los 50 °C, con esta temperatura podemos enviar ya la corriente a uno de los tanques de almacenamiento de efluentes por la Corriente 15 y recircular la mayor parte por la Corriente 13, describamos primero esta última.
9. La Corriente 13 pasa por un enfriador de placas que por el lado frío circula agua

proveniente de la torre de enfriamiento o CWS (*Cooling Water Supply*) y por el otro enfría hasta 35 °C la corriente proveniente del I-100 antes de regresar de nuevo al domo de la columna empacada de la C-101, Corriente 14.

10. El agua recirculada y suavizada cae por la columna empacada con el fin de aumentar el área de contacto con los gases de OE que se introducen en la base de la columna, los gases de OE son absorbidos y el ciclo comienza de nuevo.
11. Los gases no condensables y que no fueron absorbidos, en este caso nitrógeno, suben toda la columna empacada y son enviados a la atmósfera por medio del venteo, Corriente 6. En esta corriente se encuentra un instrumento indicador transmisor de atmósferas explosivas, AIT-101. Este instrumento mide el porcentaje de OE en la atmósfera. El 100 % de su rango es el LEL (*Lower Explosive Limit*) o Límite más bajo de explosividad del OE, siendo 2.6 % vol/vol en aire su valor como se muestra en la Tabla 1.1 de la Sección 1.

Lo anterior significa que, si el AIT-101 detectara en la atmósfera una composición de 2.6 % de OE y 97.4 % de aire, estaríamos ya en una mezcla gaseosa que en caso de encontrar una fuente de calor y se generara una llama, ésta continuaría propagándose [30].

Es por eso que el rango del instrumento va de 0 % LEL de OE a 2.6 % LEL del OE, es decir, cuando únicamente detecta aire en el ambiente se refleja 0 % en la medición mientras que si se alcanzara una mezcla de 2.6 % OE y 97.4 % aire mostraría una saturación del 100 %. Como veremos más adelante esta medición es fundamental

para dos cuestiones muy importantes: detectar si todo el OE está siendo absorbido y detectar condiciones inseguras. En la Sección 6 Seguridad del Proceso se establece una alarma al 5% de detección del AIT-101, esto significa que se tiene una concentración en el ambiente del 0.13% de OE, i.e. $5\% \times 2.6\% = 0.13\%$ de OE y el personal de planta tendría tiempo suficiente para reaccionar ante este evento. Si llegáramos a una detección del instrumento del 20%, i.e. $20\% \times 2.6\% = 0.52\%$ de OE, se activaría un interlock de seguridad en el que la válvula de reposición de agua FCV-102 se colocaría en modo automático y se abriría al 100% para tratar de absorber todo el OE contenido dentro de la C-100.

12. Retomando la bifurcación en la Corriente 12; una de sus derivaciones, la Corriente 15, es regulada por la válvula de control de nivel LCV-100 que busca mantener un nivel del 60% en la C-100. La Corriente 15 será enviada a uno de los dos tanques de efluentes disponibles, T-110 o T-120 en función de la disponibilidad de volumen de cada uno de ellos.
13. Durante la realización de este informe, la ampliación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales estaba siendo desarrollada, por lo que en estos momentos una pipa se lleva la mezcla de agua y MEG para su posterior tratamiento. La carga de la pipa se realiza mediante la bomba centrífuga P-100 y una sección de manguera flexible en la línea de descarga conectada a la pipa.

4 Procedimiento de Arranque de la Unidad

1. Asegurar que están llegando a la unidad todos los servicios auxiliares: CWS con al menos $4 \text{ kg}_f/\text{cm}^2\text{g}$ de presión, LS de $8 \text{ kg}_f/\text{cm}^2\text{g}$ y nitrógeno de $9 \text{ kg}_f/\text{cm}^2\text{g}$.
2. Verificar que el agua de enfriamiento en el I-102 fluye libre al cabezal de retorno y que su filtro no se encuentra taponeado.
3. Revisar que las válvulas manuales de bloqueo inmediatamente antes y después de las FCV-102, TCV-101 y LCV-100 y se encuentran abiertas y las de globo de los by-pass se encuentren cerradas.
4. Llenar hasta aproximadamente el 50 % del LIT-100 con agua suavizada y comenzar el control de la FCV-102 y LCV-101.
5. Verificar que la válvula de la línea de PSV's y purgas, Corriente 1, este alineada.
6. Verificar que la válvula proveniente de la Corriente 2 del sistema de control de presión de los tanques de almacenamiento de OE esté alineada.

7. Verificar que la válvula proveniente del pre-scrubber, Corriente 3, esté alineada.
8. Verificar que todos los instrumentos se encuentren en línea y no tengan falla en el DCS.
9. Verificar que los tanques de sello de las bombas P-100 A/B tengan glicol hasta la parte superior de la mirilla y que su presión sea de $6 \text{ kg}_f/\text{cm}^2\text{g}$ de nitrógeno.
10. Abrir la válvula de la succión de la bomba que se va a operar, ya sea la P-100A o GP-100B, sólo se utilizará una a la vez.
11. Abrir las válvulas del manómetro en la descarga de las bombas P-100 A/B y drenar hasta hacer sacado todo el aire.
12. Abrir la válvula manual a la descarga de la P-100 A/B.
13. Verificar que las válvulas a la descarga de estas bombas estén abiertas: a la entrada y salida del I-100, I-101, R-100, I-102 y a la entrada de la C-100. También que la tubería que va hacia los tanques de fibra, pasando por la válvula LCV-100 esté desbloqueada.
14. Verificar que se encuentre alineado un tanque de fibra, es decir que la HV-110 o la HV-120 se encuentre abierta. Se almacenarán los efluentes en un tanque a la vez.
15. Verificar que las válvulas manuales a la salida de los T-110 y T-120 estén cerradas.
16. Verificar que las válvulas manuales de vapor de baja del I-101 estén abiertas, alinear vapor y abrir las válvulas manuales para el retorno de condensados. Verificar que

no haya obstrucción en esta línea. Abrir la válvula HV-101 y comenzar el control de la TCV-101.

17. Alinear el tote de sosa a la succión de la P-101 y las dos válvulas manuales en la descarga de ésta, si el pH no se encuentra dentro del rango de 8-10 el sistema de control on-off comenzará a funcionar.

5 Filosofía de Control

Se ha descrito a lo largo de este texto la importancia de tratar las emisiones de OE, tanto por sus consideraciones ambientales, así como las derivadas por trabajar en zonas explosivas, es por esto que el sistema de control debe asegurar la correcta y segura operación de la planta en todo momento.

Para cumplir tal objetivo, la planta del lavador de gases cuenta con la instrumentación y controladores adecuados para el monitoreo de las principales variables del sistema. Este monitoreo y control se llevan a cabo dentro del DCS o *Distributed Control System*.

Un DCS está definido como el responsable de la seguridad de los procesos dinámicos de una planta. Usualmente contiene lógicas de control las cuales tienen una respuesta del sistema cuando no se han alcanzado los setpoints establecidos [31]. El DCS adquiere datos de proceso de forma masiva y en línea desde la instrumentación instalada en campo para que de acuerdo a límites establecidos o controladores PID (Proporcional – Integral – Derivativo) programados en su lógica, el sistema actúe sobre elementos finales (válvulas o bombas).

La Fig. 5.1 muestra en forma general como se realiza el monitoreo y control del sistema

instrumentado, se ejemplifica el caso de temperatura del R-100.

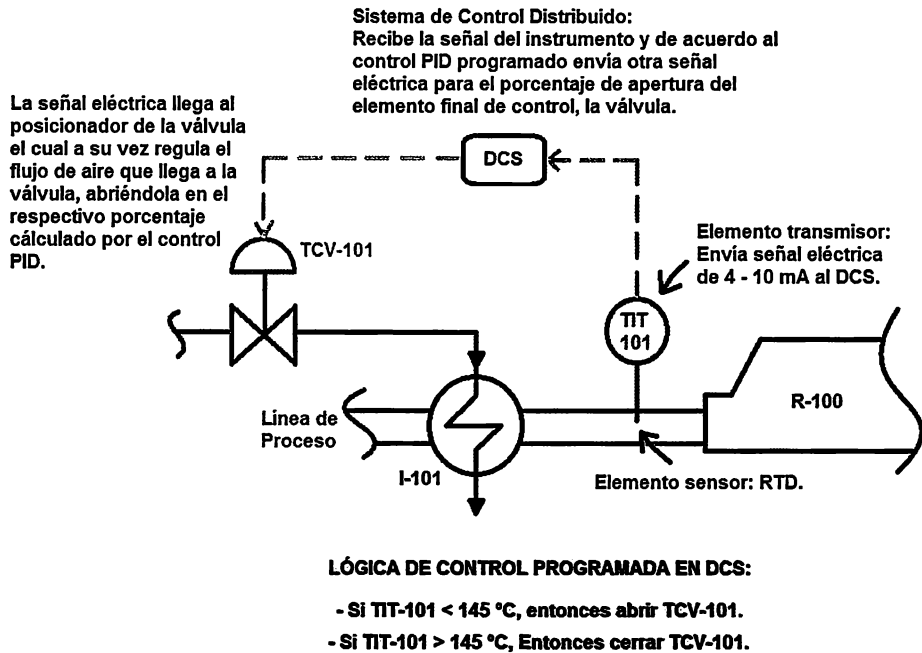


Figura 5.1: Esquema de control en un sistema instrumentado. Caso temperatura del R-100.

Vemos entonces que la correcta operación de la instrumentación es esencial, siendo las condiciones donde pudiera estar monitoreando valores fuera de proceso normal alguna de las siguientes [32]:

1. Mala operación de la planta (válvulas bloqueadas, bombas apagadas, etc.).
2. Interrupción de servicios auxiliares (agua suavizada, CWS, LS, nitrógeno o aire).
3. Riesgos inherentes al proceso (para el caso aquí estudiado, por ejemplo, sobrepresión del sistema por flujo de OE arriba del diseñado).

4. Apagón general de planta.
5. Falla de algún instrumento.
6. Arranque de planta.
7. Paro programado de planta.
8. Mantenimiento de algún equipo.
9. *By-pass* de instrumentos (instrumento no instalado en campo pero simulado en el DCS).
10. *By-pass* de proceso (línea desviada de la trayectoria normal de proceso).
11. Cambio de algún valor del control PID.
12. Cambio de algún *setpoint*.

El presente documento se enfoca en los tres primeros puntos: el primero corresponde al control realizado en el DCS y los otros dos a condiciones monitoreadas en el ESD (*Emergency Shutdown System*), que es el Sistema de Paro Seguro por Emergencia detallado más adelante en la Sección 6 Seguridad del Proceso.

5.1. Control de Reposición de Agua Suavizada

Como se ha descrito en secciones pasadas, el agua suavizada de reposición está en función del flujo de gases de nitrógeno y OE que lleguen de los tanques de almacenamiento. Este control se describe en la Fig 5.2.

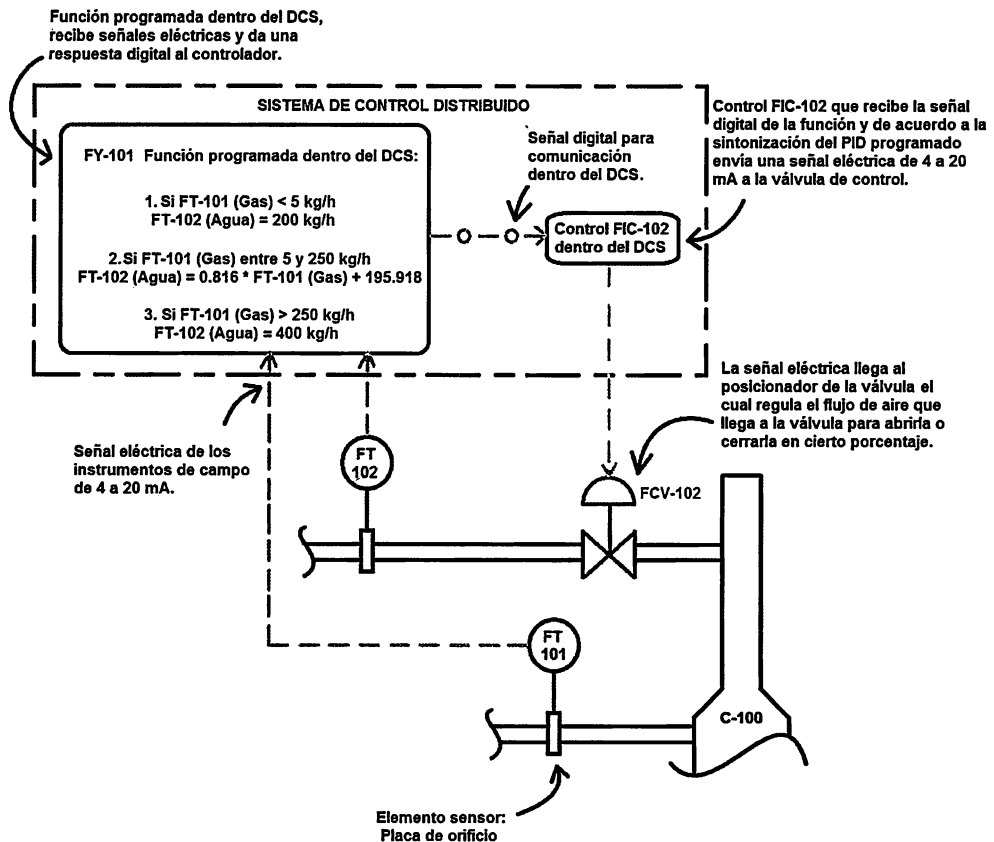


Figura 5.2: Esquema del control de reposición de agua suavizada al lavador de gases.

Con esto, el comportamiento esperado del control de reposición de agua suavizada será el mostrado en la Fig. 5.3.

5.2. Control de Nivel del C-100

Se ha descrito en este documento la importancia de mantener la relación agua/OE para evitar trabajar en atmósferas explosivas. Dicho *setpoint* de 60 % de nivel es controlado por

el LIC-100, el cual regula el cierre o la apertura de la válvula de control de nivel LCV-100.

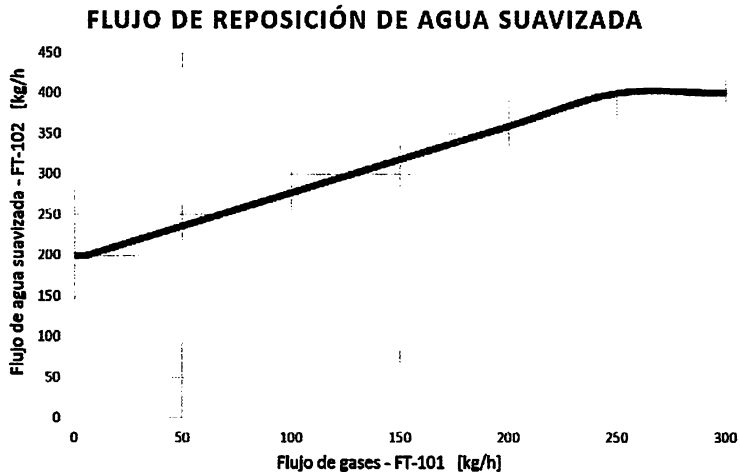


Figura 5.3: Gráfica del comportamiento del sistema de control para la reposición de agua suavizada.

Por ejemplo, al arranque de la planta o en mantenimiento el nivel estará abajo del *setpoint*, por lo tanto la LCV-100 estará cerrada, conforme el nivel vaya llegando a su valor de *setpoint* la válvula comenzará a cerrar; si en ese momento un flujo de gas considerable llega al lavador, el flujo agua suavizada de reposición aumentará en la misma proporción por lo que será necesario abrir nuevamente la LCV-100 para mantener estable el nivel.

5.3. Control de pH

El control de pH es un sistema de control de encendido-apagado u on-off como normalmente se le conoce. Este control es el más simple posible [33], además de ser fácil en

su diseño y barato. Este tipo de control se utiliza cuando no es necesaria mucha precisión o cuando la variación de la variable manipulada no tiene grandes oscilaciones a lo largo del tiempo.

Para el proceso estudiado en este documento, es utilizado en el control de pH, recordando que se desea controlar el pH en un rango de 8 a 10. Este controlador básicamente enciende o apaga la bomba P-101 dosificadora de sosa, su criterio es el siguiente:

1. Si el pH medido a través del indicador transmisor de pH AIT-100 es inferior a 8, el controlador AIC-100 enciende la P-101 y mantiene encendida la bomba.
2. Cuando el pH medido a través del AIT-100 es mayor a 10, el AIC-100 apaga la bomba.
3. La banda muerta, o *dead band*, ocurre en el descenso de pH de 10 a 8. Ahí el sistema no efectúa ningún control hasta que de nuevo el valor de pH es menor a 8.

Este control resulta ser efectivo, pues el sistema al contener en su mayoría agua suavizada, se encuentra en un pH próximo de 7 por lo que la adición de NaOH depende del agua suavizada ingresada al sistema y por ende de la cantidad de gases de OE venteados.

5.4. Control de Temperatura de Reacción en el R-100

La temperatura a controlar durante la reacción de hidrólisis del OE en el reactor tubular es de 145 °C. Este control es crítico pues de ser menor podría haber OE sin reaccionar en la recirculación de la columna o en los tanques de almacenamiento finales, provocando

que la concentración de OE aumente colocando el sistema en una zona de explosividad.

El control de temperatura TIC-101 básicamente regula la apertura de la TCV-101 en función del valor registrado en el TTT-101, la Fig. 5.1 mostrada páginas antes lo ilustra.

Al ser el control más riguroso del sistema, es necesario que tenga el mínimo de variaciones a lo largo del tiempo. Por eso se buscó que tuviera la mejor sintonización posible y que reaccionara de forma rápida y oportuna a los cambios de temperatura del sistema.

La estrategia de sintonización del control PID se basó en un sistema de primer orden donde eran incrementados deltas de temperatura a cada prueba [34]. La sintonización de este controlador se desarrolló en los siguientes pasos:

1. Se fijaba un *setpoint* de temperatura, digamos 100 °C y se colocaba una ganancia en el controlador inicial de 0, esto ordenaba al sistema una respuesta lenta a la apertura de la válvula; al mismo tiempo colocábamos un tiempo integral demasiado grande, digamos de 10,000 segundos/repetición con el objetivo de que la acción integral fuera pequeña, tomando en cuenta que la acción integral proporciona una corrección para compensar perturbaciones del sistema y mantener la temperatura lo más cercana al *setpoint* objetivo.
2. Como la respuesta de la apertura es lenta, se aumentaba el *setpoint* a otro valor, supongamos 110 °C y se aumentaba la ganancia hasta que la respuesta fuera tan rápida que el sistema comenzara a oscilar.
3. En ese momento se fijaba una ganancia igual a la mitad de la que comenzó a oscilar el sistema y se comenzó a disminuir el tiempo integral para hacer la acción integral

más grande pero no demasiado para no desestabilizar el sistema.

4. Se aumentaba la temperatura de control y se seguían afinando los valores de ganancia y tiempo integral.
5. El tiempo derivativo durante toda la sintonización se mantuvo en 0 segundos, pues durante las pruebas se observó que por las características del sistema no era necesaria alguna acción de anticipación con respecto a la lectura del TIT-101.

Resumiendo, la acción proporcional, integral y derivativa conforman un control que comúnmente se conoce como PID, el cuál es actualmente el tipo de control más usado en la industria química. Entender los fundamentos de las acciones del PID, nos dará una buena base para comprender un sistema de control y, también, cómo podemos sintonizarlo para que las diferentes variables de proceso estén siempre en valores muy cercanos a sus *setpoints* a pesar de las variaciones en el proceso.

La Fig. 5.4 ilustra el comportamiento idealizado de las señales proporcionales, derivativas e integrales en un sistema de control y cómo se verían reflejadas en la variable a controlar [35].

En la Fig. 5.4 se observa que a pesar de que hay un cambio en las condiciones de proceso, el control PID reacciona de forma rápida y con una sola oscilación pequeña, en este ejemplo, para mantener estable el *setpoint* de nuestra variable seleccionada.

Como indicación aproximada para el uso de los controladores PID tomando en cuenta los tipos de lazo a controlar, podemos seguir las siguientes reglas generales [36], sin embargo se debe dejar en claro que cada sistema tendrá que ser estudiado de forma específica

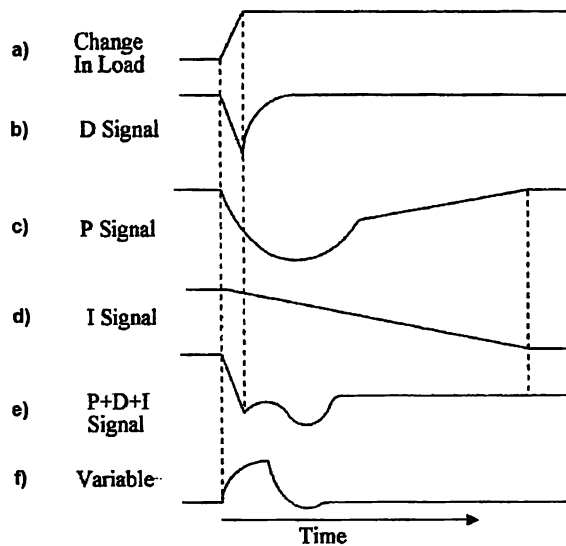


Figura 5.4: a) Cambio en una condición del proceso que afecta a nuestra variable. b) Reacción de la acción derivativa. c) Reacción de la acción Proporcional. d) Reacción de la acción integral. e) Suma de las acciones anteriores, control PID. f) Variación del *setpoint* de la variable monitoreada.

a sus necesidades y comportamientos:

- El control de presión requiere acción proporcional e integral; normalmente la derivativa no es requerida.
- El control de nivel requiere acción proporcional y a veces integral; normalmente la derivativa no es requerida.
- El control de flujo requiere acción proporcional e integral; normalmente la derivativa no es requerida.
- El control de temperatura requiere acción proporcional, integral y derivativa.

6 Seguridad de Proceso

Cuando es bien diseñado, implementado y usado, un sistema de alarmas es una poderosa arma para la operación provechosa y segura de una planta química. De forma común, la EEMUA 191 es considerada como una referencia para el diseño y operación de los sistemas de alarmas de proceso. Esta publicación define a los sistemas de alarma como una forma muy importante de monitorear automáticamente las condiciones de la planta y atraer la atención del operador del proceso hacia cambios significantes que requieren evaluación o acción [37].

Los sistemas de alarmas ayudan al operador en:

- Mantener la planta dentro de condiciones seguras de operación. Un buen sistema de alarmas ayuda al operador a corregir situaciones potencialmente peligrosas antes de que el ESD, sistema de paro por emergencia, se vea forzado a intervenir. Esto mejora la disponibilidad de la planta.
- Identificar y actuar para evitar situaciones peligrosas. El rol del ESD es intervenir antes de que el peligro crezca. Sin embargo, cabe mencionar que tanto el DCS como en ESD son “sistemas ciegos”, es decir, no tienen un juicio propio y si estuviera mal

desarrollado o implementado bajo ciertas circunstancias las acciones que el sistema de control automático tome pudieran agravar la situación [38]. Este escenario no es contemplado dentro de la planta tratadora de gases de OE por tres situaciones: fue realizado un Estudio de Operabilidad y Riesgos (HazOp) más adelante comentado, fueron realizadas pruebas de funcionamiento del sistema y en el caso más crítico del sistema donde ocurriera una sobrepresión de los tanques de almacenamiento tal que desfogaran las PSV's de estos tanques, los efluentes gaseosos se enviarían hacia una fosa de agua de dilución en lugar de dirigir esa cantidad de gases hacia el lavador.

- Adicionalmente podemos decir que las alarmas están relacionadas con eventos de seguridad, medio ambiente y procesos. A la hora de que una alarma se muestre, debe haber suficiente tiempo para que el operador tome una acción definida. La hoja de datos de la alarma deberá contener: prioridad, tiempo de respuesta del operador así como el procedimiento a seguir. Las alarmas deberán ser clasificadas de acuerdo a su prioridad en función de la severidad y el tiempo de respuesta.

Es importante tener en claro los conceptos relacionados con la documentación de alarmas o con cualquier información mostrada a los operadores en las pantallas del sistema de control, para que puedan efectuar las acciones correspondientes. A continuación se describe dicha información.

6.1. Eventos

Un evento es una información importante acerca del estatus del proceso, son mensajes del tipo “La planta está lista para el arranque”, “Abrir la válvula LCV-100”, etc. Este tipo de información no está clasificada como una alarma.

6.2. Alarmas

Los valores monitoreados por instrumentos fuera de los rangos de un proceso normal generan alarmas. Existen dos tipos de instrumentos: los análogos o los discretos.

6.3. Alarmas por Instrumentos Análogos

La señal de la alarma es generada dentro del sistema de control. Un ejemplo de esto es el transmisor de nivel LT-110, que monitorea el nivel de efluentes del tanque T-110. En este caso, el sistema de control recibe la señal y muestra el valor registrado por el instrumento en la pantalla del DCS en el cuarto de control de la planta y a su vez, compara esta señal para saber si está en un punto de alarma y de ser así emitirla. Para el caso de este instrumento y el LT-120 el valor de alarma se dispara al 70 % del llenado.

Usando la nomenclatura de la ISA, este alto nivel se representa con la letra de función H (*high*), siendo LAH-110 y LAH-120 los tags de estas alarmas dentro del DCS [39].

6.4. Instrumentos Discretos

Son instrumentos provistos de controladores individuales o separados. También hacen referencia a instrumentos que tienen cualquier número de señales con estados o posiciones no continuos, definidos o no. Los instrumentos con señales binarias son un subgrupo de éstos. En las alarmas generadas por este tipo de instrumentación la señal es enviada por el instrumento hacia el sistema de control. En la unidad estudiada en este documento no contamos con instrumentos discretos. Sólo para ejemplificar el caso podemos suponer que en lugar de contar con el pHmetro AIT-100, tuviéramos un switch que sólo detectara cuando la recirculación está debajo de 8 o arriba de 10 en pH para encender o apagar la bomba, este sería un instrumento de tipo discreto.

6.5. Prioridad

El estándar internacional IEC 61508 establece una base para la clasificación de seguridad de un sistema de control y seguridad instrumentado. Este estándar se centra en la probabilidad de que un evento indeseado suceda, su criticidad y cómo el sistema de control y seguridad pudo afectar que se diera esta situación [40].

Las siguientes Tablas 6.1, 6.2 y 6.3 nos sirven para conocer el concepto de aceptabilidad del riesgo, que serían aquellas situaciones no deseadas que debidas a su gravedad y frecuencia una compañía decide o no tomar en cuenta o invertir en más controles de seguridad.

Categoría	Definición	Rango (Fallas por año)
Frecuente	Muchas veces en el ciclo de vida del sistema	$> 10^{-3}$
Probable	Algunas veces en el ciclo de vida del sistema	De $> 10^{-3}$ a 10^{-4}
Ocasional	Una vez en el ciclo de vida del sistema	De $> 10^{-4}$ a 10^{-5}
Remoto	Improbable en el ciclo de vida del sistema	De $> 10^{-5}$ a 10^{-6}
Improbable	Altamente improbable en el ciclo de vida del sistema	De $> 10^{-6}$ a 10^{-7}
No Creíble	No se puede creer que eso llegue a ocurrir en el ciclo de vida del sistema	$< 10^{-7}$

Tabla 6.1: Clasificación de categoría por probabilidad de ocurrencia.

Categoría	Definición
Catastrófico	Múltiple pérdida de vidas
Crítico	Pérdida de una vida
Marginal	Lesiones graves a una o más personas
Despreciable	Lesiones leves en el peor de los casos

Tabla 6.2: Clasificación de las categorías según sus consecuencias.

Las Tablas 6.1 y 6.2, normalmente se combinan entre sí para formar una Matriz de Clase de Riesgo, mostrada en la Tabla 6.3.

Probabilidad/Consecuencia	Catastrófico	Crítico	Marginal	Despreciable
Frecuente	I	I	I	II
Probable	I	I	II	III
Ocasional	I	II	III	III
Remoto	II	III	III	IV
Improbable	III	III	IV	IV
No Creíble	IV	IV	IV	IV

Tabla 6.3: Matriz de clasificación del riesgo.

La Tabla 6.3 nos sirve para realizar una clasificación en la aceptación del riesgo y conocer en cuáles debemos de poner atención.

De la esta Tabla tenemos que las clases corresponden a:

- Clase I: Inaceptable en cualquier circunstancia.
- Clase II: Indeseable; tolerable sólo si la reducción del riesgo no es práctica o si los costos son desproporcionales a la ganancia esperada.
- Clase III: Tolerable si el costo de la reducción del riesgo excede al de la ganancia esperada.
- Clase IV: Aceptable, probablemente tenga que ser monitoreada.

De la clasificación anterior vemos que estas herramientas nos ayudan sobre todo a definir la cantidad y tipo de instrumentación a utilizar además de los controles a programar y los *interlocks* de seguridad a implementar durante la fase de diseño de una planta. Para nuestro proceso, decidimos tomar esa base de clasificación pero reasignando los siguientes valores:

- Despreciable: De llegar a ocurrir, no hay daño material o económico de impacto.
- Marginal: De llegar a ocurrir, el daño material o económico no compromete la operación de la planta.
- Crítico: De llegar a ocurrir, el daño material o económico compromete las operaciones de la planta.

- Catastrófico: de llegar a ocurrir, provocaría daño al ambiente, a las personas y el cierre de la planta.

Dado lo anterior, todas las alarmas tienen un tipo de prioridad establecida por la combinación del tiempo de respuesta que se debe tener ante ese evento y su severidad de acuerdo a la clasificación antes mencionada.

El tiempo de respuesta define la prioridad que debe tener la acción correctiva. Es muy importante clasificar de forma adecuada las alarmas pues en caso contrario se puede generar una situación que por tener tantas alarmas activadas y clasificadas como prioritarias y que no lo sean, cuando se llegara a presentar una que realmente lo fuera el operador omitiría hacerle caso. Ver ejemplos de la Tabla 6.4

Tiempo de respuesta del operador	Tipo de Alarma	Acción
> 10 minutos	Tan pronto como sea posible	El operador tiene tiempo de terminar la tarea que está haciendo y analizar el momento adecuado para tomar acción.
> 3 minutos y < 10 minutos	Inmediato	El operador tiene tiempo de completar la tarea que está haciendo al momento o asignar la actividad a personal desocupado en ese momento.
< 3 minutos	Emergencia	Prioridad máxima, el operador debe tomar acción justo al detectar la alarma.

Tabla 6.4: Acción esperada en función del tiempo de respuesta del operador

En la Tabla 6.5 de las siguientes páginas, se muestran todas las alarmas contempladas en la planta tratadora de gases.

Información del Instrumento						Función de la Alarma			Seguridad		
No	Tag	Alarma	Descripción	Punto de Disparo	Valor Normal	Consecuencias	Causas	Acciones	Tiempo de Resp.	Clasif.	Clase
1	AIT-100	AAL-100	pH bajo en recirculación de la C-100	< 8	> 8 y < 10	-Reducción en la rapidez de reacción del OE.	-Falla de la P-101. -Falta de hidróxido de potasio. -Bloqueo en línea de descarga.	-Verificar funcionamiento de la P-101 y válvulas de esas tuberías. -Verificar nivel de tote de sosa cáustica.	> 10 min.	Probable y Marginal	II
2	AIT-100	AAH-100	pH alto en recirculación de la C-100	> 10	> 8 y < 10	-Alto consumo de sosa cáustica. -Generación excesiva de espuma.	-Falla de la P-101.	-Verificar funcionamiento de la P-101.	> 10 min.	Probable y Marginal	II
3	FT-102	FAL-102	Bajo flujo de agua de repuesto de la C-100	< 170 kg/h	200 kg/h	-OE sin reaccionar. -Posible emisión de OE a la atmósfera.	-Falla en el lazo de control FIC-102 o funcionamiento en modo manual con un <i>setpoint</i> menor. -Falla del FT-102. -Falla de la FCV-102, posición a falla cierra. -Cierre de las válvulas manuales de bloqueo. -Falla en las bombas de suministro de agua suavizada.	-Verificar el FT-102. -Verificar el FIC-102. -Verificar la FCV-102 y sus válvulas de bloqueo. -Verificar las bombas de suministro de agua suavizada (OSBL).	De 3 a 10 min.	Ocasional y Crítico	II

Información del Instrumento						Función de la Alarma			Seguridad		
No	Tag	Alarma	Descripción	Punto de Disparo	Valor Normal	Consecuencias	Causas	Acciones	Tiempo de Resp.	Clasif.	Clase
4	FT-103	FAL-103	Bajo flujo de recirculación en la C-100	< 13,000 kg/h	13,500 kg/h	-Posible emisión de OE a la atmósfera.	-Cierre de las válvulas manuales de bloqueo. -Falla de la bomba P-100A o P-100B. -Descalibración del instrumento.	-Verificar las válvulas de bloqueo. -Verificar la P-100A y/o P-100B. -Verificar el FT-103.	De 3 a 10 min.	Ocasional y Marginal	III
5	PIT-100	PAH-100	Alta presión en el fondo de la C-100.	> 2,000 mmH ₂ O	100 - 500 mmH ₂ O	-La capacidad de absorción de la C-100 se reducirá. -Posible emisión de OE a la atmósfera.	-Bloqueo del venteo a la atmósfera de la C-100 -Flujo excesivo de gases.	-Verificar si el venteo a la atmósfera no está bloqueado. -Verificar el comportamiento de los tanques de almacenamiento de OE (OSBL)	De 3 a 10 min.	Ocasional y Marginal	III
6	TIT-100	TAH-100	Alta temperatura de recirculación en la C-100	> 35 °C	30 - 35 °C	-Posible emisión de OE a la atmósfera.	-Falla en el suministro de CWS (OSBL) -Bloqueo de válvulas manuales del lado de enfriamiento del I-102. -Cierre de válvulas manuales de FCV-102. -Falla en el TIC-101 o funcionamiento en modo manual con un <i>setpoint</i> mayor.	-Verificar el abastecimiento de agua de enfriamiento. -Verificar las válvulas manuales del I-102. -Verificar las válvulas manuales de la FCV-102. -Verificar el TIC-101.	< 3 min.	Ocasional y Marginal	III

Información del Instrumento						Función de la Alarma			Seguridad		
No	Tag	Alarma	Descripción	Punto de Disparo	Valor Normal	Consecuencias	Causas	Acciones	Tiempo de Resp.	Clasif.	Clase
7	LIT-100	LAH-100	Alto nivel en la C-100	75 %	60 %	-Posible contaminación con efluentes de la línea de venteo de los tanques de almacenamiento de OE.	-Falla en el control FIC-102 o funcionamiento en modo manual con un <i>setpoint</i> mayor. -Falla en el FT-101 registrando valores más altos. -Falla en el FT-102 registrando valores más bajos. -Falla de la LCV-100 o cierre de las válvulas manuales. A falla cierra. -Falla del LIC-100	-Abrir el <i>by-pass</i> lo suficiente hasta haber alcanzado el 60 % de nivel. -Verificar la LCV-100. -Verificar el LIC-100. -Verificar el FT-101. -Verificar el FT-102. -Verificar el FIC-102. -Verificar la alineación de la tuería y equipos.	De 3 a 10 min.	Probable y Marginal	II
8	LIT-100	LAL-100	Bajo nivel en la C-100.	55 %	60 %	-Acercamiento a la zona de explosividad en caso de flujo máximo. -Evitar un nivel más bajo y generar posible cavitación en alguna de las bombas P-100 A/B.	-Falla en el control LIC-100 o funcionamiento en modo manual con un <i>setpoint</i> mayor. -Falla en el LIT-100 registrando valores más altos. -Válvula <i>by-pass</i> de la LCV-100 abierta. -Falta de suministro de agua suavizada. -Algún dren abierto.	-Verificar el <i>by-pass</i> de la LCV-100. -Verificar la LCV-100. -Verificar la alineación de tuberías y equipos. -Verificar las bombas de suministro de agua suavizada (OSBL).	De 3 a 10 min.	Probable y Marginal	II

Información del Instrumento						Función de la Alarma			Seguridad		
No	Tag	Alarma	Descripción	Punto de Disparo	Valor Normal	Consecuencias	Causas	Acciones	Tiempo de Resp.	Clasif.	Clase
9	LT-110	LAH-110	Alto nivel en el T-110	70 %	0-70 %	-Derrame de efluente.	-Falla en el control LIC-100 o funcionamiento en modo manual con un <i>setpoint</i> mayor. -Válvula <i>by-pass</i> de la LCV-100 abierta. -Retraso de la pipa que retira efluentes.	-Programar carga de pipa para efluentes. -Si el T-120 no estuviera lleno, alinear sistema hacia ese tanque. -Verificar la LCV-100 y sus válvulas de bloqueo. -Verificar el LIC-100.	> 10 min.	Probable y Marginal	II
10	LT-120	LAH-120	Alto nivel en el T-120	70 %	0-70 %	-Derrame de efluente.	-Falla en el control LIC-100 o funcionamiento en modo manual con un <i>setpoint</i> mayor. -Válvula <i>by-pass</i> de la LCV-100 abierta. -Retraso de la pipa que retira efluentes.	-Programar carga de pipa para efluentes. -Si el T-110 no estuviera lleno, alinear sistema hacia ese tanque. -Verificar la LCV-100 y sus válvulas de bloqueo. -Verificar el LIC-100.	> 10 min.	Probable y Marginal	II

Información del Instrumento						Función de la Alarma			Seguridad		
No	Tag	Alarma	Descripción	Punto de Disparo	Valor Normal	Consecuencias	Causas	Acciones	Tiempo de Resp.	Clasif.	Clase
11	TT-110	TAH-110	Alta temperatura en el T-110.	> 60 °C	30-50 °C	Acercamiento a temperatura de termoderformación del T-110.	-Falla en el suministro de agua de enfriamiento (OSBL). -Bloqueo de válvulas manuales del lado de enfriamiento del I-102. -Apertura de la válvula manual del <i>by-pass</i> de la TCV-101. -Falla en el TIC-101 o funcionamiento en modo manual con un <i>setpoint</i> mayor. -Registro de temperatura del TIT-101 o del TT-110 más bajo que el real.	-Verificar el TIC-101. -Verificar el abastecimiento de agua de enfriamiento. -Verificar las válvulas del I-102. -Verificar la TCV-101 y su válvula de <i>by-pass</i> . -Verificar el funcionamiento de los TIT-101 y TT-110.	> 10 min.	Ocasional y Crítico	II

Información del Instrumento						Función de la Alarma				Seguridad	
No	Tag	Alarma	Descripción	Punto de Disparo	Valor Normal	Consecuencias	Causas	Acciones	Tiempo de Resp.	Clasif.	Clase
12	TT-120	TAH-120	Alta temperatura en el T-120.	> 60 °C	30-50 °C	Acercamiento a temperatura de termodformación del T-120.	-Falla en el suministro de agua de enfriamiento (OSBL). -Bloqueo de válvulas manuales del lado de enfriamiento del I-102. -Apertura de la válvula manual del <i>by-pass</i> de la TCV-101. -Falla en el TIC-101 o funcionamiento en modo manual con un <i>setpoint</i> mayor. -Registro de temperatura del TIT-101 o del TT-120 más bajo que el real.	-Verificar el TIC-101. -Verificar el abastecimiento de agua de enfriamiento. -Verificar las válvulas del I-102. -Verificar la TCV-101 y su válvula de <i>by-pass</i> . -Verificar el funcionamiento de los TIT-101 y TT-120.	> 10 min.	Ocasional y Crítico	II

Información del Instrumento					Función de la Alarma			Seguridad			
No	Tag	Alarma	Descripción	Punto de Disparo	Valor Normal	Consecuencias	Causas	Acciones	Tiempo de Resp.	Clasif.	Clase
13	AIT-101	AAH-101	Aumento de la concentración de OE en efluente gaseoso de la C-100.	5%LEL	0%LEL	-Emisión de OE a la atmósfera.	-Bajo flujo de recirculación en la C-100. -Alto flujo de OE/nitrógeno. -Descalibración del instrumento AIT-101.	-Verificar condiciones de recirculación por el FT-103. -Verificar la operación de los tanques de almacenamiento de OE (OSBL). -Verificar alguna purga alta hacia la C-100. -Verificar la calibración y funcionamiento del AIT-101.	De 3 a 10 min.	Probable y Marginal	II
14	TIT-101	TAL-101	Baja temperatura en el R-100.	< 135 °C	145 °C	-Posible emisión de OE a la atmósfera.	-Falla en la TCV-101. Posición a falla cierra. -Cierre de las válvulas manuales de la TCV-101. -Falla en el TIC-101 o funcionamiento en modo manual con un <i>setpoint</i> menor. -Falla en el TIT-101 registrando valores bajos. -Falla en el suministro de vapor a la unidad.	-Verificar la TCV-101 y sus válvulas manuales. -Verificar el TIC-101. -Verificar el TIT-101. -Verificar el abastecimiento de vapor (OSBL).	De 3 a 10 min.	Probable y Marginal	II

Información del Instrumento						Función de la Alarma			Seguridad		
No	Tag	Alarma	Descripción	Punto de Disparo	Valor Normal	Consecuencias	Causas	Acciones	Tiempo de Resp.	Clasif.	Clase
15	TIT-101	TAH-101	Alta temperatura en R-100.	> 155 °C	145°C	-Llegada del efluente a los T-110 y T-120 con una temperatura más elevada. -Consumo excesivo de vapor.	-Falla en la TCV-101. Posición a falla cierra. -Apertura del <i>by-pass</i> . -Falla en el TIC-101 o funcionamiento en modo manual con un <i>setpoint</i> mayor. -Falla en el TIT-101 registrando valores más altos.	-Verificar la TCV-101 y sus válvulas manuales. -Verificar el TIC-101. -Verificar el TIT-101. -En caso de que la temperatura en la C-100 vaya aumentando, abrir más el flujo de agua de enfriamiento hacia el I-102.	De 3 a 10 min.	Ocasional y Marginal	III

Tabla 6.5: Listado de alarmas para la unidad lavadora de gases de OE.

6.6. Matriz de Causa-Efecto

Una Matriz de Causa-Efecto es un diagrama que muestra el valor al que un *interlock* de seguridad va a actuar (Causa) y cuál elemento de control final o equipo se verá involucrado directamente en la acción (Efecto) cuando se vean cruzados. Se asume que todos los efectos permanecerán activos hasta que no haya una acción del operador de planta [41]. Cabe mencionar que en la industria, algunas veces y dependiendo del proceso, se coloca una opción de *auto-reset* para que un *interlock* se desactive y vuelvan a su posición anterior los equipos o instrumentos si el parámetro que disparó el *interlock* ha vuelto a su valor normal.

Como fue mencionado anteriormente en el texto, el *tag* de las alarmas fue colocado de acuerdo a los estándares de la ISA-5.1, de la misma manera seguimos este estándar para la identificación de los *interlocks*.

Puesto que un *interlock* de seguridad es una capa de protección superior a la alarma, donde la variable a regular ha quedado fuera del control del operador de planta, este valor de disparo será más alto que el de la alarma (donde aún el operador de planta podía reaccionar). Su *tag* entonces estará representado por las letras HH indicando que la variable está en un rango Alto-Alto (*High-High*) o LL indicando que esté en un rango Bajo-Bajo (*Low-Low*).

Por ejemplo, la temperatura de reacción de entrada al reactor R-100 se mide con el instrumento transmisor indicador de temperatura TIT-101, su valor normal será de 145 °C. Si el valor aumentara demasiado habría dos consecuencias: la absorción de OE en la

columna disminuiría y la temperatura de los tanques de almacenamiento estaría fuera de condiciones normales de operación. Si bien los tanques son de fibra de vidrio reforzada con vinil éster y existen investigaciones y especificaciones de fabricantes que establecen un límite máximo de temperatura de almacenamiento de MEG de 100 °C [42] [43], no es deseable acercarse a esta temperatura evitando tener una deformación viscoplástica.

6.7. *Interlocks* de Seguridad

La Tabla 6.6 mostrada anteriormente es resultado de varios análisis de riesgos, entre los que destacamos el *What If* y el *HazOp* (*Hazard and Operability Studies*) Estudio de Operabilidad y Riesgos. Siendo este último un procedimiento formal usado para identificar y analizar riesgos dentro de operaciones en la industria química.

Este estudio requiere de los Diagramas de Tubería e Instrumentación (DTI's) completos y especificaciones de los equipos para poder analizar los nodos de los procesos en los cuales se estudian diferentes casos usando una serie de palabras claves: menor, mayor, inverso, sin, etc., a los cuales referenciamos las variables de proceso que queremos estudiar: temperatura, presión, flujo, etc. [44]

Dado lo anterior, podemos ver que del caso "Bajo nivel en la C-100" surgió el *interlock* no. 1, pues si la columna C-100 se vacía, es decir que el nivel leído por el instrumento LIT-100 sea menor a 10%, esto podría provocar que las bombas P-100 A/B trabajaran con un *NPSH* disponible menor que el requerido o en el peor de los casos en vacío y al

ser bombas centrífugas caviten y se dañen.

Número	Efecto	Punto de disparo	Causas
1	Apagar P-100 A/B	10%	× LALL-100 Muy bajo nivel en la C-100 × TAHH-100 Muy alta temperatura en la C-100 × AAHH-100 Muy alto pH en la C-100 × AALL-100 Muy bajo pH en la C-100 × TAHH-101 Muy alta temperatura en el R-100 × TAHH-110 Muy alta temperatura en el T-110 × TAHH-120 Muy alta temperatura en el T-120 LAHH-110 Muy alto nivel en el T-110 LAHH-120 Muy alto nivel en el T-120 AAHH-101 Muy alta concentración de OE en venteo
2	Cerrar HV-101	50 °C	×
3	Apagar P-101	10	×
4	Encender P-101	8	×
5	Cerrar HV-101	165 °C	×
6	Cerrar HV-101	70 °C	×
7	Cerrar HV-110	70 °C	×
8	Cerrar HV-101	70 °C	×

9	Cerrar HV-120 B	70 °C								×			
10	Cerrar HV-110 B	90 %									×		
11	Cerrar HV-120	90 %										×	
12	Abrir FCV-100 al 100 %	20 %											×

Tabla 6.6: Matriz Causa – Efecto para los interlocks de la unidad tratadora de gases.

6.8. Otras Condiciones de Seguridad

Se debe resaltar que, además de que todos los equipos, tuberías e instrumentos están diseñados para soportar las condiciones de presión, temperatura, flujo y composición del sistema, en la planta tratadora de gases descrita a lo largo de este documento, se encuentran otros dispositivos que hacen más robusta y segura la operación de la misma.

6.9. Arrestaflamas XE-101

Un arrestaflamas o arrestador de flamas se define como un dispositivo de seguridad usado como parte integral en los venteos de tanques de almacenamiento, debe permitir el libre paso de los gases o vapores hacia el exterior y evitar la propagación de flama exterior hacia el interior de los tanques de almacenamiento [45]. Para nuestro proceso, el arrestador de flamas de tipo en línea XE-101, protege el interior del lavador de gases

C-100 de cualquier fuego que pudiera generarse fuera de la columna, recordemos que si hubiera emisión de OE en la atmosfera, la mezcla con 2.6 % vol/vol de OE/aire ya estaría en una zona de inflamabilidad.

6.10. Válvula de Alivio de Presión en la Descarga de la P-101

Recordemos que la bomba P-101 es de desplazamiento positivo de tipo recíprocante, si existiera un bloqueo en la descarga de la bomba y el control la encendiera, la presión iría aumentando hasta liberarse por el elemento más sensible, probablemente dañando empaques y provocando fugas aunque no se debe descartar la posibilidad de rompimiento de línea. Para evitar este escenario se coloca una PSV en la descarga de la bomba que tenga una trayectoria libre y desfoque a la succión de la misma, de esta manera si existiera alguna sobrepresión, la PSV abriría y aliviaría esa presión hacia la succión de la bomba.

6.11. Tanques de Sello de las P-100 A/B

Los sellos mecánicos de las bombas son tipo 53A, en el cual existe una barrera líquida entre los sellos de la bomba y un tanque mantiene presurizada dicha barrera. Esto es benéfico para los casos donde el fluido de proceso es peligroso o contaminante, pues si existiera alguna fuga del cuerpo de la bomba hacia al sello esto se vería reflejado en un aumento de presión del tanque de sello o de nivel; en el caso donde el sello se dañara

permitiendo flujo del tanque de sello hacia la voluta de la bomba se vería reflejado en una disminución de la presión del tanque de sello o del nivel [46]. La Fig. 6.1 ilustra este tipo de plan API para sellos de bombas [47].

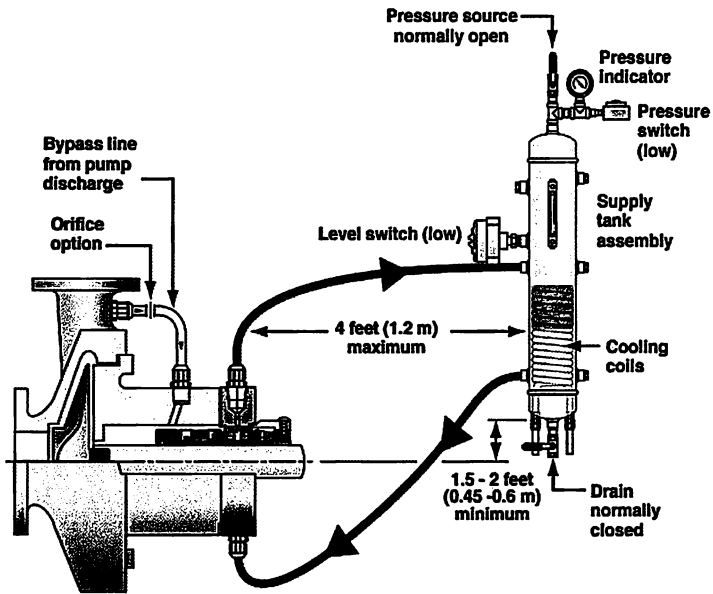


Figura 6.1: Arreglo para sello mecánico Plan 53A. Ilustración del fabricante Flowserve®.

7 Resultados

Después del comisionamiento y arranque de la unidad lavadora de gases, se estuvieron monitoreando de forma continua las variables de proceso más críticas. Dos de ellas han sido muy importantes para determinar el buen funcionamiento del lavador: el OE que probablemente no sea absorbido por la columna y la saturación de glicol en el sistema.

La primera es determinada por el AIT-101, como lo hemos descrito anteriormente, si el OE no estuviera siendo absorbido en la columna, éste escaparía por la corriente 6 de venteo y el instrumento AIT-101 detectaría (aún en porcentajes muy bajos) su presencia en la atmósfera. La Fig. 7.1 muestra el monitoreo del % OE en la atmósfera durante el mes de diciembre de 2016, como vemos los valores se han mantenido en 0. De lo cual concluimos que no hay venteos de OE a la atmósfera.

La segunda variable primordial a monitorear, es la cantidad de MEG en el sistema para mantener la relación mínima de agua/OE de 22:1 de la que hemos hablado anteriormente.

Como se ha comentado a lo largo de este documento, las unidades etoxiladoras funcionan en batch, es decir, de forma no continua. Esta es la razón que normalmente los flujos

% AIT-101



Monitoreo del AIT-101 (Diciembre 2016)

Figura 7.1: Histórico de los valores monitoreados del AIT-101 durante diciembre 2016.

de OE sean bajos. Para el proyecto, se tenía previsto que aún con el flujo mínimo de agua suavizada de reposición, se tuviera que vaciar un tanque de efluentes una vez a la semana. Durante el arranque se observó que la composición en los tanques de almacenamiento era casi agua en su totalidad, lo que generaría costos de traslado de efluentes cuando éstos eran en su gran mayoría agua, por lo que se decidió llevar a manual el control de la FCV-102 y monitorear en cada turno, 3 por día, la cantidad de agua en el sistema.

La forma de conocer el porcentaje en peso del MEG que hay del scrubber, es por medio de un análisis de agua en el laboratorio. Se estableció entonces que el control de la FCV-102 estaría cerrada y en modo manual para que el operador del cuarto de control la pudiera abrir en caso de ser necesario. De las 3 mediciones de agua al día, se envía un porcentaje a los tanques de efluentes si la composición en peso de agua es menor a 85 %. Con esto aseguramos que si hubiera un caso de flujo alto de OE, aún estuviéramos en una composición 25:1 de agua/OE, esto es, una relación 15 % mayor al mínimo en sistemas

cerrados.

Bajo esta operación la unidad se ha mantenido operando en forma segura y la generación de efluentes, es decir la cantidad de veces que se vacían los tanques de almacenamiento, han disminuido.

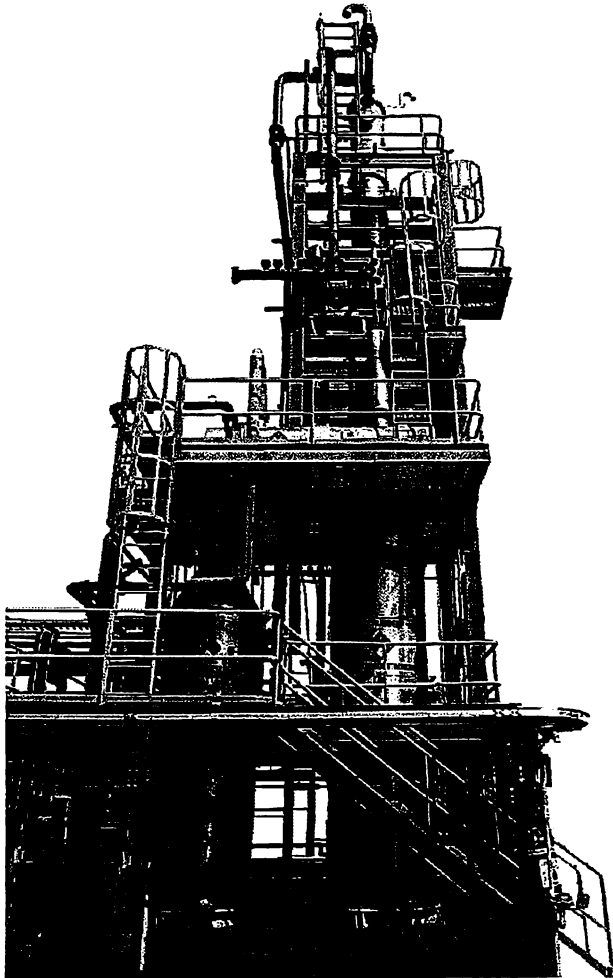


Figura 7.2: A la derecha: scrubber lavador de gases de OE. A la izquierda: pre-scrubber.

8 Conclusiones

A lo largo de este texto, hemos visto algunas características que hacen al óxido de etileno una sustancia muy versátil dentro de la industria química. También hemos visto, y nos enfocamos en esto, los cuidados que se deben tener en todo momento durante su manipulación.

Durante mi estancia en Oxiteno México Planta Coatzacoalcos mi trabajo, tanto en campo como en escritorio, fue participe en el proyecto de instalación y puesta en marcha de la sección tratadora de gases, del cual estoy muy orgulloso pues me ayudó a tener un sentido práctico de la ingeniería química, ver implementado lo descrito en papel, trabajar con un equipo multidisciplinario, contar con sensibilidad de campo y sobre todo reforzar que la seguridad es una parte primordial de la ingeniería química. En la Fig. 7.2 de la página anterior se observan algunos equipos de esta unidad lavadora de gases de OE.

Del desarrollo de este documento podemos obtener a manera de conclusión algunos aspectos importantes que me gustaría resaltar:

- Al ser la manufactura de tensoactivos un proceso batch, los venteos de gases de OE, también lo serán. Sin embargo al dimensionar una planta bajo esta perspectiva se

debe analizar el caso más crítico de flujo de efluentes para que en caso de presentarse no exista ninguna insuficiencia, como lo vimos en este documento, de agua suavizada.

- La planta tratadora de gases de OE funciona de manera continua. Si bien hay eventos de venteo de OE donde se sabe cuándo ocurren (purgas por conexión/desconexión de carrotanques de OE); el mayor flujo de OE venteado, es decir el proveniente del sistema de presión de los tanques de almacenamiento, depende de la cantidad de OE que este siendo usado en la manufactura de tensoactivos, algo que es variable con el tiempo. Para el caso del OE proveniente de las PSV's, esos eventos se espera que no sean comunes de ocurrir pues es una barrera de protección, haciendo aún más difícil determinar cuándo ocurrirán. Es por eso que la planta tratadora de efluentes de OE funciona de manera continua aun cuando el proceso de manufactura no lo sea. Hemos visto en la sección anterior que el agua de reposición es controlada de forma manual con base en los análisis diarios de porcentaje de agua en el sistema.
- Dado su operación continua las 24 horas del día, se hace crítico que si algún equipo llegase a fallar se haga su reparación de la forma más rápida posible. Los equipos grandes como la misma columna C-100, los intercambiadores o el reactor R-100 son incluidos tanto en los mantenimientos preventivos como en el mantenimiento general anual de la planta, donde se realizan Pruebas No Destructivas (PND) para verificar el estado de los materiales y las soldaduras.
- Para equipos mecánicos, el caso más crítico es la recirculación de la C-100, razón por la cual se optó por incluir dos bombas: sólo se operará una, ya sea la P-100A

o P-100B, mientras a la otra se le puede hacer mantenimiento en caso de que lo necesite. Así la planta no parará por mantenimiento de las bombas.

- En el DFP se muestran instrumentos con indicación en campo y otros sólo como transmisores, esto no ha sido al azar. Normalmente un instrumento que tenga visualización en campo será más costoso que uno que sólo sea transmisor, a la hora de desarrollar el proyecto, se pensó en hacerlo más costeable montando instrumentos con indicación en campo sólo para los que realmente ameritaba que el operador pudiera ver el valor que en ese momento estaba teniendo la variable deseada y no tener que ir al cuarto de control para poder tomar una decisión. Entre estos instrumentos con indicación en campo tenemos la indicación de nivel, presión y temperatura de la C-100; pH de la recirculación, temperatura del R-100 y el indicador de atmósferas explosivas en el venteo atmosférico de la C-100. La demás instrumentación es ciega en campo, pudiéndose visualizar en las pantallas del cuarto de control.
- Las alarmas e *interlocks* de seguridad son berreras de protección efectivas siempre y cuando estén programadas tal cual están descritas en la documentación. Es por este motivo que antes del arranque de la planta se tienen que hacer pruebas donde se simulan los valores de las variables de proceso para constatar que efectivamente las alarmas aparezcan en los valores indicados y que para el caso de los interlocks, los elementos finales de control realicen su acción correspondiente.
- Para el comisionamiento es muy importante contar con las respectivas listas de verificación, con el objetivo que durante la puesta en marcha todas las variables y

el sistema mismo se comporten de la manera en que fueron previstas y evitar la generación de alguna condición insegura durante el arranque de la unidad.

- Dentro de todas las actividades que realiza el ingeniero de procesos en una implementación y puesta en marcha de cualquier planta, una muy importante es tener claro todo el proceso químico y funcionamiento de los equipos, para poder transmitir ese conocimiento y necesidades al equipo interdisciplinario que se forma y sea más efectivo el trabajo realizado en conjunto.

Bibliografía

- [1] SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE, RECURSOS NATURALES Y PESCA e INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA, *Programa Para la Minimización y Manejo Integral de Residuos Industriales Peligrosos en México 1996-2000*, México, 1996.
- [2] SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, *Norma Oficial Mexicana NOM-052-SE/MARNAT-2005, Que Establece las Características, el Procedimiento de Identificación, Clasificación y los Listados de los Residuos Peligrosos*, Diario Oficial de la Federación, México, 2006.
- [3] AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL'S ETHYLENE OXIDE / ETHYLENE GLYCOLS PANEL, *Ethylene Oxide*, Product Stewardship Guidance Manual 3rd. Edition, 2007.
- [4] GRUPO DEL SECTOR DEL ÓXIDO DE ETILENO Y SUS DERIVADOS, *Directrices para la Distribución de Óxido de Etileno 3ra. Revisión*, Consejo Europeo de Federaciones de la Industria Química, 2004.
- [5] REBSDAT, SIEGFRIED y MAYER, DIETER, *Ethylene Oxide*, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Vol. 13, 2008.

- [6] SAFEX GOOD EXPLOSIVES PRACTICE WORKGROUP, *Managing Electrostatic Discharges (ESD) in the Manufacture of Explosives. Part 1: Technical Guide*, SAFEX International, 2012.
- [7] BRITTON, LAURENCE, *Thermal Stability and Deflagration of Ethylene Oxide*, Plant/Operations Progress, Vol. 9, No. 2, 1990.
- [8] LEVIN, M., *The Reactivity of Ethylene Oxide in Contact with Iron Oxide Fines as Measured by Adiabatic Calorimetry*, Journal of Hazardous Materials 104, 2003.
- [9] AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL'S ETHYLENE OXIDE / ETHYLENE GLYCOLS PANEL, *Op. Cit.*
- [10] SCIENTIFIC COMMITTEE ON OCCUPATIONAL EXPOSURE LIMITS, *Recommendation from the Scientific Committee on Occupational Exposure Limits for Ethylene Oxide*, Employment, Social Affairs & Inclusion, European Commission, 2012.
- [11] SANTAMARÍA, RAMIRO y BRAÑA, AÍSA, *Risk Analysis and Reduction in the Chemical Process Industry*, Springer-Science+Business Media Dordrecht, 1998.
- [12] JOSHI, AMEYA ET AL., *Thermal Decomposition of Ethylene Oxide: Potential Energy Surface, Master Equation Analysis, and Detailed Kinetic Modeling*, The Journal of Physical Chemistry A. Vol. 109, No. 35, 2005.
- [13] REBSDAT, SIEGFRIED y MAYER, DIETER, *Op. Cit.*
- [14] REBSDAT, SIEGFRIED y MAYER, DIETER, *Op. Cit.*

- [15] YUE, HAIRONG ET AL., *Ethylene Glycol: Properties, Synthesis and Applications*, Chemical Society Reviews, 2012.
- [16] COORDINACIÓN DE CALIDAD, SEGURIDAD INDUSTRIAL Y PROTECCIÓN AMBIENTAL, *Hoja de Datos de Seguridad, Monoetilenglicol*, Complejo Petroquímico Cangrejera, PEMEX Petroquímica Rev. 5, 2006.
- [17] NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, *NFPA 704: Standard System for the Identification of the Hazard of Material for Emergency Response*, NFPA, 2007.
- [18] STAPLES, CHARLES ET AL., *Fate, Effects and Potential Environmental Risk of Ethylene Glycol: A Review*, Chemosphere, Vol. 43, 2001.
- [19] MELHEM, GEORGES ET AL., *Kinetics of the Reactions of Ethylene Oxide with Water and Ethylene Glycols*, Process Safety Progress, Vol. 20, No. 4, 2001.
- [20] OFFICE OF SOLID WASTE AND EMERGENCY RESPONSE, *Treatment Technologies for 1,4-Dioxane: Fundamentals and Field Applications*, United States Environmental Protection Agency y National Service Center for Environmental Publications, Estados Unidos de América, Washington D. C., 2006.
- [21] MELHEM, GEORGES ET AL., *Op. Cit.*
- [22] MACCORMACK, K. y CHENIER, J., *Vapor-Liquid Equilibria in Dilute Aqueous Solutions of Ethylene Oxide*, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 47, 1955.
- [23] REBSDAT, SIEGFRIED y MAYER, DIETER, *Op. Cit.*

- [24] CONWAY, RICHARD ET AL., *Environmental Fate and Effects of Ethylene Oxide*, Environmental Science & Technology, Vol. 17, No. 2, 1983.
- [25] BURGHOFF, B., *Foam Fractionation Applications*, Journal of Biotechnology 161, 2012.
- [26] REBSDAT, SIEGFRIED y MAYER, DIETER, *Op. Cit.*
- [27] AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL'S ETHYLENE OXIDE / ETHYLENE GLYCOLS PANEL, *Op. Cit.*
- [28] BURGOYNE, J. ET AL, *The Explosive Decomposition of Ethylene Oxide Vapour Under Pressure, Part II*, Institution of Chemical Engineers, Symposium Series No. 25, 1967.
- [29] MACCORMACK, K. y CHENIER, J., *Op. Cit.*
- [30] BOTTA, NÉSTOR, *Medición de Explosividad*, Red Proteger, Argentina, 2012.
- [31] TATJEWSKI, PIOTR, *Advanced Control of Industrial Processes, Structures and Algorithms*, Springer, Poland, 2006.
- [32] ISAAC, A., *Automatic Control and Instrumentation for Hazardous Processes*, Symposium on Chemical Process Hazards, Institution of Chemical Engineers, 1960.
- [33] DOEBELIN, ERNEST, *Control System, Principles and Design*, John Wiley and Sons, Canada, 1985.
- [34] WANG, LIUPING y CLUETT, WILLIAM, *From Plant Data to Process Control, Ideas for Process Identification and PID Design*, Taylor and Francis, Londres, 2000.

- [35] DUNN, WILLIAM, *Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control*, McGraw-Hill, Estados Unidos de América, 2005.
- [36] DUNN, WILLIAM, *Op. Cit.*
- [37] THE ENGINEERING EQUIPMENT AND MATERIAL USER'S ASSOCIATION, *Publication 191. Alarm Systems, A Guide to Design, Management and Procurement 2nd. Edition*, EEMUA, 2007.
- [38] ISAAC, A., *Op. Cit.*
- [39] THE INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION, *ISA-5.1 Instrumentation Symbols and Identification*, American National Standards Institute, 2009.
- [40] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, *IEC 61508 Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems*, IEC, 2000.
- [41] MACDONALD, DAVE, *Practical Industrial Safety, Risk Assessment and Shutdown Systems*, Elsevier Science & Technology Books, 2004.
- [42] PLASEIED, ATOUSA y FATEMI, ALI, *Deformation Response and Constitutive Modeling of Vinyl Ester Polymer Including Strain Rate and Temperature Effects*, Journal of Materials Science, 2008.
- [43] ASHLAND, *DerakaneTM Epoxy Vinyl Ester Resins Chemical Resistance Guide. Resins Selection Guide for Corrosion Resistant FPR Applications*, 2016.

- [44] CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY, *Guidelines for Process Safety, Fundamentals in General Plant Operations*, American Institute of Chemical Engineers. Estados Unidos de América, 1995.
- [45] COMITÉ DE NORMALIZACIÓN DE PETRÓLEOS MEXICANOS Y ORGANISMOS SUBSIDIARIOS, *Norma de Referencia de PEMEX, NRF-172-PEMEX-2012. Válvulas para Alivio de Presión y Vacío en Tanques de Almacenamiento*, Petróleos Mexicanos, 2013.
- [46] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, *API Standard 682 Pumps-Shaft Sealing Systems for Centrifugal and Rotary Pumps 4th Edition*, API, 2014.
- [47] FLOWSERVE CORPORATION, *Seal Support Reservoir, Flowserve Seal Support System for Dual Unpressurized and Dual Pressurized Operation*, Flowserve, 2008.
- [48] SULZER CHEMTECH, *Structured Pakings. Energy-Efficient, Innovative and Profitable*, Sulzer Corporation.
- [49] ARNOLD, TOM y FONE, CHRIS, *Mechanical Seal Performance and Related Calculations*, Proceedings of the Twenty-Sixth International Pump Users Symposium, 2010.
- [50] CHESTERTON COMPANY, *Mechanical Seal Catalog*, Estados Unidos de América, 2011.

A Glosario de Términos

Auto-reset: En sistemas de control, función de reinicio en automático una vez que se hayan cumplido satisfactoriamente todas las condiciones lógicas.

Banda Muerta: *Dead band.* Es la histéresis entre dos puntos de detección donde no se envía una señal a los elementos finales de control, sino hasta sobrepasar el límite inferior o superior de este rango.

By-pass: Si se trata de una tubería o un equipo, se refiere a una desviación del flujo normal de proceso por medio de una válvula o equipo secundario. Si se trata de un *interlock* o alarma, hace referencia a la desactivación de éstos.

Capacidad nominal: También conocida como capacidad máxima, es el volumen asignado a un recipiente. Normalmente en la industria se refiere de un 80 a un 90% de la capacidad total del recipiente.

Deformación Viscoplastica: O deformación irreversible, es un modo de deformación en el que el material no regresa a su forma original después de retirar la carga aplicada.

Deodorizado: Dentro de la industria de fabricación de tensoactivos, etapa posterior a la etoxilación, donde se eliminan trazas de subproductos que pudiera contener el batch.

Etoxilación: Reacción llevada a cabo entre una o más moléculas de óxido de etileno y otra molécula base: alcoholes, ácidos grasos, etc.

Interlock: Función lógica programada que responde a un valor definido más alto del habitual del proceso y que dispara una acción a algún elemento final de control. Se encuentra dentro del ESD, por lo que su acción corresponde a una capa de protección de seguridad.

HazOp: *Hazard and Operability Studies*. Estudio de Operabilidad y Riesgos. Es una herramienta para realizar análisis de riesgos, el cual se centra en establecer nodos dentro del sistema para crear conjuntos de estudio y verificar qué pasaría si se presentaran diferentes variaciones al proceso normal de las variables seleccionadas.

Histéresis: Aplicado a un sistema de control, es la propiedad de conservar el último estado de control del sistema en ausencia de un cambio de señal.

Mode Man: Control en modo manual en un Sistema de control distribuido.

Setpoint: Es el valor objetivo a alcanzar y mantener para la variable de proceso que está definido.

Start-up: Arranque inicial de una planta industrial después de haber realizado pruebas generales al sistema involucrado.

B Glosario de Siglas y Acrónimos

CWR: *Cooling water return.* Retorno de agua de enfriamiento.

CWS: *Cooling water supply.* Suministro de agua de enfriamiento a 35 °C y 4 kg_f/cm²g de presión.

DTI: Diagrama de Tubería e Instrumentación. Es un diagrama técnico que contiene todos los equipos, líneas, instrumentos y lazos de control de un proceso.

LEL: *Lower Explosive Limite.* Límite más bajo de explosividad, también conocido como Límite Inferior de Inflamabilidad, es la concentración mínima de un combustible dentro de un medio oxidante (normalmente aire) para que la llama, una vez iniciada, continúe propagándose.

LS: *Low steam.* Vapor de baja a 8.5 kg_f/cm²g y 173 °C.

MAWP: *Maximum allowable working pressure.* Presión máxima permisible de trabajo, como su nombre lo indica, es la máxima presión a la que el equipo puede operar de forma normal. La NOM-020-STPS-2011, la API 520, el ASME Sección VIII, entre

otras indican que es la presión a la que un equipo debe tener válvulas de seguridad para protección del mismo.

MEG: Monoetilenglicol.

MV: Variable manipulable en un Sistema de Control Distribuido o DCS por sus siglas en inglés.

NPSH: *Net Positive Suction Head.* Altura Neta Positiva en la Aspiración, es la cantidad expresada en unidades de distancia (cabeza) de cercanía a la aspiración de la bomba, distinguiendo el $NPSH_{disponible}$ como la cabeza que físicamente se encuentra en la instalación del sistema de bombeo y $NPSH_{requerido}$ como la cabeza mínima necesaria que el fabricante de bombas establece para que la bomba no cavite.

OE: Óxido de etileno.

OSBL: *Outside Battery Limits.* Fuera de los Límites de Bateria. Se aplica este término cuando un equipo, tubería o instrumento se encuentran fuera del proceso estudiado. Para el caso de este reporte, todos los servicios auxiliares son OSBL pues se generan fuera de la unidad estudiada.

PFR: *Plug Flow Reactor.* Reactor de Flujo Pistón, es un reactor funcionando en estado estacionario suponiendo que la conversión de los reactivos está en función de la posición.

PND: Prueba No Destructiva. Pruebas que se les realiza a los materiales y soldaduras de equipos o tuberías y que no impliquen una alteración permanente en sus propiedades

físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Entre las comúnmente usadas en la industria química se encuentran, por mencionar algunas, inspección visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, radiografiado, ultrasonido, pruebas hidrostáticas y pruebas neumáticas.

PSI: *Pound per Square Inch*. Pulgada por pie cuadrado, unidad de presión donde 1 Atmósfera = 14.7 psi.

PSIA: *Pound per Square Inch Absolute*. Pulgada por pie cuadrado absoluta, unidad de presión que toma en cuenta la presión ejercida por la atmósfera y la del fluido en el interior de un equipo o tubería, donde 10 psia = 24.7 psig.

PSIG: *Pound per Square Inch Gauge*. Pulgada por pie cuadrado manométrica, unidad de presión que sólo toma en cuenta la presión ejercida por un fluido en el interior de un equipo o tubería, donde 0 psig = 14.7 psia.

PSV: *Pressure Safety Valve*. Válvulas de seguridad o válvulas de alivio, son válvulas diseñadas para aliviar presión cuando un fluido supera el valor establecido de operación. Normalmente el valor de esta presión es la MAWP.

RPM: Revoluciones por minuto. Unidad de frecuencia usada para expresar velocidad angular. Indica el número de rotaciones completadas cada minuto por un cuerpo que gira alrededor de un eje.

RTD: *Resistance Temperature Detector*. Sensor de temperatura que se basa en la resistencia del material fabricado en función de la variación de la temperatura.

SP: *Setpoint*. Valor objetivo a alcanzar y mantener para la variable de proceso que está definido.

UEL: *Upper Explosive Limit*. Límite más alto de explosividad, similar al LEL es la concentración máxima de un combustible dentro de un medio oxidante (normalmente aire) para que la llama, una vez iniciada, continúe propagándose.

C Glosario de Equipos

C.1. C-100

Columna lavadora de gases o scrubber. En el presente documento se usan ambos términos indiferentemente. Construido bajo ASME Sección VIII y conexiones bridadas bajo ASME B-16.5.

Descripción	Valor
Capacidad nominal	7.7 m ³
Presión de diseño	3.0 kg _f /cm ² g
Presión de trabajo	Atmosférico
Temperatura de diseño	150 °C
Temperatura máxima de trabajo	50 °C
Material del cuerpo	SA-516-70
Espesor del cuerpo	9.5 mm

Descripción	Valor
Clase de bridaje	150 SW/SO RF
Tipo de empaque	Mellapak™ [48], ver Fig. C.1
Material	Acero inoxidable 316

Tabla C.1: Principales datos de diseño de la C-100.

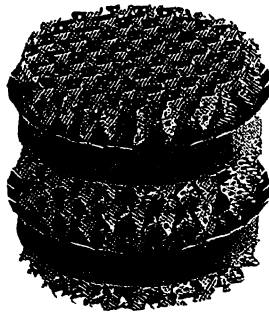


Figura C.1: Empaque Mellapak™ ubicado dentro de la sección de columna de la C-100, con el objetivo de aumentar el área de contacto entre el agua suavizada y el OE que fluyen en contracorriente.

C.2. I-100

Intercambiador de placas de precalentamiento. Por el lado frío pasará la corriente de la descarga de la P-100 A/B y por el lado caliente pasará la corriente de la salida del R-100. Construido bajo código ASME Sección VIII División I.

Descripción	Lado caliente	Lado frío
Fluido	Agua + MEG	Agua + MEG
Flujo	14 m ³ /h	14 m ³ /h
Temperatura de entrada	150 °C	38 °C
Temperatura de salida	50 °C	140 °C
Caída de presión	0.12 kg _f /cm ² g	0.12 kg _f /cm ² g
Área de transferencia	70 m ²	70 m ²
Dirección de los flujos	Contracorriente	Contracorriente
Número de pasos	1	1
Número de placas	117	117
Material y grosor de las placas	AISI 304	0.50 mm
Temperatura de diseño	165 °C	165 °C
Presión de diseño	13 kg _f /cm ² g	13 kg _f /cm ² g
Presión de prueba	15 kg _f /cm ² g	15 kg _f /cm ² g

Tabla C.2: Principales datos de diseño del I-100.

C.3. I-101

Intercambiador de placas para calentamiento. Por el lado frío pasará la corriente precalentada del I-100. Por el lado caliente pasará una corriente de vapor de 8

$\text{kg}_f/\text{cm}^2\text{g}$ proveniente de la caldera fuera del sistema. Construido bajo código ASME

Sección VIII División I.

Descripción	Lado caliente	Lado frío
Fluido	LS	Agua + MEG
Flujo	100 m^3/h	14 m^3/h
Temperatura de entrada	175 °C	140 °C
Temperatura de salida	160 °C	145 °C
Caída de presión	0.009 $\text{kg}_f/\text{cm}^2\text{g}$	0.13 $\text{kg}_f/\text{cm}^2\text{g}$
Área de transferencia	1.4 m^2	1.4 m^2
Dirección de los flujos	Contracorriente	Contracorriente
Número de pasos	1	1
Número de placas	18	18
Material y grosor de las placas	AISI 316	0.50 mm
Temperatura de diseño	200 °C	165 °C
Presión de diseño	13 $\text{kg}_f/\text{cm}^2\text{g}$	13 $\text{kg}_f/\text{cm}^2\text{g}$
Presión de prueba	15 $\text{kg}_f/\text{cm}^2\text{g}$	15 $\text{kg}_f/\text{cm}^2\text{g}$

Tabla C.3: Principales datos de diseño del I-101.

C.4. I-102

Intercambiador de placas para enfriamiento. Por el lado caliente pasará una mezcla de agua y glicol, por el lado frío pasará agua de la torre de enfriamiento. Para protección del equipo se cuenta con un filtro a la entrada del CWS el cual tiene instalado un *by-pass* para bloqueo en caso de mantenimiento. En la línea de CWR cuenta con una PSV en caso de bloqueo de equipo con entrapamiento y calentamiento del agua generando una sobrepresión. Esta PSV alivia presión a 12 $\text{kg}_f/\text{cm}^2\text{g}$ que es la MAWP para este equipo. Construido bajo código ASME Sección VIII División I.

Descripción	Lado caliente	Lado frío
Fluido	Agua + MEG	CWS
Flujo	14 m^3/h	34 m^3/h
Temperatura de entrada	50 °C	35 °C
Temperatura de salida	30 °C	40 °C
Caída de presión	0.08 $\text{kg}_f/\text{cm}^2\text{g}$	0.33 $\text{kg}_f/\text{cm}^2\text{g}$
Área de transferencia	10.8 m^2	10.8 m^2
Dirección de los flujos	Contracorriente	Contracorriente
Número de pasos	1	1
Número de placas	47	47

Descripción	Lado caliente	Lado frío
Material y grosor de las placas	AISI 316	0.50 mm
Temperatura de diseño	165 °C	40 °C
Presión de diseño	13 kg _f /cm ² g	13 kg _f /cm ² g
Presión de prueba	15 kg _f /cm ² g	15 kg _f /cm ² g

Tabla C.4: Principales datos de diseño del I-102.

C.5. P-100A y P-100B

Bombas de recirculación de la C-100. Funcionará una a la vez y la otra queda de respaldo en caso de mantenimiento o falla. Con estas bombas se recircula una parte del efluente hacia el domo de la columna y otra parte se envía a los tanques de almacenamiento. Construidas bajo ASME B73.1, conexiones bajo ASME B16.5 y motores bajo norma IEC 60079-7 para equipos operando bajo atmósferas explosivas.

Descripción	Valor
Flujo en punto de operación	14 m ³
Presión de descarga en punto de operación	10 kg _f /cm ² g
Temperatura de trabajo	38 °C

Descripción	Valor
NPSH Requerido	1.3 m
Material del cuerpo	ASTM A-216-WCB
Material del impulsor	ASTM A-216-WCB
Potencia del motor	30 hp
RPM's del motor	3,600
Tipo de sello mecánico	Plan 53A

Tabla C.5: Principales datos de diseño de la P-100 A/B.

C.6. P-103

Bomba dosificadora de NaOH. Esta bomba es de desplazamiento positivo de tipo recíprocante. Se usa para adicionar una solución de 50 % p/p de hidróxido de sodio y mantener todo el efluente en pH alcalino. Dada su naturaleza tiene instalada una PSV en la línea de descarga que desfoga a $4 \text{ kg}_f/\text{cm}^2\text{g}$, si no tuviera esta PSV y las válvulas en la descarga estuvieran cerradas, la presión podría llegar hasta los $100 \text{ kg}_f/\text{cm}^2\text{g}$ y romper la tubería, fugar por los empaques, dañar la instrumentación y la bomba misma. Construido bajo API 675, conexiones bajo ASME B16.5 y motores bajo norma IEC 60079-7 para equipos operando bajo atmósferas explosivas.

Descripción	Valor
Flujo en punto de operación	14 l/h
Presión de descarga en punto de operación	100 kg _f /cm ² g
Material del cuerpo	Inoxidable 316
Material del diafragma	Teflón
Potencia del motor	1/3 hp

Tabla C.6: Principales datos de diseño de la P-103.

C.7. P-110

Bomba para disposición a pipa de los efluentes. La mezcla de MEG y agua se retirará de la planta por medio de pipas al lugar donde serán tratadas. Esta es la función de la P-110 además de permitir el trasvase de un tanque al otro. Construida bajo ASME B73.1, conexiones bajo ASME B16.5 y motore bajo norma IEC 60079-7 para equipos operando bajo atmósferas explosivas.

Descripción	Valor
Flujo en punto de operación	30 l/h
Presión de descarga en punto de operación	3 kg _f /cm ² g

Descripción	Valor
Temperatura de trabajo	40 °C
$NPSH_{requerido}$	1.9 m
Material del cuerpo	ASTM A-216-WCB
Material del impulsor	ASTM A-216-WCB
Potencia del motor	7.5 hp
RPM's del motor	3,600

Tabla C.7: Principales datos de diseño de la P-110.

C.8. R-100

Reactor tubular. Este reactor está diseñado para aumentar el tiempo de residencia de la mezcla de OE y agua para asegurar que a la salida sólo tendremos una mezcla de MEG y agua. Construido bajo ASME Sección VIII y conexiones bridadas bajo ASME B-16.5.

Descripción	Valor
Capacidad nominal	5 m ³
Presión de diseño	13 kg _f /cm ² g
Presión de trabajo	10 kg _f /cm ² g

Descripción	Valor
Temperatura de diseño	230 °C
Material del cuerpo	SA-106-B
Espesor del cuerpo	11.13 mm

Tabla C.8: Principales datos de diseño del R-100.

C.9. Tanques de sello de las bombas P-100A y P-100B

El sello mecánico de una bomba, en una versión simple, consiste esencialmente de un anillo fijo sobre el rotor el cual es empujado contra la carcasa de una bomba. Dado que en nuestra planta debemos evitar cualquier fuga hacia la atmosfera contamos con sellos dobles tipo cartucho.

El arreglo del sello doble evita la contaminación del fluido de proceso hacia la atmósfera con una presión mayor que la presente en la voluta de la bomba causando que, en caso de rompimiento del primer sello, la fuga sea del tanque de sello hacia la tubería de proceso. Se cuenta con un plan de sello API 53A en el cual se escogió una presión de carga de nitrógeno de $6 \text{ kg}_f/\text{cm}^2\text{g}$.

Para este tipo de plan se tienen que establecer 4 puntos de análisis y cálculo [49].

- Punto 1: Nivel mínimo de líquido de barrera del tanque de sello con la presión mínima. Se asume que esta presión será la mínima posible a temperatura ambiente y es igual a la suma de la presión de la cámara del sello más una presión de margen, Ec. C.4. Mientras que la Ec. C.2 calcula la presión de la cámara de sello en función de la presión de succión y descarga de la bomba [50].

$$P_1 = P_{sb} + P_{margen} \quad (C.1)$$

$$P_{sb} = P_s + 0,25(P_d - P_s) \quad (C.2)$$

Donde:

P_{sb} = Presión de la cámara del sello en kg_f/cm^2g .

P_s = Presión de succión mínima de las P-100 A/B en kg_f/cm^2g .

P_d = Presión de descarga en el punto de eopración de las P-100 A/B en kg_f/cm^2g .

Sustituyendo, tenemos Ec. C.3,

$$P_{sb} = 2 + 0,25(10 - 2) = 4 \text{ } kg_f/cm^2g \quad (C.3)$$

Sustituyendo este valor en la Ec. C.4 tenemos,

$$P_1 = 4 + 2 = 6 \text{ } kg_f/cm^2g \quad (C.4)$$

- Punto 2: Cálculo tomando en cuenta la presión del Punto 1 y las diferencias de temperatura máxima y mínima del ambiente, Ec. C.5.

$$P_2 = P_1 \times \frac{P_{amb \ max}}{P_{amb \ min}} \quad (C.5)$$

Sustituyendo tenemos la Ec. C.6,

$$P_2 = 6 \times \frac{40 + 273,15}{15 + 273,15} = 6,52 \text{ kg}_f/cm^2g \quad (C.6)$$

- Punto 3: Cálculo tomando en cuenta la presión del Punto 2 y la relación del máximo y mínimo volumen del gas, Ec. C.7.

$$P_3 = P_2 \times \frac{V_{gas \ max}}{V_{gas \ min}} \quad (C.7)$$

Considerando que el valor mínimo de gas será 2 litro y el máximo de 3 litros pues se desea mantener alrededor de un 70% de llenado cada tanque de sello de 10 litros, tenemos la Ec. C.8,

$$P_3 = 6,52 \times \frac{3}{2} = 9,78 \text{ kg}_f/cm^2g \quad (C.8)$$

- Punto 4: Cálculo de la presión del tanque de sello usando la presión del Punto 3 pero tomando en cuenta la temperatura máxima del líquido barrera y la

máxima temperatura ambiente, Ec. C.9.

$$P_4 = P_3 \times \frac{T_{sello\ max}}{T_{amb\ max}} \quad (C.9)$$

Considerando que se estima que el líquido barrera no fluya a más de 50 °C, pues tanque de sello cuenta con un serpentín de enfriamiento que recibe agua de la torre de enfriamiento, tendríamos la Ec. C.10.

$$P_4 = 9,78 \times \frac{50 + 273,15}{40 + 273,15} = 10,01\ kg_f/cm^2g \quad (C.10)$$

De las ecuaciones anteriores, se observa que la presión mínima de operación será de 6 kg_f/cm²g y que ésta aumentará hasta llegar a un máximo de 10.01 kg_f/cm²g en el caso más crítico, valor que será monitoreado por los mecánicos de la planta para verificar el funcionamiento del sistema de sello de las bombas P-100 A/B.

Descripción	Valor
Capacidad nominal	10 l
Presión de diseño	15 kg _f /cm ² g
Presión de carga de nitrógeno	6 kg _f /cm ² g
Temperatura de diseño	70 °C
Material del cuerpo	316L
Espesor del cuerpo	11.13 mm

Tabla C.9: Principales datos de diseño de los tanques de sello de las bombas P-100A y P-100B.

C.10. T-110 y T-120

Tanques de fibra de vidrio reforzado con vinil éster para depósito temporal de efluentes de MEG y Agua. Construido bajo ASME RTP-1.

Descripción	Valor
Capacidad nominal	40 m ³
Presión de diseño	Atmosférico
Presión de trabajo	Atmosférico
Temperatura de diseño	100 °C
Material del cuerpo	Fibra de vidrio reforzada con vinil éster
Espesor del cuerpo	7.5 mm

Tabla C.10: Principales datos de diseño de los tanques T-110 y T-120.