



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TORRE DE ABSORCIÓN PARA EL ANÁLISIS DE SO₂ EN GASES DE COMBUSTIÓN”

TESIS DE GRADO
Previa la obtención del Título de:
INGENIERO QUÍMICO

DANY PATRICIO BÓSQUEZ YÁNEZ
CAROLINA MARIELA YUMI ESCOBAR

RIOBAMBA * ECUADOR**

2011

Agradecemos a Dios, por guiar nuestros pasos y llevarnos a alcanzar nuestras metas y objetivos.

A nuestras familias que con su incondicional y permanente apoyo supieron ser un soporte invaluable en todo momento de nuestras vidas.

De igual manera al Ing. Hanníbal Brito y al Ing. Hugo Calderón. Director y Miembro del Tribunal de Tesis, quienes aportaron con sus conocimientos, experiencia y esfuerzo para la culminación de este trabajo de investigación.

Por último, queremos dejar constancia de nuestro agradecimiento a todas y cada una de las personas que de una u otra forma han contribuido con la realización del presente trabajo.

Yo, Dany Patricio Bósquez Yánez dedico esta tesis a mis padres, que amo con toda mi alma, Miguel y Flor Piedad; a mis hermanos Darío, Omar y Flor, que me ha acompañado a lo largo de mi vida estudiantil.

Yo, Carolina Mariela Yumi Escobar dedico este trabajo a mis padres Segundo y Gloria, a mis hermanos Cristián y Alexis; que con amor, dedicación, comprensión y paciencia me han brindado su incondicional apoyo para enfrentar los retos de la vida.

Y en especial a mi hijo Alejandro, quien es y será la razón y luz de mi vida.

NOMBRE

FIRMA

FECHA

Dra. Yolanda Díaz

DECANA FAC. CIENCIAS

Ing. Mario Villacrés

DIRECTOR ESC. ING. QUÍMICA

Ing. Hanníbal Brito

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Hugo Calderón

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Tec. Carlos Rodríguez

DIRECTOR CENTRO DOCUMENTACIÓN

“Nosotros **DANY PATRICIO BÓSQEZ YÁNEZyCAROLINA MARIELA YUMI ESCOBAR** somos responsables de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta Tesis; y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado pertenece a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO”

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

A: Área de la tubería de entrada (m^2)

a: Área interfacial específica (m^2/m^3)

b: Concentración de salida del gas (mol/mol)

c: Concentración de entrada del gas (g SO₂ /100 g H₂O)

G: Caudal del gas (Kg-mol/h m^2)

G_v: Velocidad másica (Kg/h)

h_{relleno} = Altura del relleno (m)

H = Constante o coeficiente de la ley de Henry

H_{OG}: Altura de la unidad de transferencia (m)

K_G: Coeficiente de transferencia global de masa (Kg/h m^2)

k_G= Coeficiente de transferencia de masa para el gas (Kg/h m^2)

k_L= Coeficiente de transferencia de masa para el líquido (Kg/h m^2)

k_y= Coeficiente de transferencia de masa del gas (Kg/h m^2)

k_x = Coeficiente de transferencia de masa del líquido (Kg/h m^2)

L: Caudal del líquido (Kg-mol/h m^2)

L/G: Relación Líquido-Gas

m: Pendiente de la Recta de Operación

m_R : Pendiente de la Regresión lineal

M : Peso molecular del agua (Kg/Kg-mol)

M_{aire} :Peso molecular del aire (Kg/Kg-mol)

M_{SO_2} :Peso molecular del SO_2 (Kg-mol/Kg)

M_{H_2O} :Peso molecular del H_2O (Kg-mol/Kg)

N_{OG} :Número de unidades de transferencia

p_{SO_2} :Presión parcial del SO_2 (mm Hg)

p_{total} :Presión atmosférica de Riobamba (mm Hg)

P :Presión atmosférica (at)

Q : Caudal del líquido (agua) (m^3/s)

R :Constante de los gases (at L/Kg-mol K)

S :Área de la torre (m)

T : Temperatura (K)

$t_{combustión}$ = tiempo de combustión

v_{gas} :Velocidad del gas a la entrada (m/s)

x_1 : concentración de salida del líquido lavador y gas fondo de la torre (mol/mol)

x : Fracción Molar (mol/mol)

y :Fracción molar gaseosa (mol/mol)

y^* :Concentración de equilibrio del gas

y_1 :Concentración de SO_2 a la entrada de la torre

y_2 : Concentración de SO_2 a la salida de la torre

$(y - y^*)_M$: Promedio logarítmico de concentración.

$(y - y^*)_f$: Concentración de equilibrio en el fondo de la torre

$(y - y^*)_c$: Concentración de equilibrio en la cabeza de la torre

z : altura de la torre (m)

ϕ_T : Diámetro de la Torre (m)

ϕ_d : Diámetro de la tubería (m)

ρ_{aire} : Densidad del aire (Kg/m^3)

ρ_{agua} : Densidad del agua (Kg/m^3)

$\%SO_2$: % de la concentración del contaminante.

D =Difusividad del soluto en la fase líquida

\ln = Logaritmo natural

TABLA DE CONTENIDO

Pp:

PORTADA

AGRADECIMIENTO

DEDICATORIA

HOJA DE FIRMAS

HOJA DE RESPONSABILIDAD

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS Y GRÁFICOS

ÍNDICE DE ANEXOS

RESUMEN	i
SUMMARY	ii
INTRODUCCIÓN	iii
ANTECEDENTES	v
JUSTIFICACIÓN	vi
OBJETIVOS	viii

CAPITULO I

1.	MARCO TEÓRICO.....	1
1.1.	GASES DE COMBUSTIÓN	1
1.1.1.	TIPOS DE GASES DE COMBUSTIÓN.....	2
1.1.1.1.	INOFENSIVOS	2
1.1.1.2.	CONTAMINANTES.....	3
1.1.2.	ANHÍDRIDO SULFUROSO.....	6
1.1.2.1.	ASPECTOS AMBIENTALES	7
1.1.2.2.	ASPECTOS TOXICOLÓGICOS.....	8
1.2.	ABSORCIÓN DE GASES.....	8
1.2.1.	CONCEPTO DE ABSORCIÓN	10
1.2.2.	PROCESO DE ABSORCIÓN	10
1.2.3.	FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE ABSORCIÓN.....	11
1.2.4.	CARACTERÍSTICAS DEL DISOLVENTE.....	12
1.2.5.	SELECCIÓN DEL EQUIPO DE CONTACTO	13
1.2.6.	CUERPOS DE RELLENO	15
1.2.6.1.	CARACTERÍSTICAS DE LOS RELLENOS DE COLUMNAS DE ABSORCIÓN.	17
1.2.7.	CÁLCULO Y DISEÑO DE UNA TORRE DE ABSORCIÓN.....	17
1.2.8.	ABSORCIÓN SIN REACCIÓN QUÍMICA	18
1.2.8.1.	BALANCE DE MATERIA.....	20

Pp:

1.2.8.2.	BALANCE DIFERENCIAL.....	23
1.2.8.3.	ECUACIÓN GENERAL DE CÁLCULO PARA COLUMNAS DE RELLENO. 24	
1.2.8.4.	ABSORCIÓN CON REACCIÓN QUÍMICA.....	25
1.3.	DISEÑO DE LA TORRE DE ABSORCIÓN DE GASES.....	27
1.3.1.	CAUDAL DE GAS A LA ENTRADA, (G):.....	27
1.3.1.1.	ÀREA DE LA TUBERÍA DE ENTRADA.....	27
1.3.1.2.	DENSIDAD DEL AIRE.....	28
1.3.1.3.	CAUDAL DEL GAS (G).....	30
1.3.2.	CONCENTRACIONES DEL GAS EN PORCENTAJE EN PESO.....	30
1.3.3.	COCIENTE MOLAR DEL GAS.....	31
1.3.4.	FLUJO TOTAL DEL LIQUIDO (L).....	32
1.3.5.	RELACIÓN (L/G).	33
1.3.6.	RECTA DE TRABAJO	33
1.3.7.	CONCENTRACIÓN DEL LÍQUIDO A LA SALIDA	34
1.3.8.	y^*x_1	34
1.3.9.	N_{OG}	35
1.3.10.	H_{OG}	35
1.3.11.	COEFICIENTE TOTAL DE TRANSPORTE DE MASA (K_G).	36
1.3.12.	DATOS DE EQUILIBRIO	37

CAPITULO II

2.	PARTE EXPERIMENTAL	38
2.1.	PLAN DE MUESTREO	39
2.2.	DIAGNÓSTICO	40
2.3.	MÉTODOS	40
2.3.1.	INDUCTIVO.....	41
2.3.2.	DEDUCTIVO	41
2.3.3.	EXPERIMENTAL	41
2.4.	TÉCNICAS	42
2.4.1.	TÉCNICA DE CAMPO.....	42
2.5.	DATOS EXPERIMENTALES	45
2.6.	DATOS ADICIONALES.....	47
2.7.	DATOS DE EQUILIBRIO	48

CAPITULO III

3.	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA TORRE DE ABSORCIÓN DE GASES	49
3.1.	GENERALIDADES	49
3.2.	CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO DE LA TORRE DE ABSORCIÓN..	49
3.3.	BALANCE DE MATERIA	51
3.4.	CÁLCULOS.....	52

Pp:

3.4.1.	CÁLCULO DEL CAUDAL DE GAS A LA ENTRADA, $G = G_1$	52
3.4.1.1.	CÁLCULO DEL ÁREA.....	52
3.4.1.2.	CÁLCULO DE LA DENSIDAD DEL AIRE	53
3.4.1.3.	CÁLCULO DE G	53
3.4.2.	CÁLCULO DE LAS CONCENTRACIONES DEL GAS EN PORCENTAJE EN PESO.....	54
3.4.3.	CÁLCULO DE LOS COCIENTES MOLARES DEL GAS	54
3.4.4.	CÁLCULO DE FLUJO TOTAL DEL LIQUIDO (L).....	55
3.4.5.	CÁLCULO DE LA RELACIÓN (L/G).....	55
3.4.6.	CÁLCULO DE LA RECTA DE TRABAJO.....	56
3.4.7.	CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN DEL LÍQUIDO A LA SALIDA.....	56
3.4.8.	CÁLCULO DE y^*x_1	57
3.4.9.	CÁLCULO DEL N_{OG}	57
3.4.10.	CÁLCULO DEL H_{OG}	58
3.4.11.	CÁLCULO DEL COEFICIENTE TOTAL DE TRANSPORTE DE MASA (K_G).....	58
3.4.12.	CALCULO DE LOS DATOS DE EQUILIBRIO	59
3.4.12.1.	CALCULO DE LA FRACCIÓN MOLAR (x)	59
3.4.12.2.	CALCULO DE LA FRACCIÓN MOLAR (y)	59
3.5.	RESULTADOS	60
3.6.	PROPUESTA DE DISEÑO.....	64

Pp:

3.6.1.	DISEÑO DE LA TORRE DE ABSORCIÓN	65
3.7.	CONSTRUCCIÓN DE LA TORRE.....	66
3.8.	ANÁLISIS DE COSTOS.....	68
3.8.1.	COSTOS DE INVERSIÓN.....	68
3.8.2.	COSTOS DE OPERACIÓN	69
3.8.3.	COSTO TOTAL.....	69
3.8.4.	DEPRECIACIÓN DEL EQUIPO	70
3.9.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	71

CAPITULO IV

4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	73
4.1.	CONCLUSIONES	73
4.2.	RECOMENDACIONES	74

BIBLIOGRAFÍA	76
--------------------	----

ANEXOS	79
--------------	----

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA:	Pp:
2.1-1. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS STÁNDAR METHODS *2310 A y B.....	39
2.4.1-1. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN.....	43
2.4.1-2. DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO pH STANDARD METHODS* 4500-HB	44
2.5-1. DATOS EXPERIMENTALES DE LA COLUMNA DE ABSORCIÓN	45
2.5-2. DATOS EXPERIMENTALES PARA FIJAR LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA TORRE.....	46
2.5-3. DATOS EXPERIMENTALES PARA FIJAR LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA TORRE.....	46
2.5-4. DATOS OBTENIDOS DE LOS ANÁLISIS	47
2.6-1. DATOS ADICIONALES.....	47
2.7-1. DATOS DE EQUILIBRIO.....	48
3.2-1. DIÁMETROS DE COLUMNA RECOMENDADOS	50

TABLA:

Pp:

3.5-1. FRACCIONES MOLARES OBTENIDAS	60
3.5-2. RESULTADOS	61
3.5-3. RESULTADOS	62
3.5-4. RESULTADOS	63
3.6-1. DIMENSIONAMIENTO DE LA TORRE	64
3.8.1-1. COSTOS DE INVERSIÓN.....	68
3.8.2-1. COSTOS DE OPERACIÓN.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS Y GRÁFICOS

FIGURA:	Pp:
1.1.1.2-1. TIPOS DE GASES PRODUCIDOS EN LA COMBUSTIÓN	5
1.2-1. TORRE DE ABSORCIÓN.....	9
1.2.6-1. ESTRUCTURA DE UNA COLUMNA DE RELLENO Y TIPOS DE RELLENO 16	
1.2.8.1-1. BALANCE DE MATERIA.....	20
1.2.8.2-1. BALANCE DIFERENCIAL	23
3.3-1. BALANCE DE MATERIA.....	51

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO	Pp:
I. DIAGRAMA $y= f(x)$	79
II. DIAGRAMA DE FACTOR DE COMPRESIBILIDAD VS. PRESIÓN REDUCIDA.....	80
III. DIAGRAMA $KG= f (L/G)$	81
IV. DIMENSIONES DE LA COLUMNA	82
V. DISTRIBUIDOR DE AGUA	83
VI. CÁMARA DE COMBUSTIÓN	84
VII. SOPORTE Y EMPAQUES	85
VIII. CÁMARA DE COMBUSTIÓN Y COMPRESOR	86
IX. TORRE DE ABSORCIÓN	87
X. TORRE CONSTRUIDA.....	88
XI. MEDIDOR DE GAS “TESTO”	89

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es Diseñar y Construir una Torre de Absorción de SO₂ en Gases de Combustión para la purificación de una corriente gaseosa, para el Laboratorio de Química Industrial, Facultad de Ciencias, de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

El dimensionamiento del equipo se realizó a través de cálculos de ingeniería a partir de datos experimentales y variables de proceso obtenidas en ensayos de laboratorio. El equipo está construido de perfil estructural cilíndrico de acero inoxidable AISI 304, con una cámara de combustión, rellenos de vidrio como superficie de contacto, compresor de 1 HP, bomba de 0,5 HP y tuberías, utilizando electricidad como fuente de energía.

Tiene características como: una combustión de 18 g de azufre que da una concentración de gas de entrada de 155 ppm con una velocidad de 2,6 m/s que pasa a través de un conjunto de empaques de 2 x 4 cm dentro de la columna, teniendo contacto con un flujo de agua a contracorriente, obteniendo líquido residual acidificado en el fondo de la torre de pH = 2.

La absorción del gas contaminante se trató en 6 min con una temperatura de 25 C, teniendo una concentración a la salida de 0,6 ppm, obteniéndose una buena transferencia de masa de 10,43 Kg/h.m² que es corroborada con una eficiencia del 99,6% del equipo que servirá para la realización de prácticas de los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Química.

Descriptor: Absorción / Absorción de gases / Anhídrido Sulfuroso / Eliminación de SO₂/ Contaminación /

SUMMARY

The objective of this research is to Design and Build a Tower of Absorption of SO₂ in Flue Gas for purifying a gas stream to the Laboratory of Industrial Chemistry, Faculty of Sciences, of the Polytechnic School of Chimborazo.

The dimensioning of the equipment was conducted through calculations of Engineering from experimental and variable data from process obtained in laboratory testing. The team is built of structural profile cylindrical stainless steel AISI 304, with a combustion chamber, filled with glass as a contact surface, compressor of 1 HP, pump of 0,5 HP and pipes, using electricity as an energy source.

It has features such as: a combustion of 18 g of sulfur that gives a concentration of gas input of 155 ppm with a speed of 2, 6 m/s that passes through a set of packages of 2 x 4 cm inside the column, taking contact with a flow of water upstream, getting residual liquid acidified at the bottom of the tower pH = 2.

The absorption of the pollutant gas is treatment in 6 min with a temperature of 25 C, taking a concentration at the exit of 0, 6 ppm, obtaining a good mass transfer of 10, 43 Kg/h.m² which is corroborated with an efficiency of 99, 6% of the equipment that will be used for the practical work of students of the School of Chemical Engineering.

Describers: Absorption / Absorption of gases / Sulfur dioxide / Elimination of SO₂. / Contamination /

INTRODUCCIÓN

La contaminación al ambiente día a día va en incremento, debido especialmente al crecimiento acelerado del parque automotor y el sector industrial, que es una de las principales causas para que se produzca este fenómeno en nuestro país y el mundo. La información teórica sobre los fundamentos de ABSORCIÓN es muy abundante, pero la falta de información técnica necesaria para el dimensionamiento de equipos que permitan evitar o al menos disminuir la concentración de los gases nocivos emanados al ambiente, ha despertado el interés de realizar este estudio, que al dar una solución viable a un inconveniente en particular, contribuya a solucionar un problema global como son los impactos ambientales generados al entorno por emisiones gaseosas.

El objetivo de este trabajo es analizar, estudiar y proponer una alternativa de control de las emanaciones nocivas, incluidas en los gases de combustión fija y móvil, producto de la combustión de combustibles. El objetivo específico es evaluar el *Coefficiente de transporte de masa*, en éste proceso de Absorción, dato útil para el dimensionamiento que permitió reducir la concentración de SO_2 de los gases de chimenea, bajo determinadas condiciones de operación.

El caudal de agua y la concentración del gas a la entrada de la torre de absorción fueron variables útiles para la generación de datos experimentales que sirvieron para el cálculo del coeficiente total de transporte de masa, el cual, relacionado con la razón (L/G) permitió analizar el fenómeno en condiciones específicas.

Para conseguir la mejor eficiencia del equipo se basó en la máxima superficie de contacto entre el gas residual y el líquido eliminador, además los materiales de construcción de este equipo son resistentes a la corrosión debido al carácter ácido de los contaminantes. Hay una amplia gama de equipos que se han diseñado con este fin, entre los que se encuentran las columnas de platos, las columnas de relleno, las cajas de aspersion, los separadores de Venturi, etc.

La investigación dirigida al Diseño y Construcción de una Torre de Absorción de Gases para el Laboratorio de Operaciones Unitarias, permitiendo desarrollar prácticas y estudios de transferencia de masa.

De acuerdo a los cálculos de Ingeniería y dimensionamiento del equipo la opción más idónea, fue una torre de empaques que utiliza electricidad como fuente de energía para la bomba de 0,5 HP y un compresor de 1 HP.

En el presente trabajo investigativo se determinó las condiciones adecuadas de operación del equipo, donde su eficiencia es de 99,6 % teniendo así una transferencia de masa, la cual, se encuentra dentro de los rangos deseados de (4,23 a 10,43) Kg/h m².

ANTECEDENTES

La absorción es una técnica tan antigua como la compresión. En 1860 Ferdinand Carré construyó la primera máquina de absorción. Desde entonces la absorción se ha venido empleando con éxito diverso y distinto grado de utilización según las tendencias de cada país.

Los críticos equilibrios termodinámicos que precisa la absorción para su funcionamiento así como los bajos rendimientos obtenidos, habían dificultado la práctica. Sin embargo, la tecnología, tanto en diseño como en los materiales y elementos de control, ha evolucionado de tal forma que en la actualidad se dispone de una extensa gama de equipos con una gran fiabilidad y unos rendimientos energéticos superiores a sus antecesores.

En países tales como Japón y EEUU en los que se han producido la mayoría de diseños de las máquinas de absorción existen ya miles de unidades instaladas para usos de climatización en aplicaciones tanto domésticas como en grandes edificios de oficinas, comerciales, hoteles, hospitales, etc. En el Ecuador, la absorción ha sido utilizada principalmente en procesos industriales, en los cuales, existían calores residuales al mismo tiempo que se necesitaba como refrigeración.

Hoy en día en la Escuela de Ingeniería Química, no existe un equipo en buenas condiciones que permita un trabajo técnico – práctico en el laboratorio de Operaciones Unitarias relacionado a la absorción de gases, además que pueda ser aprovechado para los fines didácticos respectivos.

JUSTIFICACIÓN

La absorción de gases es una de las Operaciones Unitarias más relevantes, en la actualidad considerada como la alternativa más ecológica por las industrias, conlleva una baja utilización de recursos energéticos. Por este motivo esta operación es de continuo interés en esta investigación, tanto en el empleo de métodos de absorción con una mayor eficacia, como en sistemas que supongan una reducción en el consumo energético, costos y una notable reducción en la contaminación al ambiente.

La necesidad de que la Facultad de Ciencias y en especial la Escuela de Ingeniería Química cuente con laboratorios debidamente equipados, y además que el rol actual de las Universidades no sólo hace énfasis en la formación científica-técnica que el estudiante pueda recibir, sino que el real compromiso se orienta a la formación de estudiantes emprendedores; es motivo más que suficiente, para que como futuros profesionales de la Ingeniería Química se contribuya al desarrollo de la misma mediante el diseño y construcción de una Torre de Absorción, que permite adaptar la fundamentación teórica a la aplicación práctica, complementando el aprendizaje; buscando poder brindar a la sociedad profesionales de alta competitividad y que respondan a los requerimientos de la corriente de globalización.

Esta investigación propone una alternativa de control a fin de dar una posible solución para la disminución de la concentración de los gases nocivos emanados al ambiente, a través de la implementación del proyecto de diseño, selección y aplicación de todas las herramientas y componentes necesarios para la consecución del objetivo deseado donde se abordó los principios y aplicaciones de métodos de absorción que se emplean a nivel industrial.

El diseño y construcción de equipos, en la actualidad representa una posibilidad certera en el campo ocupacional y ejercicio profesional para generar posibilidades de desarrollo y bienestar en la Comunidad y/o Sociedad.

OBJETIVOS

GENERAL

- Realizar el Diseño y Construcción de una torre de absorción para el análisis de SO_2 en Gases de Combustión.

ESPECÍFICOS

- Determinar las diferentes variables del proceso de absorción.
- Efectuar los cálculos de ingeniería para el diseño de una torre de absorción y su respectivo dimensionamiento.
- Conseguir el máximo de transferencia de componentes con el mínimo consumo de energía y de tamaño de columna (mínimo coste).
- Ejecutar el ensamblaje y armado del equipo.
- Verificar el funcionamiento del equipo.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

1. MARCO TEÓRICO

1.1. GASES DE COMBUSTIÓN

“Los gases emitidos por un motor de combustión interna de gasolina son, principalmente, de dos tipos: inofensivos y contaminantes. Los primeros están formados, fundamentalmente, por Nitrógeno, Oxígeno, Dióxido de Carbono, vapor de agua e Hidrógeno. Los segundos o contaminantes están formados, fundamentalmente, por el Monóxido de Carbono, Hidrocarburos, Óxidos de Nitrógeno y Plomo.

La reacción de combustión se basa en la reacción química exotérmica de una sustancia o mezcla de sustancias llamada *combustible* con el oxígeno. Es característica de esta reacción la formación de una llama, que es la masa gaseosa incandescente que emite luz y calor, que está en contacto con la sustancia combustible. La reacción de combustión puede llevarse a cabo directamente con el oxígeno o bien con una mezcla de sustancias que contengan oxígeno, llamada *comburente*, siendo el aire atmosférico el comburente más habitual.

La reacción del combustible con el oxígeno origina sustancias gaseosas entre las cuales las más comunes son CO_2 y H_2O . Se denominan en forma genérica productos, humos o gases de combustión. Es importante destacar que el combustible solo reacciona con el oxígeno y no con el nitrógeno, el otro componente del aire. Por lo tanto el nitrógeno del aire pasará íntegramente a los productos de combustión sin reaccionar.

Entre las sustancias más comunes que se pueden encontrar en los productos o humos de la reacción se encuentran:

- CO_2
- H_2O como vapor de agua
- N_2
- O_2
- CO
- H_2
- Carbono en forma de hollín
- SO_2 ". (1)

1.1.1. TIPOS DE GASES DE COMBUSTIÓN

1.1.1.1. INOFENSIVOS

- **El Nitrógeno.-** es un gas inerte que se encuentra presente en el aire que respiramos en una concentración del 79%. Debido a las altas temperaturas existentes en el motor, el Nitrógeno se oxida formando pequeñas cantidades de Óxidos de Nitrógeno, aunque sea un gas inerte a temperatura ambiente.
- **El Oxígeno.-** es uno de los elementos indispensables para la combustión y se encuentra presente en el aire en una concentración del 21%. Si su mezcla es demasiado rica o demasiado pobre, el Oxígeno no podrá oxidar todos los enlaces de Hidrocarburos y será expulsado con el resto de los gases de escape.

- **El vapor de agua.-** se produce como consecuencia de la combustión, mediante la oxidación del Hidrógeno, y se libera junto con los gases de escape.
- **El Dióxido de Carbono.-** producido por la combustión completa del Carbono no resulta nocivo para los seres vivos y constituye una fuente de alimentación para las plantas verdes, gracias a la fotosíntesis. Se produce como consecuencia lógica de la combustión, es decir, cuanto mayor es su concentración, mejor es la combustión. Sin embargo, un incremento desmesurado de la concentración de Dióxido de Carbono en la atmósfera puede producir variaciones climáticas a gran escala (el llamado efecto invernadero).

1.1.1.2. CONTAMINANTES

- **El Monóxido de Carbono.-** en concentraciones altas y tiempos largos de exposición puede provocar en la sangre la transformación irreversible de la Hemoglobina, molécula encargada de transportar el oxígeno desde los pulmones a las células del organismo, en Carboxihemoglobina, incapaz de cumplir esa función. Por eso, concentraciones superiores de CO al 0,3 % en volumen resultan mortales.

La falta de oxígeno en la combustión hace que ésta no se produzca completamente y se forme Monóxido de Carbono en lugar de Dióxido de Carbono. En un vehículo, la aparición de mayores concentraciones en el escape de CO indica la existencia de una mezcla inicial rica o falta de oxígeno.

- **Los Hidrocarburos.-** dependiendo de su estructura molecular, presentan diferentes efectos nocivos. El Benceno, por ejemplo, es venenoso por sí mismo, y la exposición a este gas provoca irritaciones de piel, ojos y conductos respiratorios; si el nivel es muy alto, provocará depresiones, mareos, dolores de cabeza y náuseas. El Benceno es uno de los múltiples causantes de cáncer. Su presencia se debe a los componentes incombustibles de la mezcla o a las reacciones intermedias del proceso de combustión, las cuales son también responsables de la producción de Aldehídos y Fenoles.

La presencia simultánea de Hidrocarburos, Óxidos de Nitrógeno, rayos ultravioleta y la estratificación atmosférica conduce a la formación del smog fotoquímico, de consecuencias muy graves para la salud de los seres vivos.

- **Los Óxidos de Nitrógeno.-** no sólo irritan la mucosa, sino que en combinación con los Hidrocarburos contenidos en el smog y con la humedad del aire producen Ácidos Nitrosos, que posteriormente caen sobre la tierra en forma de lluvia ácida y contaminan grandes áreas, algunas veces situadas a cientos de kilómetros del lugar de origen de la contaminación.
- **El Plomo.-** es el metal más peligroso contenido en los aditivos del combustible. Inhalado puede provocar la formación de coágulos o trombos en la sangre, de gravísimas consecuencias patológicas. Se encuentra presente en las gasolinas en forma de Tetra-etilo de Plomo y se utiliza en su producción para elevar su índice de octano y, también, en motorizaciones antiguas como lubricante de los asientos de

válvulas. En las gasolinas sin Plomo se ha sustituido este metal por otros componentes menos contaminantes que también proporcionan un alto índice de octano.

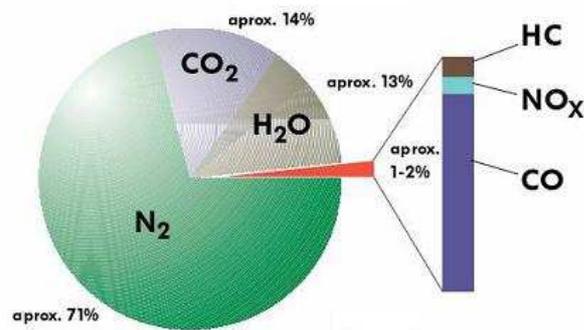


Fig. 1.1.1.2-1. Tipos de gases producidos en la combustión

De acuerdo a como se produzcan las reacciones de combustión, estas pueden ser de distintos tipos:

✓ **Combustión completa**

Ocurre cuando las sustancias combustibles reaccionan hasta el máximo grado posible de oxidación. En este caso no habrá presencia de sustancias combustibles en los productos o humos de la reacción.

✓ **Combustión incompleta**

Se produce cuando no se alcanza el grado máximo de oxidación y hay presencia de sustancias combustibles en los gases o humos de la reacción.

✓ **Combustión estequiométrica o teórica**

Es la combustión que se lleva a cabo con la cantidad mínima de aire para que no existan sustancias combustibles en los gases de reacción. En este tipo de combustión no hay presencia de oxígeno en los humos, debido a que este se ha empleado íntegramente en la reacción.

✓ **Combustión con exceso de aire**

Es la reacción que se produce con una cantidad de aire superior al mínimo necesario. Cuando se utiliza un exceso de aire, la combustión tiende a no producir sustancias combustibles en los gases de reacción. En este tipo de combustión es típica la presencia de oxígeno en los gases de combustión. La razón por la cual se utiliza normalmente un exceso de aire es hacer reaccionar completamente el combustible disponible en el proceso.

✓ **Combustión con defecto de aire**

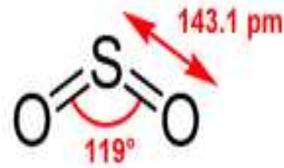
Es la reacción que se produce con una menor cantidad de aire que el mínimo necesario. En este tipo de reacción es característica la presencia de sustancias combustibles en los gases o humos de reacción.

1.1.2. ANHÍDRIDO SULFUROSO

“El óxido de azufre (IV) también llamado dióxido de azufre, gas sulfuroso y anhídrido sulfuroso, cuya fórmula es SO_2 , es un gas incoloro con un característico olor asfixiante. Se trata de una sustancia reductora que, con el tiempo y en contacto con el aire y la humedad,

se convierte en óxido de azufre (VI). La velocidad de esta reacción en condiciones normales es baja. En agua se disuelve formando una disolución ácida.

Puede ser concebido como el anhídrido de un hipotético ácido sulfuroso H_2SO_3 . Esto en analogía a lo que pasa con el ácido carbónico es inestable en disoluciones ácidas pero forma sales, los sulfitos y hidrogenosulfitos. El óxido de azufre (IV) tiene propiedades desinfectantes. Por esto fue utilizado durante siglos en la desinfección por ejemplo de las cubas de vino quemando azufre en su interior.” (2)



Rx. 1.1.2-1

1.1.2.1. ASPECTOS AMBIENTALES

El óxido de azufre (IV) es el principal causante de la lluvia ácida ya que en la atmósfera es transformado en ácido sulfúrico. Es liberado en muchos procesos de combustión ya que los combustibles como el carbón, el petróleo, el diesel o el gas natural contienen ciertas cantidades de compuestos azufrados. Por estas razones se intenta eliminar estos compuestos antes de su combustión por ejemplo mediante la hidrosulfuración en los derivados del petróleo o con lavados del gas natural haciéndolo más "dulce".

1.1.2.2. ASPECTOS TOXICOLÓGICOS

El óxido de azufre (IV) es un gas irritante y tóxico. Afecta sobre todo las mucosidades y los pulmones provocando ataques de tos. Si bien éste es absorbido principalmente por el sistema nasal, la exposición de altas concentraciones por cortos períodos de tiempo puede irritar el tracto respiratorio, causar bronquitis y congestionar los conductos bronquiales de los asmáticos. La concentración máxima permitida en los lugares de trabajo es de 2 ppm.

- El valor IDLH (Peligroso Para la Vida)
- Valor letal 100 ppm (262 mg/m³)
- Umbral de olor 0,5 ppm (1 mg/m³) (es detectado por el olfato humano)

1.2. ABSORCIÓN DE GASES

Es una operación unitaria ampliamente utilizada en la industria química para la purificación de corrientes gaseosas. En la absorción, uno o varios de los gases presentes en una corriente gaseosa se disuelven en un líquido llamado absorbente. En la operación inversa, un gas disuelto en un líquido se remueve de éste poniendo la corriente en contacto con un gas inerte. Esta operación se llama desorción.

Los equipos más empleados son torres cilíndricas, que pueden ser:

- De relleno o empacadas
- De etapas

Las torres de relleno son columnas cilíndricas verticales, las cuales están rellenas con pequeñas piezas llamadas empaque. Estas piezas sirven para aumentar el área de contacto entre la fase gaseosa y la líquida, lo cual facilita la absorción.

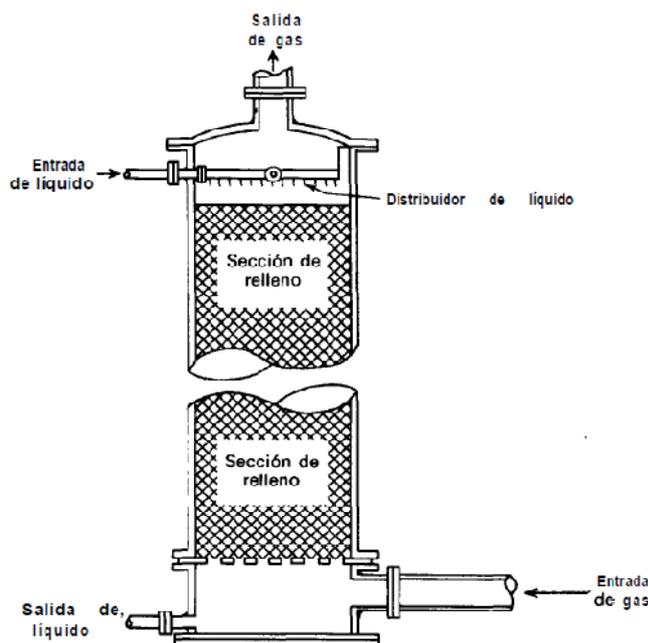


Fig. 1.2-1. Torre de Absorción

Las torres de etapas son columnas cilíndricas que contienen en su interior una serie de platos perforados o con campanas de burbujeo que permiten el contacto íntimo de las fases líquida y gaseosa. Los residuos que se generan en esta operación unitaria, son lodos que se sedimentan en el fondo de las torres al paso del tiempo, al igual que líquidos con componentes absorbidos (Ver fig. 1.2-1).

La absorción es una operación de separación que consiste en la transferencia de uno o más componentes minoritarios de una corriente gaseosa a una corriente líquida, llamada disolvente. El objetivo de esta operación suele ser purificar una corriente gaseosa para su

procesamiento posterior o su emisión a la atmósfera, o bien, recuperar un componente valioso presente en la corriente gaseosa.

La absorción del SO₂ presente en los gases de combustión mediante soluciones alcalinas y la absorción de CO y CO₂ del gas de síntesis de amoníaco son ejemplos de purificación, mientras que la absorción de óxidos de nitrógeno en agua es la etapa final del proceso de fabricación de ácido nítrico. La operación inversa se denomina desorción o "stripping" y su finalidad es eliminar o recuperar uno o varios componentes minoritarios de una corriente líquida por transferencia a una corriente gaseosa.

1.2.1. CONCEPTO DE ABSORCIÓN

“La absorción de gases es una operación básica que estudia la separación de uno o varios componentes de una mezcla gaseosa por disolución de un líquido. Por tanto en esta operación se efectúa el transporte de materia del componente a componentes de la fase gaseosa solubles en el líquido absorbente, desde la fase gaseosa a la líquida.” (3)

1.2.2. PROCESO DE ABSORCIÓN

“La absorción aplicada a los procesos de purificación de gases puede clasificarse dependiendo de la interacción entre los componentes del gas y el absorbente:

- a. Absorción física:* En este proceso el componente a eliminar de la corriente de gas es más soluble en el líquido que los demás componentes, pero no hay reacción química con el absorbente. La concentración en la fase líquida depende de la presión parcial del componente en la fase gaseosa.

Un ejemplo es la absorción de sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono en el dimetil éter de polietilenglicol (proceso Selexol).

b. Absorción con reacción reversible: Este tipo de absorción implica una reacción química entre el componente gaseoso que se absorbe y un componente de la fase líquida. Un ejemplo es la absorción de CO₂ con aminas. Con un aumento de temperatura se puede desorber el componente que pertenecía a la fase gas. Presenta una curva de equilibrio no lineal y la velocidad de reacción afecta al coeficiente de absorción.

c. Absorción con reacción irreversible: El producto de reacción que se forma no se descompone para regenerar el absorbente. Un ejemplo es la absorción de sulfuro de hidrógeno en una solución de quelato de hierro para formar partículas de azufre elemental.” (4)

1.2.3. FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE ABSORCIÓN

“Los parámetros más importantes en el diseño de estos equipos son:

- ✓ **La razón líquido/gas:** Cuanto menor sea este número menor cantidad de líquido lavador necesitamos y por tanto menor gasto y menor dimensionado de las instalaciones
- ✓ **pH:** Dependiendo del sistema empleado, el pH se debe de mantener dentro de unos límites para asegurar una alta solubilidad del SO₂ y la no formación de costras.

- ✓ **Velocidad del gas:** Para minimizar los costes los lavadores se diseñan a la máxima velocidad del gas posible, minimizando el tamaño de la vasija.
- ✓ **Tiempo de residencia:** El gas debe permanecer dentro de la vasija el tiempo suficiente para que la mayor cantidad posible de SO₂ sea absorbida.” (5)

1.2.4. CARACTERÍSTICAS DEL DISOLVENTE

“Si el propósito principal de absorción es producir una solución específica (como ocurre por ej. En la fabricación de ácido clorhídrico), el disolvente es especificado por la naturaleza del producto. Si el propósito principal es eliminar algún componente del gas casi siempre existe la posibilidad de elección. Por supuesto, el agua es el disolvente más barato y más completo pero debe darse considerable importancia a las siguientes propiedades.

- ✓ **Solubilidad del gas:** La solubilidad del gas debe ser elevada, a fin de aumentar la rapidez de la absorción y disminuye la cantidad requerida del disolvente.
- ✓ **Volatilidad:** El disolvente debe tener una presión baja de vapor puesto que el gas saliente de una operación de absorción generalmente está saturado con el disolvente y en consecuencia, puede perderse una gran cantidad.
- ✓ **Corrosión:** Los materiales de construcción que se necesitan para el equipo no deben ser raros o costosos.
- ✓ **Costos:** El disolvente debe ser barato, de forma que las pérdidas no sean costosas y deben obtenerse fácilmente.

- ✓ **Viscosidad:** Se prefiere la viscosidad baja debido a la rapidez en la absorción, mejores características en la inundación de las torres de absorción, bajas caídas de presión en el bombeo y buenas características de transferencia de calor.
- ✓ **Misceláneos:** Si es posible, el disolvente no debe ser tóxico ni inflamable, debe ser estable químicamente y tener un punto bajo de congelamiento.” (6)

1.2.5. SELECCIÓN DEL EQUIPO DE CONTACTO

La elección del tipo de contacto para la columna de absorción es un parámetro fundamental en el proceso. La función principal de este equipo es crear una elevada interface líquido-gas para mejorar el proceso de transferencia de materia. Normalmente se emplean los siguientes mecanismos:

- Dividir el gas en pequeñas burbujas que pasan por una fase de líquido continua (torres de platos).
- Difusión del líquido en películas delgadas a través de un flujo continuo de fase gaseosa (columnas de relleno).
- Dividir el líquido en pequeñas gotas que se difunden en una fase de gas continuo (cámaras de aspersión).

a. Torres de plato:

Las torres de plato se usan para grandes instalaciones de intercambio gas-líquido, para fluido limpio, no corrosivo, que no forme espumas y para flujos medio-bajos de líquido.

Son aplicables también cuando se requiere refrigeración interna, pueden colocarse serpentines de refrigeración o enfriamiento con entrada y salida de líquido del plato. Normalmente se usan platos perforados por su simplicidad y bajo costo. Los platos de campana (bubblecap) se usan para un flujo de líquido muy bajo pero pueden ser sustituidos por torres de relleno estructurado.

En estas torres el líquido fluye horizontalmente por los platos y el gas fluye en sentido vertical a través de las aperturas de la bandeja. El líquido pasa de bandeja en bandeja a través de un bajante que ocupa aproximadamente del 5 al 20% de la bandeja.

b. Torres de relleno:

Las torres de relleno están ganando cada vez más aplicaciones por el desarrollo tecnológico de nuevos rellenos donde se produce el contacto, esto hace que el proceso alcance un rendimiento superior. Son muy recomendadas para procesos con baja pérdida de carga, líquidos que formen espumas, pequeños diámetro de columna, altos caudales de líquido, fluidos corrosivos y para fluidos viscosos.

c. Cámaras de aspersion:

Estos tienen aplicación cuando la caída de presión es un factor limitante y cuando hay partículas sólidas presentes en el gas. Su eficiencia no se aproxima mucho a la de una etapa ideal de equilibrio. El absorbente se distribuye en la cámara de gas como un aerosol, el absorbente también es recuperado para su regeneración y reciclo.

1.2.6. CUERPOS DE RELLENO

Algunos rellenos se distribuyen al azar dentro de la torre, mientras que otros se colocan ordenadamente.

- a. **Rellenos al azar:** Están generalmente formados por piezas cuya dimensión mayor está comprendida entre 5 y 50 mm y se utilizan mucho en las torres pequeñas. Este tipo de relleno es bastante económico y suelen ser de materiales resistentes a la corrosión (metálicos, cerámicos o de plástico).
- b. **Rellenos colocados ordenadamente:** Están formados por piezas de 20 mm y se utilizan solamente en torres grandes.

Los rellenos más empleados eran los anillos Raschig y las sillas o monturas Berl, pero ahora han sido reemplazados por otros más eficientes como los anillos Pall, las monturas Intalox y los anillos Bialecki. Pero también existen rellenos estructurados (usados para procesos que requieren alta transferencia de masa y baja pérdida de carga).

El relleno puede ser de diferentes materiales: metal, cerámica, plástico. Los más importantes son los anillos Raschig (acero inoxidable), las monturas Berl (cerámico) y anillos de plástico. En comparación con las torres de platos, las columnas de relleno necesitan instalaciones más pequeñas, pueden trabajar con fluidos espumantes o corrosivos, permiten un ratio líquido/gas y la pérdida de carga es menor.

La relación entre el diámetro de la columna y el diámetro del relleno tiene que ser al menos de 15:1. La altura máxima para un relleno de plástico es de 3-4 metros y para un relleno metálico 6-7 metros.

Los distribuidores de líquido a lo largo de la columna son necesarios. Esta es la clave para el buen funcionamiento del proceso, la distribución de gas y líquido dentro del relleno.

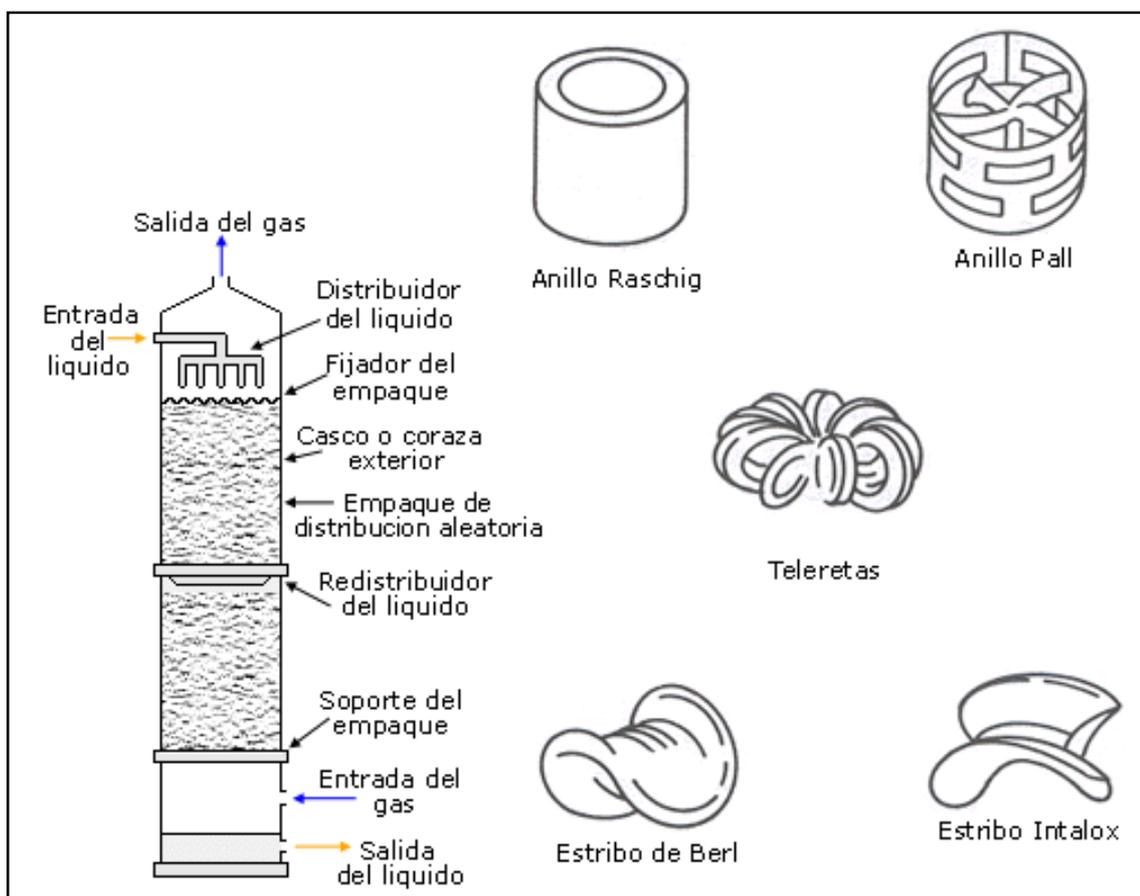


Fig. 1.2.6-1. Estructura de una columna de relleno y tipos de relleno

1.2.6.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS RELLENOS DE COLUMNAS DE ABSORCIÓN.

- ♣ “Químicamente inerte frente a los fluidos de la torre.
- ♣ Resistente mecánicamente sin tener un peso excesivo.
- ♣ Tener pasos adecuados para ambas corrientes sin excesiva retención de líquido o caída de presión.
- ♣ Proporcionar un buen contacto entre el líquido y el gas.
- ♣ Coste razonable” (7)

1.2.7. CÁLCULO Y DISEÑO DE UNA TORRE DE ABSORCIÓN

“Para diseñar una columna de absorción de gases es necesario realizar los cálculos fundamentándose en el flujo bifásico, es decir de líquido que regresa a la masa y el gas que se evapora de esta manera tendremos caídas de presión debido a que existe una modificación de las características del relleno.

Los tres pasos incluidos en el diseño en una torre de absorción o separación son:

- ✓ Los datos de las relaciones del equilibrio vapor-líquido del sistema se utilizan para determinar.
 - a.) La cantidad de líquido necesario para absorber la cantidad requerida de los componentes solubles del gas.
 - b.) La cantidad de gas necesaria para separar la cantidad requerida de los componentes volátiles de un líquido.

- ✓ Los datos sobre la capacidad de manejo de vapor y líquido del equipo considerado se utiliza para determinar el área de la sección transversal requerida y el diámetro del equipo a través del cual van a fluir las corrientes de gas y líquido. La consideración de los factores económicos incluidos muestra que es deseable fijar las velocidades de los fluidos muy por debajo de los valores máximos que se pueden utilizar.
- ✓ Los datos de equilibrio y balances de materia se utilizan para determinar el número de etapas de equilibrio (platos teóricos o unidades de transferencia) requeridas para la separación deseada. La dificultad de separación depende del nivel de recuperación que sea más deseable económicamente”. (8)

1.2.8. ABSORCIÓN SIN REACCIÓN QUÍMICA

“La absorción de gases es una operación en la cual una mezcla gaseosa se pone en contacto con un líquido, a fin de disolver de manera selectiva uno o más componentes del gas y de obtener una solución de estos en el líquido.

La cantidad de gas que se disuelve en un solvente depende de las propiedades del gas y del solvente, de la presión del gas sobre la solución (presión parcial del gas), de la temperatura del sistema, de la turbulencia, de la velocidad de flujo y del tipo de empaque usado en la columna.

Cualquier solución de un gas en un líquido ejerce una presión parcial definida a temperatura y concentración específicas. Cuando más baja es la presión parcial del gas disuelto en una solución de una concentración dada, más soluble es en consecuencia.

La solubilidad de un gas en un medio absorbente se puede calcular mediante la ley de Henry.

$$p = H * c_{Ec}. [1.2.8-1]$$

En la que:

p = presión parcial del gas disuelto

c = concentración del gas disuelto

H = constante o coeficiente de la ley de Henry

La ley de Henry es exacta cuando las curvas de solubilidad forman una línea recta, esto resulta en gases que no cambian su fórmula molecular al disolverse en agua. Los gases que se disocian o combinan en el agua y son más solubles, tienden a desviarse de la ley de Henry.

Al aumentar la concentración del soluto, la presión parcial del vapor de esta sustancia también aumenta hasta llegar al punto de equilibrio. Este será el punto en que la presión parcial del soluto en la fase gaseosa es igual a su presión parcial ejercida por la fase líquida y es la solución más concentrada que se puede llegar a producir en cualquier proceso de absorción.

La influencia de la temperatura sobre la solubilidad viene dada por la ley de VantHoff del equilibrio móvil, según la cual, Al elevarse la temperatura del sistema en equilibrio se verifica el proceso que va acompañado de absorción de calor. Como al disolverse un gas en un líquido suele haber desprendimiento de calor, la solubilidad del gas disminuye al

elevarse la temperatura. La solubilidad de un gas difiere de solvente a solvente. Los solventes que son químicamente similares al soluto, generalmente permiten una buena solubilidad.

Otras características que deben ser consideradas en un solvente son: baja viscosidad, bajo punto de congelación, no tóxico ni inflamable y químicamente estable, relativamente barato, fácil de obtener y no corrosivo con el fin de reducir costos de mantenimiento y reparación del equipo.

1.2.8.1. BALANCE DE MATERIA.

El método más eficiente de contacto gas – líquido es el de flujo en contracorriente. En la figura 1.2.8.1-1 se muestra un esquema de una torre con flujo en contracorriente.

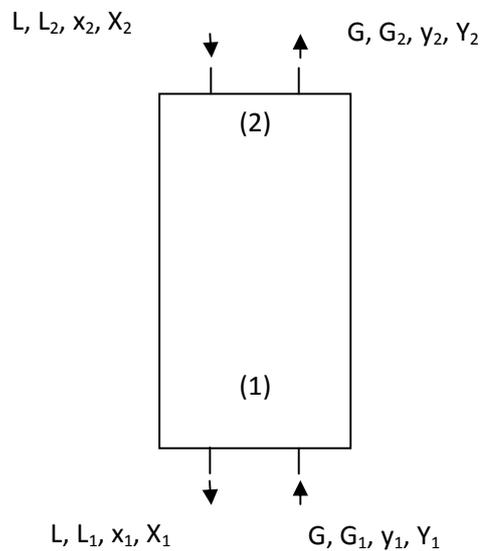


Fig. 1.2.8.1-1. Balance de Materia

Dónde:

L = líquido puro expresado como flujo másico

G = gas inerte

L₁ = líquido más soluto a la salida

L₂ = líquido más soluto a la entrada

G₁ = gas inerte más gas soluto a la entrada

G₂ = gas inerte más gas soluto a la salida

x₁ y x₂ = fracción molar del gas en la fase líquida a la salida y a la entrada

y₁ y y₂ = fracción molar del soluto en la fase gaseosa a la entrada y salida

X₁ y X₂ = cocientes molares del gas en la fase líquida

Y₁ y Y₂ = cocientes molares del soluto en la fase gas

Siendo:

$$X_i = \frac{x_i}{1 - x_i} \text{ Ec. [1.2.8.1-1]}$$

$$X_i = \frac{y_i}{1 - y_i} \text{ Ec. [1.2.8.1-2]}$$

La corriente gaseosa consta de G_i moles totales por tiempo y por área de sección transversal de la torre; está formado por el soluto A que se difunde y de un gas que no se difunde básicamente insoluble.

La relación entre ambas es:

$$G = G_i(1 - y_i) = \frac{G_i}{1 + y_i} \text{ Ec. [1.2.8.1-3]}$$

Dónde:

i = punto cualquiera de la torre

De igual forma, la corriente de líquido consta de L_i moles totales/tiempo*área, que contienen x fracción mol de un gas soluble, o relación mol X , y L moles/tiempo*área de un disolvente no volátil.

$$L = L_i(1 - x_i) = \frac{L_i}{1 + x_i} \text{ Ec. [1.2.8.1-4]}$$

Debido a que el gas inerte y el líquido disolvente no cambian en cantidad a través de la torre, se puede expresar el balance de materia en función de éstos. Haciendo un balance de soluto en la parte inferior de la torre, que corresponde al punto 1 de la fig. 1.2.8.1-1, obtenemos:

$$G(Y_1 - Y_i) = L(X_1 - X_i) \text{ Ec. [1.2.8.1-5]}$$

Si i representa la parte superior de la torre, que corresponde al punto 2 de la figura 1.2.8.1-1, tenemos:

$$G(Y_1 - Y_2) = L(X_1 - X_2) \text{ Ec. [1.2.8.1-6]}$$

$$\frac{L}{G} = \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2} \text{ Ec. [1.2.8.1-7]}$$

1.2.8.2. BALANCE DIFERENCIAL.

Haciendo el balance de materia en una sección cualquiera de la torre cuya altura es dz tenemos:

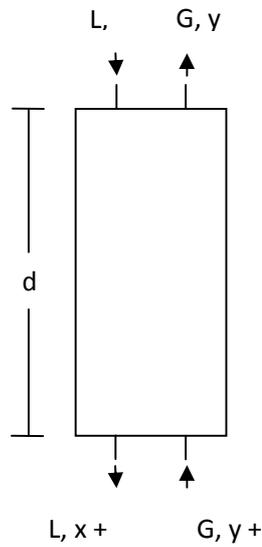


Fig. 1.2.8.2-1. Balance Diferencial

$$Lx + G(y + dy) = L(x + dx) + Gy$$

$$Lx + Gy + Gdy = Lx + Ldx + Gy$$

$$Gdy = Ldx \text{ Ec. [1.2.8.2-1]}$$

La ecuación 1.2.8.2-1 nos indica que la cantidad de gas transferida de la fase gas es igual a la cantidad de gas que disuelve la fase líquida.

1.2.8.3. ECUACIÓN GENERAL DE CÁLCULO PARA COLUMNAS DE RELLENO.

La cantidad de componente que se transfiere es proporcional al gradiente de concentraciones.

- Respecto a la fase gas:

$$N_A = k_G (p - p_i) \quad \text{Ec. [1.2.8.3-1]}$$

- Respecto a la fase líquida:

$$N_A = k_L (c_i - c) \quad \text{Ec. [1.2.8.3-2]}$$

Donde p_i y c_i son concentraciones de equilibrio de interface y N_A cantidad de componente que pasa de una fase a otra [kg/h m^2]. Para nuestro propósito se puede utilizar:

$$z = \int_{y_2}^{y_1} \frac{G}{k_y * a} \times \frac{dy}{(1-y)(y-y^*)} \quad \text{Ec. [1.2.8.3-3]}$$

Además:

$$Z = H_{OG} \times N_{OG} \quad \text{Ec. [1.2.8.3-4]}$$

Por consiguiente:

$$N_{OG} = \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{(1-y)(y-y^*)} \quad \text{Ec. [1.2.8.3-5]}$$

$$H_{OG} = \frac{G}{K_G * a} \quad \text{Ec. [1.2.8.3-6]}$$

El cálculo del N_{OG} puede simplificarse para aquellas situaciones en que la curva de equilibrio es recta como en nuestro caso.

$$N_{OG} = \frac{\int_{y_2}^{y_1} dy}{(y - y^*)_M} = \frac{y_1 - y_2}{(y - y^*)_M} \text{ Ec. [1.2.8.3-7]}$$

Dónde:

$$(y - y^*)_M = \frac{(y - y^*)_{fondo} - (y - y^*)_{cabeza}}{\ln \left(\frac{(y - y^*)_{fondo}}{(y - y^*)_{cabeza}} \right)} \text{ Ec. [1.2.8.3-8]}$$

1.2.8.4. ABSORCIÓN CON REACCIÓN QUÍMICA

El efecto de la absorción con reacción química en la fase líquida es incrementar la solubilidad del componente a absorber y reducir su presión parcial de equilibrio. Las moléculas del componente absorbido deben difundirse en la fase líquida hasta encontrar el reactante y después el producto de la reacción debe difundirse en la masa de líquido. En todo este lapso la razón de absorción depende de la concentración y difusividad de los reactantes y productos, de la velocidad de reacción química y de la profundidad de la película líquida en la cual la reacción ocurre.

El coeficiente de transporte de masa para absorción en la película líquida es incrementado considerablemente cuando una reacción química ocurre rápidamente. Por ejemplo la absorción de SO_2 por agua es controlada por ambas películas (película gas y líquido), pero cuando este es absorbido por una solución diluida de sulfito de sodio, el coeficiente de

película es incrementado a un valor tal que la razón de absorción es controlada casi enteramente por la película de gas.

Si la reacción entre soluto absorbido y el solvente es una reacción irreversible de primer orden, la velocidad de reacción es proporcional a la concentración de soluto, c .

Si consideramos un elemento de la película líquida entre dos planos de unidad de área separados una distancia dx , la razón de difusión del soluto hacia el elemento a través de un plano es $-D (dc/dx)$ y la razón de difusión fuera del elemento a través del otro plano es $-D (dc/dx + d^2c / dx^2 * dx)$ la diferencia entre estas dos cantidades es igual a la razón a la cual el soluto es removido por reacción química, entonces:

$$-D \frac{d^2c}{dx^2} * dx = -k_1 * c * dx \text{ Ec. [1.2.8.4-1]}$$

$$-D \frac{d^2c}{dx^2} = k_1 * c \text{ Ec. [1.2.8.4-2]}$$

Donde D es la difusividad del soluto en la fase líquida y k_1 la constante de velocidad de reacción. Esta expresión puede ser integrada entre dos límites $c = c_i$ a: $x = 0$ y $c = c_L$ a: $x = x_L$ para dar una expresión para la velocidad de absorción:

$$N_A = \frac{b * D (c_i - c_L)}{x_L} \text{ Ec. [1.2.8.4-3]}$$

Dónde:

$$b = \frac{x_L \sqrt{\frac{k_1}{D}}}{\tan x_L \sqrt{\frac{k_1}{D}}} \text{ Ec. [1.2.8.4-4]}$$

Esta ecuación es similar a la ecuación para absorción física con la adición del grupo b , que representa el efecto de la reacción química.

El coeficiente de película líquida es:

$$k_L = \frac{b^* D}{x_L} \text{ Ec. [1.2.8.4-5]}$$

Y los coeficientes K_G y K_L , pueden ser evaluados con las siguientes ecuaciones:

$$\frac{1}{k_G} = \frac{p_A - p^*}{N_A} = \frac{pA - pi}{N_A} + \frac{m(ci - c_A)}{N_A} = \frac{1}{k_G} + \frac{m}{k_L} \text{ Ec. [1.2.8.4-6]}$$

$$\frac{1}{k_L} = \frac{c^* - c_A}{N_A} = \frac{pA - pi}{m^* N_A} + \frac{(ci - c_A)}{N_A} = \frac{1}{m^* k_G} + \frac{1}{k_L} \text{ Ec. [1.2.8.4-7]". (9)}$$

1.3. DISEÑO DE LA TORRE DE ABSORCIÓN DE GASES

1.3.1. CAUDAL DE GAS A LA ENTRADA, (G):

1.3.1.1. ÀREA DE LA TUBERÍA DE ENTRADA

“Se denomina área de una superficie a la medida de dicha superficie, las unidades empleadas para medir superficies son respectivamente cuadrados cuyos lados adoptan los valores de longitud. Muy aplicada en el cálculo de áreas geométricas, mecánica de fluidos, transferencia de calor (intercambiadores de calor), etc.

Para la determinación del caudal del gas se toma la Ecuación del cálculo del área de un círculo, tomando como parámetro fundamental el diámetro de la tubería, quedando la ecuación 1.3.1.1-1.

$$A = \frac{\pi \times \phi_d^2}{4} \quad \text{Ec. 1.3.1.1-1}$$

Dónde:

- **A** : Área de la tubería de entrada (m²)
- ϕ_d : Diámetro de la tubería (m)

1.3.1.2. DENSIDAD DEL AIRE

La densidad es la relación de una determinada masa sobre un volumen, en el cálculo la densidad del aire se le toma como gas ideal, calculando su Factor de Compresibilidad (z) teniendo la ecuación 1.3.1.2-1, utilizada en las propiedades físico – químicas de los fluidos y gases.

$$\rho_{aire} = \frac{PM_{aire}}{RT z} \quad \text{Ec. 1.3.1.2-1}$$

Dónde:

- ρ_{aire} : Densidad del aire (Kg/m³)
- **P**: Presión atmosférica (at)
- **M_{aire}**: Peso molecular del aire (Kg/Kg-mol)
- **R**: Constante de los gases (at L/Kg-mol K)
- **T**: Temperatura (K)”.
- **z**: Factor de Compresibilidad” (10)

El Factor de compresibilidad (Z) se define como la razón entre el volumen molar de un gas real (V_{real}) y el correspondiente volumen de un gas ideal (V_{ideal}).

$$Z = \frac{\bar{V}_{\text{real}}}{\bar{V}_{\text{ideal}}}$$

Y se utiliza para comparar el comportamiento de un gas real respecto al establecido por la ecuación de los Gases Ideales. Partiendo de esta definición y recordando que

$$\bar{V}_{\text{ideal}} = \frac{RT}{P}$$

Sustituyendo en la definición de Z :

$$Z = \frac{P\bar{V}_{\text{real}}}{RT}$$

Por lo tanto:

$$P\bar{V}_{\text{real}} = ZRT$$

Es decir Z representa un factor de corrección para la ecuación de los gases ideales.

Con base en esto se encuentra tres tipos de comportamiento distintos:

- ✓ $Z = 1$, comportamiento de Gas Ideal. (altas temperaturas y bajas presiones).
- ✓ $Z > 1$, gases como el Hidrógeno y Neón, difícilmente compresibles (altas temperaturas y presiones).
- ✓ $Z < 1$, gases como el O_2 , Argón y CH_4 , fácilmente compresibles (bajas temperaturas y altas presiones).

1.3.1.3. CAUDAL DEL GAS (G)

“Es la cantidad total de gas G que pasa a través de la torre en sentido ascendente por unidad de tiempo y área de sección, normal al flujo (Kg-mol/h.m^2) consta de G' moles de inerte o componente que no se difunde y soluto o componente que se difunde.

Es muy aplicada en el diseño de torres de enfriamiento de agua, en torres de desorción o stripping y en la separación de gases mediante otro gas lavador etc.

$$G = v_{gas} \times A \times \rho_{gas} \text{ Ec. 1.3.1.3-1}$$

Dónde:

- G : Caudal del gas (Kg-mol/h.m^2)
- v_{gas} : Velocidad del gas a la entrada (m/s)
- A : Área de la tubería de entrada (m^2)
- ρ_{gas} : Densidad del gas (Kg/m^3)

1.3.2. CONCENTRACIONES DEL GAS EN PORCENTAJE EN PESO

Es la cantidad de una sustancia por unidad de volumen. Su unidad en el Sistema Internacional es el mol por metro cúbico (mol/m^3). Se aplica en la química para preparar soluciones e identificar la naturaleza de disolventes.

La conversión entre ppm en volumen y ug/m^3 depende del peso molecular y del volumen ocupado por un mol de la sustancia (SO_2) bajo condiciones normales de presión y temperatura.

- A 25 C y P = 101,3 KPa (1 at)

$$\frac{m_{cont}}{V_{aire}} = \frac{\rho_{cont} * V_{cont}}{V_{aire}} = \frac{PM_{cont} * V_{cont}}{V_{aire} * R * T} = \frac{V_{cont}}{V_{aire}} * \frac{PM_{cont}}{R * T} \text{ Ec. 1.3.2-1}$$

Asumiendo el contaminante como gas ideal y:

- P = 1 at
- T = 298 K
- R = 0,08205 at m³/kg-mol K

$$\frac{m_{cont}}{V_{aire}} = \frac{V_{cont}}{V_{aire}} * \frac{M_{cont}}{24,5} \text{ Ec. 1.3.2-2}$$

Donde masa de contaminante/unidad de volumen está dada en ug/m³. Al multiplicar el lado derecho por 10⁹ para convertir las masas a ug y al dividir 10⁶ de manera que se pueda expresar m_{cont}/V_{aire} con ppm se obtiene:

$$\frac{ug}{m^3} = \frac{1000 * 64,06 * ppm}{24,5} \text{ Ec. 1.3.2-3}$$

De igual forma será el cálculo para la concentración de salida.

1.3.3. COCIENTE MOLAR DEL GAS

Es la composición de la fase gaseosa que se expresa en fracción molar (y), y presión parcial (P) o relación molar (Y) (moles del componente que se difunden por mol de componente inerte). Aplicada en la determinación de % volumen a % peso peso.

$$y_1 = \frac{\frac{\%_{SO_2}}{M_{SO_2}}}{\frac{100 - \%_{SO_2}}{M_{aire}}} \text{ Ec. 1.3.3-1}$$

Dónde:

- M_{aire} : peso molecular del aire (Kg/Kg-mol)
- M_{SO_2} : peso molecular del contaminante (Kg/Kg-mol)
- $\%SO_2$: % de la concentración del contaminante.

Para el fondo de la torre es igual a y_1 . De igual manera se realiza para calcular la concentración de salida que es igual a y_2 .

1.3.4. FLUJO TOTAL DEL LIQUIDO (L)

Es la cantidad del líquido L que baja a lo largo de la torre por unidad de tiempo y área de sección normal al flujo (Kg-mol/h.m²) consta de L' moles de absorbente no volátil que no se difunde y componente que se difunde. Esta ecuación es aplicada en el diseño de torres de destilación, y enfriamiento de agua de tiro forzado.

$$L = \frac{\rho * Q}{M_{agua}} \text{ Ec. 1.3.4-1}$$

Dónde:

- **L:** Flujo total del líquido (Kg-mol/h.m²)
- **ρ_{agua} :** densidad del agua (Kg/m³)
- **Q:** caudal del líquido (agua) (m³/s)
- **M_{agua} :** peso molecular del agua (Kg/Kg-mol)

1.3.5. RELACIÓN (L/G).

Representa las composiciones del gas y del líquido en los distintos puntos de la columna y se denomina *recta de operación* la cual es muy aplicada en torres de enfriamiento de agua, absorción, stripping y destilación, en el cálculo de sus rectas óptimas de operación.

$$m = \frac{L}{G} \text{ Ec. 1.3.5-1}$$

Dónde:

- **m:** recta de operación
- **L:** caudal del líquido (Kg-mol/h m²)
- **G:** caudal del gas (Kg-mol/h m²)

1.3.6. RECTA DE TRABAJO

La ecuación de la recta es $y = mx + b$. Para nuestro caso $m = L/G$ entonces:

$$y = (L/G) x_1 + b \text{ Ec. 1.3.6-1}$$

Dónde:

- **y:** recta de trabajo
- **(L/G):** pendiente de la recta de operación
- **x₁:** concentración de salida del líquido.
- **b:** $b = y_2$ concentración de salida del gas

Se conoce además que en la parte superior ingresa líquido sin soluto x_2 , teniendo un gas de salida de concentración y_2 .

1.3.7. CONCENTRACIÓN DEL LÍQUIDO A LA SALIDA

Es la cantidad relativa de un componente que forma la solución. Esta se aplica en la química para preparar soluciones e identificar la naturaleza de disolventes. Se conoce que en la parte inferior de la torre existe una concentración y_1 , por lo tanto de la ecuación anterior x_1 sería:

$$x_1 = \frac{y_1 - y_2}{m} \text{ Ec. 1.3.7-1}$$

Dónde:

- y_1 : concentración de SO₂ a la entrada de la torre
- y_2 : concentración de SO₂ a la salida de la torre
- m : pendiente de la recta de operación
- x_1 : concentración de salida del líquido.

1.3.8. y^*x_1

y^*x_1 es la concentración de equilibrio del gas; correspondiente a la concentración de salida del líquido, x_1 .

$$y^*x_1 = m_R x_1 \text{ Ec. 1.3.8-1}$$

Dónde:

- y^* : concentración de equilibrio del gas
- x_1 : concentración de salida del líquido lavador y gas (fondo de la torre).
- m_R : Pendiente Regresión lineal

1.3.9. N_{OG}

N_{OG} = Número de unidades de transferencia y es equivalente al número de platos (adimensional). El N_{OG} es una medida de la facilidad o dificultad con que se realiza la operación, la misma que refleja relaciones estadísticas o de equilibrio. Debido a que la curva de equilibrio es una recta se usa las siguientes ecuaciones.

$$(y - y^*)_M = \frac{(y - y^*)_f - (y - y^*)_c}{\ln\left(\frac{(y - y^*)_f}{(y - y^*)_c}\right)} \text{ Ec. 1.3.9-1}$$

$$N_{OG} = \frac{y_1 - y_2}{(y - y^*)_M} \text{ Ec. 1.3.9-2}$$

Dónde:

- $(y - y^*)_M$: Promedio logarítmico de concentración.
- $(y - y^*)_f$: Concentración de equilibrio en el fondo de la torre
- $(y - y^*)_c$: Concentración de equilibrio en la cabeza de la torre
- N_{OG} : número de unidades de transferencia.

1.3.10. H_{OG}

El H_{OG} depende directamente del K_G refleja relaciones cinéticas, además si el H_{OG} es más pequeño la torre también, se lo toma como criterio de eficiencia de una torre de relleno.

H_{OG} = Altura de la unidad de transferencia y es equivalente al número de platos (m).

$$H_{OG} = \frac{z}{N_{OG}} \text{ Ec. 1.3.10-1}$$

Dónde:

- **H_{OG}**: altura de la unidad de transferencia (m)
- **z**: altura de la torre (m)
- **N_{OG}**: número de unidades de transferencia

1.3.11. COEFICIENTE TOTAL DE TRANSPORTE DE MASA (K_G).

El K_G es el coeficiente total de transporte de materia para la fase gaseosa en mol/h m² unidades de concentración en la fase gaseosa. Se aplica en el diseño de torres de destilación, torres de enfriamiento de agua por evaporación e intercambiadores de calor.

$$K_G = \frac{G_v}{H_{OG} \times a} \text{ Ec. 1.3.11-1}$$

$$G_v = \frac{G}{S} \text{ Ec. 1.3.11-2}$$

$$S = \frac{\pi \phi^2}{4} \text{ Ec. 1.3.11-3}$$

$$K_G = \frac{G}{S \times H_{OG} \times a} \text{ Ec. 1.3.11-4}$$

Dónde:

- **H_{OG}**: Altura de la unidad de transferencia (m)
- **S**: Área de la torre (m²)
- **a**: Área interfacial específica (m⁻¹)
- **K_G**: Coeficiente Total de transferencia de masa (Kg/h m²)
- **G_v**: Velocidad másica (Kg/h)
- **φ_T**: Diámetro de la Torre (m)
- **G**: Flujo del gas (Kg-mol/h m²)

1.3.12. DATOS DE EQUILIBRIO

Se define como la relación entre el número de moles de este componente y el número total de moles de todos los componentes que forma la solución. La fracción molar es útil en trabajos teóricos porque alguna de las propiedades físicas de las soluciones se expresa con mayor claridad en función de los números relativos de moléculas del solvente y soluto. Las fracciones molares de x para el SO_2 disuelto en el líquido lavador vendrán calculadas con la siguiente ecuación.

$$x = \frac{\frac{c}{M_{\text{SO}_2}}}{\frac{c}{M_{\text{SO}_2}} + \frac{100}{M_{\text{H}_2\text{O}}}} \text{ Ec. 1.3.12-1}$$

Para las fracciones y para el SO_2 en la fase gaseosa se calcula por el cociente de la presión parcial del SO_2 y la presión total.

$$y = \frac{P_{\text{SO}_2}}{P_{\text{total}}} \text{ Ec. 1.3.12-2}$$

Dónde:

- **x:** Fracción Molar (mol/mol)
- **y:** Fracción molar gaseosa (mol/mol)
- **M_{SO₂}:** Peso molecular del SO_2 (Kg-mol/Kg)
- **M_{H₂O}:** Peso molecular del H_2O (Kg-mol/Kg)
- **c:** Concentración de entrada del gas (g SO_2 /100 g H_2O)
- **p_{SO₂}:** Presión parcial del SO_2 (mm Hg)
- **p_{total}:** Presión atmosférica de Riobamba (mm Hg)” (11)

CAPITULO II

PARTE EXPERIMENTAL

2. PARTE EXPERIMENTAL

Este estudio se realizó en base a parámetros de diseño establecidos en la literatura como altura de la columna, diámetro y tipo de relleno indicado en la TABLA. 3.2-1., con una serie de variaciones de las variables de proceso para así establecer las condiciones óptimas y necesarias que facilitara para el mejor desenvolvimiento en el dimensionamiento del equipo (torre de absorción).

La parte experimental consta de dos etapas. La una se refiere a la determinación de los flujos de gas y de líquido de operación y a las cantidades de azufre a quemar. La otra etapa se refiere a la obtención de los datos válidos para el cálculo del coeficiente total de transporte de masa.

✓ Primera etapa.

Se procedió a determinar el flujo de gas que nos permita operar con un rango adecuado de caudal de líquido lavador, encontrándose que de 1,9 a 2,6 m/s de velocidad de aire el intervalo de líquido a utilizar era de 450 a 500 mL/s. ya que a valores menores no se humedecía suficientemente el lecho y a valores mayores la columna se inundaba. Posteriormente se realizaron pruebas con el fin de determinar la cantidad de azufre a quemar; encontrándose que al quemar 18,60 g de S en 6,40 minutos, se producía 155 ppm a la entrada de la torre y 0,6 ppm a la salida de la misma.

✓ Segunda Etapa.

Dentro de esta etapa de la parte experimental se procedió a determinar los parámetros necesarios para el cálculo del coeficiente total de transporte de masa para cada uno de los caudales de líquido absorbente.

2.1.PLAN DE MUESTREO

Para el muestreo correspondiente se procedió a fijar las condiciones de operación del equipo como el caudal del líquido absorbente y la velocidad del gas a la entrada que serán constantes.

El muestreo realizado es simple, en el cual, se ha efectuado con una frecuencia de 2 veces por día, en un lapso de 10 días, con un total de 10 muestras. Las muestras fueron tomadas en el fondo de la torre en envases de vidrio de 500 mL, ha intervalos de 2 min por cada 7 min que dura el ensayo, para el análisis del agua como parámetro de referencia se tomó el pH para determinar si el líquido absorbente es afín con el gas contaminante y verificar si las condiciones fijadas son satisfactorias para la obtención de los resultados deseados.

El desarrollo del ensayo está basado en el STÁNDARMETHODS *2310 A y B para recolección de muestras como se indica en la TABLA 2.1-1.

TABLA 2.1-1
RECOLECCIÓN DE MUESTRAS
STÁNDARMETHODS *2310 A y B

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA
Método de selección de muestras de un ensayo para estudiar los distintos parámetros de diseño.	Recipientes de plástico transparente o vidrio de capacidad de 500 mL	Recoger tres (3) tipos de muestra, cada una en un volumen aproximado a 100 mL.

Fuente:STÁNDARMETHODS *2310 A y B

2.2.DIAGNÓSTICO

El problema de la contaminación ambiental es cada día más grave debido especialmente al incremento acelerado del parque automotor que es una de las principales causas para que se produzca este fenómeno en nuestro país, se ha estimado que el SO₂ viaja por el aire en un promedio de 2 a 4 días, tiempo durante el cual este puede ser transportado tan lejos como 1000 km.

Es por esta razón que se ha visto la imperiosa necesidad, como estudiantes de la Escuela de Ingeniería Química conscientes de esta realidad ambiental, de realizar un estudio preliminar de tratabilidad para la reducción de la carga contaminante a la atmósfera. Para lograr este estudio se ha diseñado y construido un equipo de absorción de gases, en el cual, se ha logrado analizar las variables más sobresalientes (concentración, presión, temperatura y tiempo de residencia del gas) en una descarga de gases contaminantes y reducirlos para su posterior descarga a la atmósfera.

Poniendo énfasis en la formación científica-técnica que el estudiante pueda recibir en un laboratorio debidamente equipado permitiendo adaptar la fundamentación teórica a la aplicación práctica.

2.3.MÉTODOS

En todo proceso de diseño se requiere procedimientos que son formulados de una manera lógica para la adquisición de información y cumplimiento de objetivos. Este estudio tiene carácter descriptivo experimental de tal forma que permita responder a las interrogantes que se presentan, producto del proceso de absorción de gases y su empleo en distintos Campos Industriales, seleccionando los medios y procesos más adecuados.

2.3.1. INDUCTIVO

Partiendo del diagnóstico que permite reducir la carga de gases nocivos liberados a la atmósfera y la caracterización de los mismos. Para posteriormente determinar las variables de proceso y la difusividad que exista entre el gas y el líquido en contacto, a fin de disolver de manera selectiva el SO_2 presente en los gases de combustión, luego de lo cual, se calculó los valores correspondientes de diseño de la torre para su construcción y posterior verificación de su funcionamiento.

2.3.2. DEDUCTIVO

En el desarrollo del estudio se parte de fundamentos y principios de la Termodinámica, Transferencia de Materia y Operaciones Unitarias, partiendo así del diseño y construcción de la Torre de Absorción mediante la selección adecuada de los materiales y su respectivo dimensionamiento, lo cual, es de gran ayuda para obtener los cálculos necesarios y la determinación de las variables del proceso con el fin de obtener la caracterización y muestreo apropiado en cuanto al mejor diseño se refiere.

2.3.3. EXPERIMENTAL

Los métodos utilizados dentro de esta investigación son gravimétricos, volumétricos y físico-químicos e instrumentales:

- ♣ Los métodos gravimétricos se basan en la determinación de pesos de la muestra a ser utilizada en el ensayo.
- ♣ Los métodos volumétricos se basan en la determinación de volúmenes para la toma de muestras y calibración del equipo.

- ♣ Los métodos físico-químicos miden las propiedades diferentes a masa y volumen.
- ♣ Los métodos instrumentales de análisis como colorimetría, espectroscopia, son considerados como análisis físico-químicos representativos. Los mismos nos permitirán probar la validez de nuestra hipótesis.

2.4.TÉCNICAS

Es indispensable en el proceso de la investigación científica, ya que integra la estructura por medio de la cual se organiza el diseño, a través de formas generales la cual permitirá la recopilación de información para enunciar las teorías que se basan en el estudio de los fenómenos y procesos.

2.4.1. TÉCNICA DE CAMPO

Se realiza mediante el empleo y análisis de los distintos diagramas los cuales serán una ayuda dentro de la investigación del diseño y construcción.

TABLA 2.4.1-1
DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA	CÁLCULO
<p>Está orientado a la obtención de las condiciones de operación que consta de dos etapas:</p> <p>La una se refiere a la determinación de los flujos de gas y del líquido de operación y las cantidades de sustancia a quemar.</p> <p>La otra etapa se refiere a la obtención de los datos válidos para el cálculo del coeficiente de transporte de masa.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Probeta de 1000 ml • Columna de absorción. • Medidor de gas. • pH metro. • Balanza analítica. • Cronometro. • Compresor. • Anemómetro. • Bomba centrifuga. 	<ul style="list-style-type: none"> • Como se indicó anteriormente el caudal de gas a la entrada de la torre permanece constante durante toda la experimentación, entonces fijamos una velocidad de aire de 1,9 a 2,6 m/s. • Prender la bomba para impulsar el líquido. • Seleccionar un caudal de líquido tomando un volumen en un tiempo determinado y esperar unos dos minutos hasta que se humedezca el lecho y se descargue el líquido de la torre. • Pesar 18.60 g. de azufre cuando se trabaje con agua como líquido. • Tomar la lectura inicial del medidor de gases. • Combustionar el azufre. • Realizar la lectura final del medidor de gases. • Repetir nuevamente por dos ocasiones desde el paso 4. 	$G = V_{gas} \times A \times \rho_{gas}$ <p>Dónde:</p> <ul style="list-style-type: none"> - G : Caudal del gas (Kg-mol/h.m²) - V_{gas}: Velocidad del gas a la entrada (m/s) - A : Área de la tubería de entrada (m²) - ρ: Densidad del gas (Kg/m³) $L = \frac{\rho * Q}{M}$ <p>Dónde:</p> <ul style="list-style-type: none"> - L: Caudal del líquido (Kg-mol/h.m²) - ρ: Densidad del agua (Kg/m³) - Q: Caudal del líquido lavador (m³/s) - M: Peso molecular del agua (Kg/Kg-mol)

Fuente: Bósquez D., Yumi C., 2011

TABLA 2.4.1-2
DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO pH
STANDARD METHODS* 4500-HB

FUNDAMENTO	MATERIALES	REACTIVOS	PROCEDIMIENTO	CÁLCULOS
<p>El pH es el parámetro que nos indica la alcalinidad o acidez del agua, en un escala numérica de 1 a 14. Si el agua es ácida el pH es menor a 7, si es básica mayor a 7, si es igual a 7 es neutro.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • pHmetro digital. • Un vaso de precipitación de 250 mL. 	<p>Soluciones buffer pH 4 y pH 7 y pH 10</p>	<p>Verificar que el pHmetro este calibrado utilizando las soluciones buffer (el siguiente orden 4,7 y 10 de pH) estas que se encargan de realizar pequeños cambios de su potencial de estado y mantener a este.</p> <p>Colar el electrodo dentro del vaso. Leer directamente el valor en el equipo.</p>	<p>Lectura directa</p>

Fuente: *STANDARD METHODS *4500-HB. Edición 17.

2.5.DATOS EXPERIMENTALES

TABLA 2.5-1

DATOS EXPERIMENTALES DE LA COLUMNA DE ABSORCIÓN

Torre de Absorción			Relleno de la torre		
Φ_{Torre} (m)	Φ_{ducto} (m)	(z) m	Tipo	(h) m	a (m ² /m ³)
0,30	0,052	1,31	Rellenos de Vidrio	0,87	340

Fuente: Bósquez D., Yumi C., 2011

TABLA 2.5-2
DATOS EXPERIMENTALES PARA FIJAR LAS CONDICIONES DE
OPERACIÓN DE LA TORRE

ANÁLISIS N° 1		
n	V (m³)	t (s)
1	0,000489	2,85
2	0,000484	2,80
3	0,000480	2,71
4	0,000495	2,90
5	0,000500	2,92

ANÁLISIS N° 6		
n	V (m³)	t (s)
1	0,000520	3,08
2	0,000460	2,70
3	0,000458	2,67
4	0,000480	2,89
5	0,000500	2,90

ANÁLISIS N° 2		
n	V (m³)	t (s)
1	0,000520	3,10
2	0,000452	2,65
3	0,000480	2,71
4	0,000495	2,82
5	0,000500	2,92

ANÁLISIS N° 7		
n	V (m³)	t (s)
1	0,000480	2,90
2	0,000450	2,60
3	0,000452	2,67
4	0,000460	2,70
5	0,000454	2,68

ANÁLISIS N° 3		
n	V (m³)	t (s)
1	0,000454	2,66
2	0,000462	2,70
3	0,000490	2,85
4	0,000495	2,88
5	0,000450	2,60

ANÁLISIS N° 8		
n	V (m³)	t (s)
1	0,000480	2,89
2	0,000500	2,92
3	0,000500	2,92
4	0,000475	2,87
5	0,000500	2,92

ANÁLISIS N° 4		
n	V (m³)	t (s)
1	0,000485	2,80
2	0,000455	2,80
3	0,000470	2,70
4	0,000460	2,68
5	0,000480	2,73

ANÁLISIS N° 9		
n	V (m³)	t (s)
1	0,000500	2,92
2	0,000475	2,87
3	0,000520	3,08
4	0,000500	2,92
5	0,000480	2,89

ANÁLISIS N° 5		
n	V (m³)	t (s)
1	0,000465	2,72
2	0,000480	2,82
3	0,000450	2,65
4	0,000473	2,75
5	0,000500	2,90

ANÁLISIS N° 10		
n	V (m³)	t (s)
1	0,000515	3,08
2	0,000474	2,75
3	0,000498	2,97
4	0,000500	3,00
5	0,000493	2,93

Fuente: Bósquez D., Yumi C., 2011

TABLA 2.5-3

DATOS EXPERIMENTALES PARA FIJAR LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA TORRE

ANÁLISIS N° 1			ANÁLISIS N° 6		
n	V_m (ml)	pH	n	V_m (ml)	pH
1	100	2	1	100	4
2	100	2	2	100	4
3	100	2	3	100	4

ANÁLISIS N° 2			ANÁLISIS N° 7		
n	V_m (ml)	pH	n	V_m (ml)	pH
1	100	2	1	100	4
2	100	2	2	100	4
3	100	2	3	100	4

ANÁLISIS N° 3			ANÁLISIS N° 8		
n	V_m (ml)	pH	n	V_m (ml)	pH
1	100	3	1	100	3
2	100	3	2	100	3
3	100	3	3	100	3

ANÁLISIS N° 4			ANÁLISIS N° 9		
n	V_m (ml)	pH	n	V_m (ml)	pH
1	100	4	1	100	2
2	100	4	2	100	2
3	100	4	3	100	2

ANÁLISIS N° 5			ANÁLISIS N° 10		
n	V_m (ml)	pH	n	V_m (ml)	pH
1	100	3	1	100	2
2	100	3	2	100	2
3	100	3	3	100	2

Fuente: Bósquez D., Yumi C., 2011

TABLA 2.5-4**DATOS OBTENIDOS DE LOS ANÁLISIS**

n°	T (C)	v_{aire} (m/s)	W_{azufre} (g)	$t_{\text{combustión}}$ (h)	C_e(ppm)	C_s(ppm)
1	25	1,9	18,60	0,107	155,0	0,600
2	25	1,9	17,70	0,102	154,8	0,599
3	23	2,0	16,20	0,093	154,0	0,596
4	23	2,1	15,50	0,089	153,8	0,595
5	20	2,2	16,20	0,093	154,0	0,596
6	20	2,2	15,00	0,086	152,8	0,591
7	18	2,3	14,10	0,081	151,6	0,587
8	18	2,4	16,20	0,093	154,0	0,596
9	22	2,5	18,60	0,107	155,0	0,600
10	22	2,6	18,60	0,107	155,0	0,600

Fuente: Bósquez D., Yumi C., 2011

2.6.DATOS ADICIONALES**TABLA 2.6-1****DATOS ADICIONALES**

M_{SO_2} (Kg/Kmol)	M_{aire} (Kg/Kmol)	T (C)	$P_{\text{Rbba.}}$ (mmHg)
64	29	25	547,20

Fuente: ENCICLOPEDIA INTERACTIVA ESTUDIANTIL., SIGLO XXI

2.7.DATOS DE EQUILIBRIO

Los datos de equilibrio para el sistema $\text{SO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ se indican en la siguiente tabla.

TABLA 2.7-1

DATOS DE EQUILIBRIO

p (mmHg)	C (gSO ₂ /100gH ₂ O)
0,5	0,02
1,2	0,05
3,2	0,1
14,1	0,3
26	0,5
39	0,7
59	1
92	1,5
161	2,5
336	5
517	7,5

Fuente: OCON. J/ TOJO. J., Problemas de Ing. Química: Operaciones básicas

Siendo **p** la presión parcial del SO_2 en mmHg y **C** la concentración del SO_2 en la fase líquida en gramos de SO_2 por 100 gramos de agua.

Debido a que las concentraciones de trabajo son muy pequeñas, realizamos la regresión lineal de estos cocientes molares, para evitar hacer las interpolaciones que nos proporcionan datos erróneos. Entonces el equilibrio del SO_2 y agua pueden representarse con la ecuación.

$$y = mx$$

CAPITULO III

DISEÑO Y

CONSTRUCCIÓN

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA TORRE DE ABSORCIÓN DE GASES

3.1.GENERALIDADES

Para el diseño de una columna de relleno se debe tener en cuenta el conseguir la máxima transferencia del contaminante con el mínimo consumo de energía y tamaño de la columna. El cálculo principal en el diseño de la columna es la altura de relleno necesaria para alcanzar la transferencia de contaminante al líquido deseado, en función del equilibrio que tenga entre gas y líquido. Aunque existen otros parámetros importantes, como son el diámetro de la columna, los caudales de gas residual y líquido, el tipo de relleno y la pérdida de presión.

Para calcular todos estos datos se comenzó con los parámetros conocidos: las condiciones a las que operará la columna (P y T), la composición del gas de entrada, el equilibrio del contaminante entre gas y líquido, la eficiencia que se persigue en la separación, las propiedades de los contaminantes y el flujo de gas residual que se quiere tratar.

3.2. CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO DE LA TORRE DE ABSORCIÓN

En este punto se indica la manera como se determinó las dimensiones de la torre a construir. Los rangos del diámetro de columna recomendados en función de los tamaños de empaque usados se indican en la *TABLA 3.2-1*.

TABLA 3.2-1

DIÁMETROS DE COLUMNA RECOMENDADOS

Diámetro de la Columna	Tamaño de Empaque
<0,3 m.	< 1 plg.
0,3 - 0,9 m.	1 – 1.5 plg.
>0,9 m.	2 – 3 plg.

Fuente: Columna de absorción. www.crodecelaya.edu.mx/ColumnaAbsorcion.html

Debido a que se dispone de *rellenos de vidrio (picos de botella)* de 1 plg., se tomó como diámetro de la torre 30 *cm*.

Generalmente el equipo no se llena por una capa de empaquetadura continua, sino que se divide el relleno en bloques, con el propósito de evitar que el líquido se mueva preferentemente cerca de la pared y deje de mojar la zona central de la capa de empaquetaduras. Este fenómeno, perjudicial para la transferencia de masa, se denomina **efecto pared** y está motivado porque al existir una mayor densidad del relleno en la parte central que en la zona próxima a las paredes del aparato, la resistencia hidráulica cerca de las paredes es menor por lo que el líquido se desplazará preferentemente hacia esa región, razón por la cual se toma como un valor aproximado para una torre de empaques un 34,5% de llenado:

$$\frac{D_{torre}}{h_{relleno}} = 0,345$$

$$h_{relleno} = \frac{0,30}{0,345}$$

$$h_{relleno} = 87cm$$

3.3.BALANCE DE MATERIA

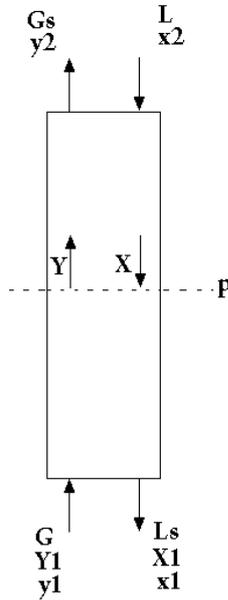


Fig. 3.3-1. Balance de Materia

En la figura se muestra una torre a contracorriente para lograr el contacto líquido – gas, la corriente gaseosa de la torre consta de G moles totales /tiempo (área de sección transversal de la torre). Esta corriente está constituida por el soluto a que se difunde en fracción molar (y) y presión parcial (p) o relación molar (Y) y por un gas que no se difunde G_s , la relación entre ambos componentes es:

$$Y = \frac{y}{1 - y} = \frac{\bar{p}}{p_t - \bar{p}}$$

$$G_s = \frac{G}{1 - y} = \frac{G}{1 - Y}$$

Así mismo para la corriente líquida consta de L moles totales /tiempo (área de sección transversal de la torre). Contiene (x) fracción molar de gas soluble o relación molar (X) y L_s de un disolvente no volátil

$$X = \frac{x}{1-x}$$

$$Ls = \frac{L}{1-x} = \frac{L}{1-X}$$

Un balance de soluto en la parte inferior de la torre es

$$Gs(Y_1 - Y) = Ls(X_1 - X)$$

Esta ecuación es una línea recta (línea de operación) sobre las coordenadas **X, Y**, con pendiente **Ls/Gs** que pasa por el punto **X₁; Y₁**. Esta línea señala la relación entre las concentraciones del líquido y el gas en cualquier punto de la torre.

3.4.CÁLCULOS

3.4.1. CÁLCULO DEL CAUDAL DE GAS A LA ENTRADA, G = G₁

3.4.1.1.CÁLCULO DEL ÁREA

De la Ecuación 1.3.1.1-1 se tiene:

$$A = \frac{\pi \times \phi_d^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi \times (0,052)^2}{4}$$

✓ $A = 2,124 \times 10^{-3} m^2$

3.4.1.2. CÁLCULO DE LA DENSIDAD DEL AIRE

Para el cálculo de la densidad del aire se tomó como dato referencial la Presión y Temperatura de Riobamba, las cuales son P: 547,20 mmHg a 25 C.

De la Ecuación 1.3.1.2-1 se tiene:

$$\rho_{aire} = \frac{PM_{aire}}{RTz}$$
$$K = 273 + C$$
$$K = 273 + 25$$
$$K = 298 \text{ K}$$
$$\rho_{aire} = \frac{(0,72)(29)}{(0,082)(298) * 0,96}$$
$$T_r = \frac{T}{T_c} = \frac{298}{430,8} = 0,692$$
$$\checkmark \rho_{aire} = 0,890 \frac{Kg}{m^3}$$
$$P_r = \frac{P}{P_c} = \frac{0,72}{77,78} = 0,0092$$

3.4.1.3. CÁLCULO DE G

Una vez obtenidas los datos de operación, se calculó el caudal del gas contaminante con la Ecuación 1.3.1.3-1.

$$G = v_{gas} \times A \times \rho_{gas}$$

$$G = 1,9 * 2,124 \times 10^{-3} * 0,854$$

$$G = 3,446 \times 10^{-03} \frac{Kg}{s} * \frac{3600s}{1h} = 12,407 \frac{Kg}{h}$$

$$G = \frac{12,407}{29}$$

$$\checkmark G = 0,428 \frac{Kg \text{ mol}}{h}$$

3.4.2. CÁLCULO DE LAS CONCENTRACIONES DEL GAS EN PORCENTAJE EN PESO

De la Ecuación 1.3.2-3 se tiene:

$$\frac{ug}{m^3} = \frac{1000 * 64,06 * ppm}{24,5}$$

$$\frac{ug}{m^3} = \frac{1000 * 64,06 * 155}{24,5}$$

$$✓ C_e = 405277,551 \frac{ug}{m^3} = 0,048\%$$

$$405277,551 \frac{ug_{SO_2}}{m^3_{gas}} * \frac{m^3_{gas}}{1000L_{gas}} * \frac{1L_{gas}}{0,854g_{SO_2}} * \frac{1g_{SO_2}}{1 \times 10^6 ug_{SO_2}} * 100$$

De igual forma la concentración de salida

$$✓ C_s = 1568,816 \frac{ug}{m^3} = 1,846 \times 10^{-4}\%$$

3.4.3. CÁLCULO DE LOS COCIENTES MOLARES DEL GAS

De la Ecuación 1.3.3-1 se tiene:

$$y_1 = \frac{\frac{\%_{SO_2}}{M_{SO_2}}}{100 - \%_{SO_2} \frac{M_{SO_2}}{M_{aire}}}$$

Para el fondo de la torre:

$$y_1 = \frac{\frac{0,047}{64,06}}{\frac{100 - 0,047}{29}}$$

✓ $y_1 = 2,162 \times 10^{-04}$

Igualmente la concentración de salida es:

✓ $y_2 = 8,360 \times 10^{-7}$

3.4.4. CÁLCULO DE FLUJO TOTAL DEL LIQUIDO (L)

De la Ecuación 1.3.4-1 se tiene:

$$L = \frac{\rho * Q}{M_{agua}}$$

$$L = \frac{998,23 * 1,726 \times 10^{-4}}{18}$$

$$L = 9,572 \times 10^{-03} \frac{Kgmol}{s} \times \frac{3600s}{1h}$$

✓ $L = 34,480 \frac{Kgmol}{h}$

3.4.5. CÁLCULO DE LA RELACIÓN (L/G).

De la Ecuación 1.3.5-1 se tiene:

$$m = \frac{L}{G}$$

$$m = \frac{34,480}{0,428}$$

✓ $m = 80,546$

3.4.6. CÁLCULO DE LA RECTA DE TRABAJO

De la Ecuación 1.3.6-1 se tiene:

$$y = (L/G) x_1 + b$$

Conocemos además que en la parte superior ingresa líquido sin soluto, entonces $x_2 = 0$ y que el gas de salida tiene una concentración $y_2 = 8,360 \times 10^{-7}$.

Entonces la ecuación de la recta de trabajo es:

$$y = 80,546 x_1 + 8,360 \times 10^{-7}$$

3.4.7. CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN DEL LÍQUIDO A LA SALIDA

De la Ecuación 1.3.7-1 se tiene:

❖ Conocemos que en la parte inferior de la torre $y_1 = 2,162 \times 10^{-4}$, por lo tanto de la ecuación anterior x_1 sería:

$$y_1 = mx_1 + y_2$$

$$x_1 = \frac{y_1 - y_2}{m}$$

$$x_1 = \frac{2,162 \times 10^{-4} - 8,360 \times 10^{-7}}{80,546}$$

✓ $x_1 = 2,673 \times 10^{-6}$

3.4.8. CÁLCULO DE y^*x_1

De la Ecuación 1.3.8-1 se tiene:

$$y^*x_1 = m_R x_1$$

$$y^*x_1 = 44,935x_1$$

$$y^*x_1 = 44,935(2,683 \times 10^{-06})$$

➤ $y^*x_1 = 1,201 \times 10^{-04}$

3.4.9. CÁLCULO DEL N_{OG}

De la Ecuación 1.3.9-2 se tiene:

a. $(y - y^*)_c = y_2 - x_2$

$$(y - y^*)_c = 8,360 \times 10^{-07} - 0$$

✓ $(y - y^*)_c = 8,360 \times 10^{-07}$

b. $(y - y^*)_f = y_1 - y^*x_1$

$$(y - y^*)_f = 2,162 \times 10^{-04} - 1,201 \times 10^{-04}$$

✓ $(y - y^*)_f = 9,603 \times 10^{-05}$

c.
$$(y - y^*)_M = \frac{(y - y^*)_f - (y - y^*)_c}{\ln\left(\frac{(y - y^*)_f}{(y - y^*)_c}\right)}$$

$$(y - y^*)_M = \frac{9,603 \times 10^{-05} - 8,360 \times 10^{-07}}{\ln\left(\frac{9,603 \times 10^{-05}}{8,360 \times 10^{-07}}\right)}$$

✓ $(y - y^*)_M = 2,007 \times 10^{-05}$

$$d. N_{OG} = \frac{y_1 - y_2}{(y - y^*)_M}$$

$$N_{OG} = \frac{2,162 \times 10^{-04} - 8,360 \times 10^{-7}}{1,999 \times 10^{-05}}$$

$$\checkmark N_{OG} = 10,729$$

3.4.10. CÁLCULO DEL H_{OG}

Según la Ec. 1.3.10-1 tenemos:

$$H_{OG} = \frac{z}{N_{OG}}$$

$$H_{OG} = \frac{1,31}{10,729}$$

$$H_{OG} = 0,122 \text{ m}$$

3.4.11. CÁLCULO DEL COEFICIENTE TOTAL DE TRANSPORTE DE MASA

(K_G).

Según la Ec. 1.3.11-1 tenemos que: Ec 1.3.11-1

$$K_G = \frac{G_v}{H_{OG} \times a}$$

$$G_v = \frac{G}{S}$$

$$S = \frac{\pi \phi_T^2}{4}$$

$$S = \frac{\pi (0,30)^2}{4}$$

$$\checkmark S = 0,0707 \text{ m}^2$$

$$K_G = \frac{G}{S \times H_{OG} \times a} = \frac{0,428}{0,0707 \times 0,122 \times 340}$$

$$K_G = 4,230 \frac{Kg}{h m^2}$$

$$K_G = \frac{4,230}{29}$$

$$\checkmark K_G = 0,146 \frac{Kg mol}{h m^2}$$

3.4.12. CALCULO DE LOS DATOS DE EQUILIBRIO

3.4.12.1. CALCULO DE LA FRACCIÓN MOLAR (x)

De la Ecuación 1.3.12-1 se tiene:

$$x = \frac{\frac{c}{M_{SO_2}}}{\frac{c}{M_{SO_2}} + \frac{100}{M_{H_2O}}} = \frac{\frac{0,02}{64}}{\frac{0,02}{64} + \frac{100}{18}}$$

$$\checkmark x = 5,62E - 05$$

3.4.12.2. CALCULO DE LA FRACCIÓN MOLAR (y)

De la Ecuación 1.3.12-2 se tiene:

$$y = \frac{P_{SO_2}}{P_{total}} = \frac{0,5}{547,20}$$

$$\checkmark y = 9,14E - 04$$

3.5.RESULTADOS

TABLA 3.5-1
FRACCIONES MOLARES OBTENIDAS

x	y
5,625E-05	9,174E-04
1,406E-04	2,202E-03
2,812E-04	5,872E-03
8,430E-04	2,587E-02
1,404E-03	4,771E-02
1,965E-03	7,156E-02
2,805E-03	1,083E-01
4,201E-03	1,688E-01
6,982E-03	2,954E-01
1,387E-02	6,165E-01
2,066E-02	9,486E-01

Fuente: Bósquez D., Yumi C., 2011

TABLA 3.5-2

RESULTADOS

n	V (m³)	t (s)	Q (m³/s)	T (C)	ρ (Kg/m³)	v (m/s)	pH	L (Kg-mol/h)	G (Kg-mol/h)	L/G
1	0,0004896	2,836	1,726E-04	25	0,854	1,9	2	34,48	0,428	80,546
2	0,0004894	2,840	1,723E-04	25	0,854	1,9	2	34,42	0,428	80,400
3	0,0004702	2,738	1,717E-04	23	0,860	2,0	3	34,30	0,454	75,606
4	0,0004700	2,742	1,714E-04	23	0,860	2,1	4	34,23	0,476	71,870
5	0,0004736	2,768	1,711E-04	20	0,869	2,2	3	34,17	0,504	67,785
6	0,0004836	2,848	1,698E-04	20	0,869	2,2	4	33,91	0,504	67,272
7	0,0004592	2,710	1,694E-04	18	0,875	2,3	4	33,84	0,531	63,774
8	0,0004910	2,904	1,691E-04	18	0,875	2,4	3	33,77	0,554	60,984
9	0,0004950	2,936	1,686E-04	22	0,863	2,5	2	33,67	0,569	59,180
10	0,0004960	2,946	1,684E-04	22	0,863	2,6	2	33,63	0,592	56,826

Fuente: Bòsquez D., Yumi C., 2011

TABLA 3.5-3
RESULTADOS

N	C _{entrada} (ug/m ³)	%C _{ent}	C _{salida} (ug/m ³)	% C _{sal}	y ₁	y ₂	x ₁	y*	(y-y*) _f	(y-y*) _M
1	405277,55	0,048	1568,82	0,0001846	0,0002162	0,000000836	0,000002673	0,0001201	0,00009603	2,007E-05
2	404754,61	0,048	1566,79	0,0001843	0,0002159	0,000000835	0,000002675	0,0001202	0,00009569	2,001E-05
3	402662,86	0,047	1558,69	0,0001834	0,0002148	0,000000831	0,000002829	0,0001271	0,00008761	1,863E-05
4	402139,92	0,047	1556,67	0,0001831	0,0002145	0,000000830	0,000002973	0,0001336	0,00008090	1,748E-05
5	402662,86	0,047	1558,69	0,0001834	0,0002148	0,000000831	0,000003156	0,0001418	0,00007295	1,612E-05
6	399525,22	0,047	1546,55	0,0001819	0,0002131	0,000000824	0,000003155	0,0001418	0,00007130	1,580E-05
7	396387,59	0,047	1534,40	0,0001805	0,0002114	0,000000818	0,000003302	0,0001484	0,00006303	1,432E-05
8	402662,86	0,047	1558,69	0,0001834	0,0002148	0,000000831	0,000003508	0,0001576	0,00005713	1,331E-05
9	405277,55	0,048	1568,82	0,0001846	0,0002162	0,000000836	0,000003638	0,0001635	0,00005266	1,251E-05
10	405277,55	0,048	1568,82	0,0001846	0,0002162	0,000000836	0,000003789	0,0001703	0,00004589	1,125E-05

Fuente: Bòsquez D., Yumi C., 2011

TABLA 3.5-4**RESULTADOS**

n	N_{OG}	H_{OG} (m)	G_v (Kg/h)	KG (Kg/h m²)	KG (Kg-mol/h m²)
1	10,729	0,122	12,414	4,230	0,146
2	10,748	0,122	12,414	4,237	0,146
3	11,483	0,114	13,156	4,797	0,165
4	12,220	0,107	13,813	5,360	0,185
5	13,275	0,099	14,619	6,163	0,213
6	13,432	0,098	14,619	6,236	0,215
7	14,707	0,089	15,389	7,187	0,248
8	16,076	0,081	16,058	8,198	0,283
9	17,210	0,076	16,500	9,018	0,311
10	19,140	0,068	17,160	10,430	0,360

Fuente: Bòsquez D., Yumi C., 2011

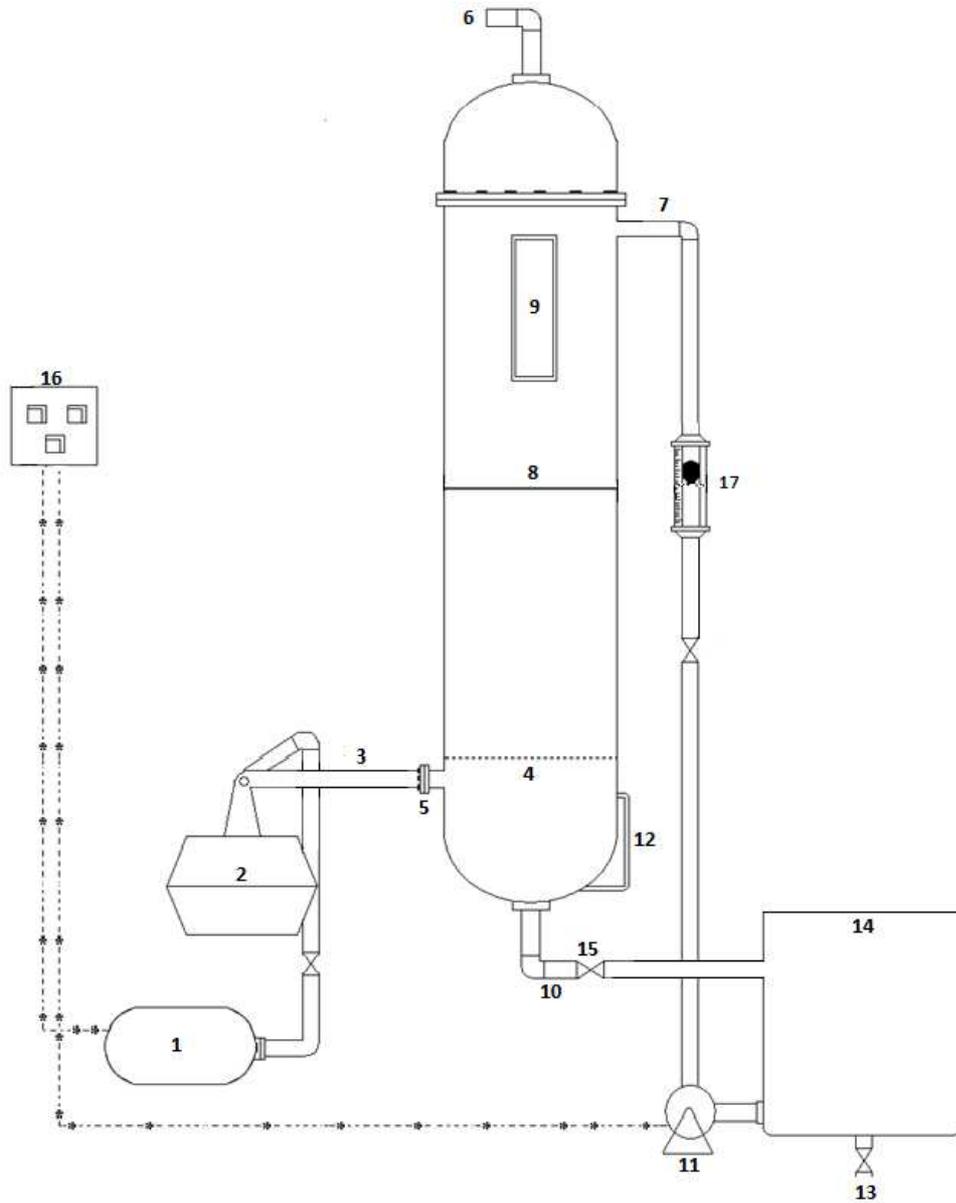
3.6.PROPUESTA DE DISEÑO

**TABLA 3.6-1
DIMENSIONAMIENTO DE LA TORRE**

DESCRIPCIÓN	VARIABLE	INDICADOR
COLUMNA DE ABSORCIÓN		
Volumen	0,092	m ³
Altura	1,31	m
Diámetro	0,30	m
Material	Acero AISI 304	--
CÁMARA DE COMBUSTIÓN		
Diámetro	0,52	m
Altura	0,20	m
Material	Acero AISI 304	--
DISTRIBUIDOR DEL AGUA		
Diámetro del orificio	0,003	m
Diámetro del distribuidor	0,28	m
Diámetro del redistribuidor	0,30	m
Espesor del redistribuidor	0,01	m
Material	Acero AISI 304	--
RELLENO		
Diámetro	0,02	m
Altura	0,04	m
Material	Vidrio	--
Área superficial	340	m ² /m ³
SOPORTE DE RELLENO		
Diámetro del agujero	0,01	m
Material	Acero AISI 304	--

Fuente: Bósquez D, Yumi C, 2011

3.6.1. DISEÑO DE LA TORRE DE ABSORCIÓN



- | | | |
|--------------------------|---|--|
| 1. Compresor | 7. Entrada del líquido | 13. Drenaje de líquido |
| 2. Campana de Combustión | 8. Columna | 14. Tanque de líquido disolvente |
| 3. Entrada del gas | 9. Mirilla interna de la columna | 15. Válvulas de esfera |
| 4. Soporte del relleno | 10. Salida mezcla líquido-gas | 16. Control de encendido (bomba y compresor) |
| 5. Brida | 11. Bomba Centrífuga | 17. Flujómetro de líquido |
| 6. Salida del gas limpio | 12. Mirilla del líquido fondo de la torre | |

3.7.CONSTRUCCIÓN DE LA TORRE

a. Cuerpo de la torre.

Para la construcción del cuerpo de la torre se compró 2 planchas de acero inoxidable de AISI 304 2B de 122 x 244 *cm*. Se elaboró cuatro perforaciones: de 2 *cm* para la entrada y la salida del líquido y dos de 5,2 *cm* para la entrada y salida del gas. Se valoró y luego se soldó la lámina, quedando terminado el cilindro.

b. Cono Superior.

Con una lámina de acero inoxidable de 30 *cm* se fabricó el cono superior, y se le incorporó un sistema de brida para acoplar a este con el cuerpo de la torre. Además el cono posee un tubo para la salida del gas, el mismo que tiene un orificio de 5,2 *cm* para la toma de muestra del gas parcialmente limpio.

c. Fondo de la Torre.

En este sitio se le dio una forma cónica hacia el agujero de salida del líquido absorbente de manera que se forme una acumulación de líquido y evite la fuga del gas a tratar.

d. Soporte del relleno.

Es necesario que en el fondo exista un espacio adecuadamente amplio para una buena distribución del gas en el empaque, en consecuencia el empaque debe quedar soportado sobre este espacio abierto, para lo cual se utilizó una lámina de acero inoxidable perforada con un diámetro de 1 *cm* y un espesor de 5 *mm*, suficientemente fuerte para soportar el peso del empaque.

e. Distribuidor del líquido lavador.

Es muy conocida la importancia de la adecuada distribución del líquido en la parte superior del empaque, ya que, un empaque seco no es efectivo para la transferencia de masa. Para tal efecto se construyó un distribuidor usando un tubo de acero inoxidable dándole la forma de una ducha perforada con un diámetro de 3 mm.

f. Redistribuidor.

Generalmente el líquido tiende a segregarse a las paredes y el gas a fluir por el centro de la torre. Dicha tendencia se logra evitar colocando un redistribuidor, el mismo que fue construido de lámina de acero inoxidable, dándole la forma de un cono truncado y ubicado en la mitad de la altura del lecho.

g. Campana para la combustión del azufre.

Se elaboró un cono de lámina de acero inoxidable, y en la parte superior se colocó un tubo que permita el ingreso del gas a limpiar. En este tubo se ubicó un sistema de funcionamiento similar a una trampa de agua, de manera que el aire producido por un compresor produzca la succión del SO_2 generado al quemar el azufre formándose una mezcla SO_2 -aire, misma que ingresa a la torre para ser limpiada.

h. Soporte.

Para la estructura metálica del soporte de la torre de absorción se utilizó tubo rectangular de acero inoxidable dándole la forma necesaria para sostener el equipo, y además se le colocó en la base un sistema de ruedas para su movilización.

3.8.ANÁLISIS DE COSTOS

3.8.1. COSTOS DE INVERSIÓN

Los costos de inversión hacen referencia a todos los materiales, equipos adquiridos para la construcción de la Torre de Absorción, además los costos de transporte. En la tabla 3.8.1-1 se detallan cada uno.

TABLA. 3.8.1-1
COSTOS DE INVERSIÓN

Denominación	Cantidad	Valor unitario	Subtotal
Plancha de acero inoxidable AISI 304 (1,5 mm)	2	200	400
Resistencia eléctrica	1	24	24
Compresor	1	190	190
Switch ON/OFF (caja fusible)	1	20	20
Switch ON/OFF	1	3	3
Anemómetro	1	289	289
Alambres, sujetadores	-	18	18
Gasfitería	-	150	150
Enchufe (bifásico)	2	3	3
Medidor de Volumen	1	10	10
Tanque	1	30	30
Transporte	-	300	300
TOTAL			\$1437

Fuente: Bósquez D, Yumi C, 2011

3.8.2. COSTOS DE OPERACIÓN

Para estimar los costos de operación es importante conocer las condiciones de operación del equipo.

TABLA. 3.8.2-1
COSTOS DE OPERACIÓN

Denominación	Costo
Construcción de la torre	550
Construcción del soporte	150
Mantenimiento	50
TOTAL	\$ 750

Fuente:Bósquez D, Yumi C, 2011

3.8.3. COSTO TOTAL

Es la suma de los dos costos

$$C_T = C_i + C_o \quad \text{Ec. 3.8.3-1}$$

$$C_T = 1437 + 750$$

$$C_T = 2187 \text{ dólares}$$

3.8.4. DEPRECIACIÓN DEL EQUIPO

El costo total de la construcción de la torre asciende a 2187 dólares; tomando en cuenta que su vida útil es de 10 años.

En la Ley del Impuesto sobre la Renta se establecen los siguientes porcentajes de depreciación:

- 10% Maquinaria y equipo
- 5% Construcciones
- 25% para vehículos de transporte
- 30% para equipo de cómputo electrónico
- 10% para mobiliario y equipo de oficina

✓ 2187 DEL EQUIPO A DEPRECIAR

✓ 10% PORCENTAJE DE DEPRECIACIÓN

$$2187 * 10\% = 218,7$$

✓ 12 MESES A DEPRECIAR

$$218,7/12 = \$ 18,225$$

✓ 120 MESES COMO LIMITE MÁXIMO

$$218,7/120 = 1,8225 \text{ CADA MES}$$

3.9. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Obtenido el KG de 4,230 Kg/hm² en el primer ensayo y un KG de 10.430 Kg/hm² en el último. Al comparar estos dos resultados, en el primer caso la transferencia entre el líquido y el gas contaminante es adecuada debido a la baja velocidad de entrada de 1.9 m/s, da un mayor rozamiento entre el líquido y el gas, con lo que el tiempo de residencia dentro de la torre va ser mayor teniendo así una intensificación de los flujos a contracorriente.

En el segundo caso si la velocidad del gas se eleva a 2.6 m/s la fuerza de rozamiento entre el gas y el líquido es suficiente como para equilibrar la fuerza de gravedad del líquido descendente, se establece una capa continua del líquido en el interior del relleno, en el cual burbujea el gas produciéndose así una destrucción del soluto absorbido formando un compuesto (H₂SO₃) el cual reduce la presión parcial en el equilibrio del soluto y, en consecuencia, aumenta la diferencia de concentración entre el gas y la interface, aumentando la rapidez de absorción, y, por ende el coeficiente total de transferencia de masa, debido a la recirculación en el equipo ya que el líquido llegara a un punto en que se saturara.

Las velocidades para que exista una buena transferencia de masa en el equipo construido se mantendrá en estos intervalos de 1.9 – 3.5 m/s como máximo, ya que si el gas entra a velocidades muy elevadas, como para que resulten importantes las fuerzas de rozamiento

entre el gas y el líquido, la corriente líquida resulta frenada, aumenta el espesor de la película y la cantidad de líquido retenido en el relleno, aumentando la superficie mojada del relleno, de este modo aparecen remolinos, salpicaduras con pequeños borboteos de gas en el líquido, disminuyendo la intensidad del proceso de transferencia de masa y tiempo de residencia del gas en el interior de la columna.

Unos de los objetivos era conseguir la máxima transferencia con un mínimo consumo de energía y tamaño de columna, observando los resultados obtenidos se puede decir que se ha cumplido con el objetivo planteado, ya el tiempo en tratar una cantidad determinada de gas es de 6,40 min por cada 155 ppm de concentración a la entrada de la torre y un 0.6 ppm a la salida dándonos una eficiencia de 99.6 % consiguiendo así una absorción máxima de 10.43 Kg/hm^2 en una torre de 1.31 m de altura, con materiales de alta calidad y reciclables como lo es el vidrio, el cual, es el empaque de la torre.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- ✓ Por las características del equipo, no fue posible trabajar con caudales menores que 0,164 L/s, debido a que los cuerpos de relleno no se humedecen en su totalidad; por lo tanto no existe el suficiente contacto interfacial, para que se produzca la transferencia de masa adecuada.
- ✓ Para el diseño del equipo se determinó las variables como son: Temperatura 25 C, Concentración del gas entrada y salida 155 y 0.6 ppm respectivamente y la relación líquido - gas de 44.93.
- ✓ Con la especificación de la altura de la torre de 1,31 m tomada de bibliografía, se determinó el diámetro de 0,30 m; dando un $N_{OG} = 19,140$ y $H_{OG} = 0.068$ m.
- ✓ El coeficiente total de transferencia de masa (K_G) es de $10,43 \text{ Kg/h.m}^2$, el cual, indica que existe una buena transferencia de masa que es corroborado con la eficiencia del equipo.
- ✓ La eficiencia del equipo es del 99,6 %; cumpliendo de esta manera con los objetivos planteados al inicio de la investigación.

4.2.RECOMENDACIONES

- ✓ Para la utilización del equipo se recomienda humedecer los rellenos durante 40 s, para tener un buen contacto interfacial.
- ✓ Como liquido absorbente más barato utilizar agua destilada para obtener una máxima transferencia entre componentes.
- ✓ No utilizar químicos que sean afín con el vidrio, podrían dañar los rellenos.
- ✓ Para realizar la absorción de otros tipos de gases de combustión se recomienda se hagan los estudios pertinentes para tratarlos en la columna, como la solubilidad del gas en el líquido, solvente y material de relleno a fines a los componentes a tratar.
- ✓ Trabajar a velocidades razonables descritas en la discusión de resultados para obtener los datos deseados en el tratamiento del gas contaminante.
- ✓ Verificar que todas conexiones de funcionamiento del equipo estén en buen estado.
- ✓ Para un buen desempeño del equipo darle el respectivo mantenimiento luego de cada práctica realizada.

- ✓ Si las emisiones gaseosas de las chimeneas contienen algún producto de valor económico y es factible su recuperación, se debe considerar esta posibilidad antes de proceder a su eliminación.

- ✓ Se recomienda se hagan diferentes estudios para eliminar otros gases contaminantes procedentes de las chimeneas, en base a procesos de absorción.

- ✓ Se recomienda que el licor que produce la torre sea sometido a un proceso de tratamiento en una torre de ladrillo, en donde su parte interna está blindada con plomo para posteriormente este fluido llevarlo a temperaturas elevadas y hacerle reaccionar con óxidos de nitrógeno para obtener Ácido Sulfúrico.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

➤ CITAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) GASES DE COMBUSTIÓN

http://www.as-sl.com/pdf/tipos_gases.pdf

2011 02

(2) ANHÍDRIDO SULFUROSO

http://es.wikipedia.org/wiki/anhídrido_sulfuroso.

2011 02

(3) OCON, P. y TOJO, J. Problemas de Ingeniería Química. México, Aguilar, 1980.

Pp. 3

(4) PROCESO DE ABSORCIÓN

http://www.duppsbv.com/proceso_de_absorcion.html

2011 02

(5) FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE ABSORCIÓN

http://es.wikipedia.org/wiki/Absorci%C3%B3n_%28qu%C3%ADmica%29.

2011 02

(6) TREYBAL, R. Operaciones de Transferencia de Masa. México, McGraw-Hill,

1988. Pp. 313-314.

(7) CARACTERÍSTICAS DE LOS RELLENOS

http://es.wikipedia.org/wiki/equipos_de_contacto

2011 02

- (8) BRITO, H. Texto Básico de Operaciones Unitarias II. Riobamba-Ecuador, 2006. Pp. 69-70. (Folleto Compilado).
- (9) McCABE, W.; SMITH, J. y HARRIOT, P. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. 4^{ta}. ed. México, Continental, 1970. Pp. 19-25.
- (10) BIRD, B.; STEWART, E. y LIGHTFOOT, N. Fenómenos de Transporte. México, Reverte, 1992. Pp. 2-10.
- (11) OCON, P. y TOJO, J. Problemas de Ingeniería Química. México, Aguilar, 1980. Pp. 4-27.

➤ GENERAL

- BIRD, B.; STEWART, E. y LIGHTFOOT, N. Fenómenos de Transporte. México, Reverte, 1992.
- BRITO, H. Texto Básico de Operaciones Unitarias II. Riobamba-Ecuador, 2006. (Folleto Compilado).
- OCON, P. y TOJO, J. Problemas de Ingeniería Química. México, Aguilar, 1980.
- KING, C. Procesos de Separación. Barcelona, McGraw Hill, 1990.
- TREYBAL, R. Operaciones de Transferencia de Masa. México, McGraw-Hill, 1988.

➤ ESPECÍFICA

- OCON, P. y TOJO, J. Problemas de Ingeniería Química. México, Aguilar, 1980.
Pp. 3
- TREYBAL, R. Operaciones de Transferencia de Masa. México, McGraw-Hill, 1988. Pp. 313-314

➤ BIBLIOGRAFÍA INTERNET

✓ ABSORCIÓN DE GASES

http://www.indec.cl/absorcion_de_gases_13.html

http://www.duppsbv.com/proceso_de_absorcion.html

http://es.wikipedia.org/wiki/Absorci%C3%B3n_%28qu%C3%ADmica%29

http://es.wikipedia.org/wiki/equipos_de_contacto

http://www.cepis.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/orienta2/lecc8/lecc8_2f.html.

2011 02

✓ ANHÍDRIDO SULFUROSO

http://es.wikipedia.org/wiki/anhidrido_sulfuroso.

2011 02

✓ COMBUSTIÓN DE GASES

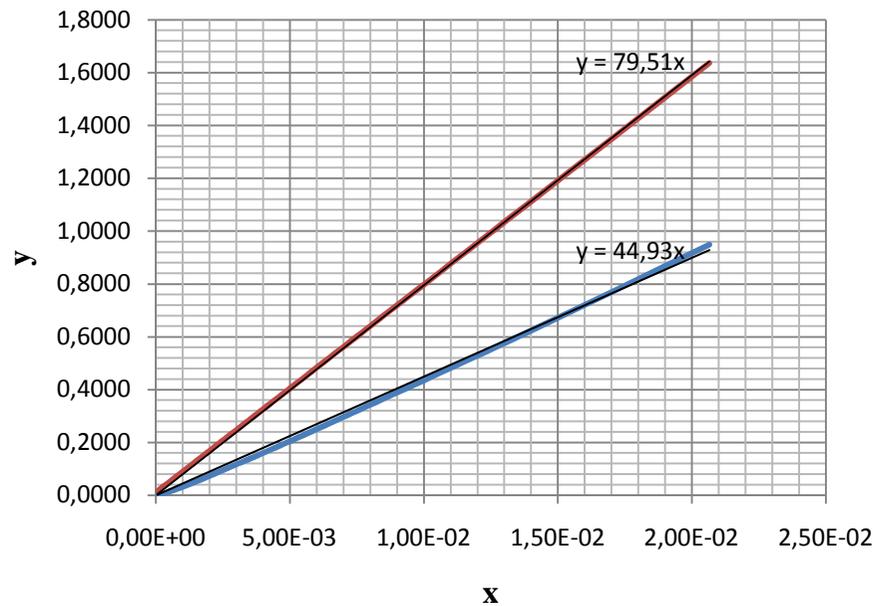
<http://www.textoscientificos.com/química/combustión>

<http://www.biodisol.com/medio-ambiente/tipos-de-gases-producidos-en-la-combustión-y-sus-consecuencias-contaminantes-ambiente-efecto-invernadero>.

2011 02

ANEXOS

ANEXO I
DIAGRAMA $y = f(x)$



NOTAS	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA	ESPOCH FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA	DIAGRAMA $y = f(x)$		
	Por calificar <input type="checkbox"/> Para información <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Para archivar <input type="checkbox"/> Por eliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/>	Realizado por: Bósquez Dany Yumi Carolina	Lámina	Escala	Fecha
	1			06/06/11	

ANEXO II

DIAGRAMA DE FACTOR DE COMPRESIBILIDAD VS. PRESIÓN REDUCIDA

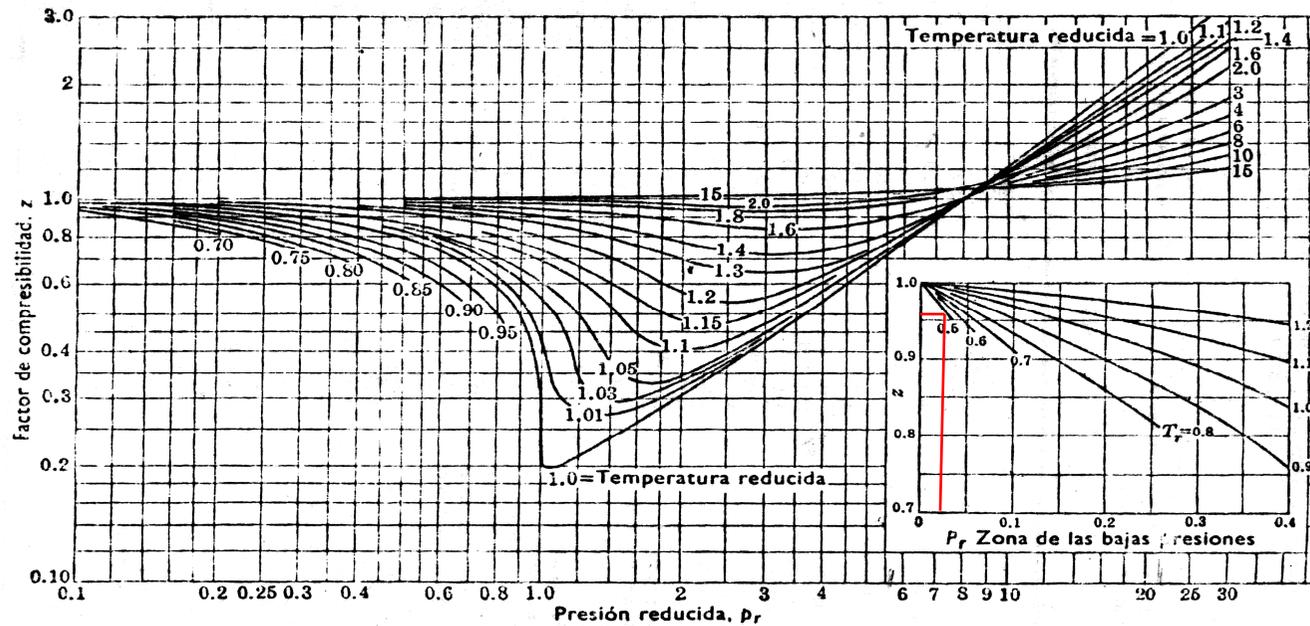
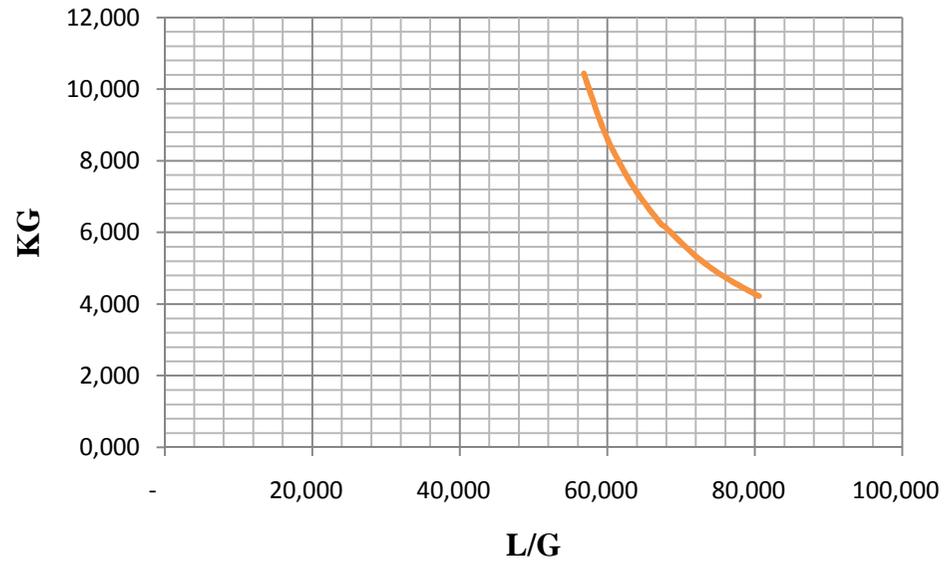


Fig. 550. Valores del coeficiente de compresibilidad, z , en función de la temperatura reducida, que figura en la ecuación $PV = znRT$ para gases. (Hougen and Watson, *Chemical Process Principles*, John Wiley and Sons, 1948.)

NOTAS	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA	ESPOCH FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA	DIAGRAMA DE FACTOR DE COMPRESIBILIDAD VS. PRESIÓN REDUCIDA		
	Por calificar <input type="checkbox"/> Para información <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Para archivar <input type="checkbox"/> Por eliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/>	Realizado por: Bósquez Dany Yumi Carolina	Lámina	Escala	Fecha
			2		06/06/11

ANEXO III

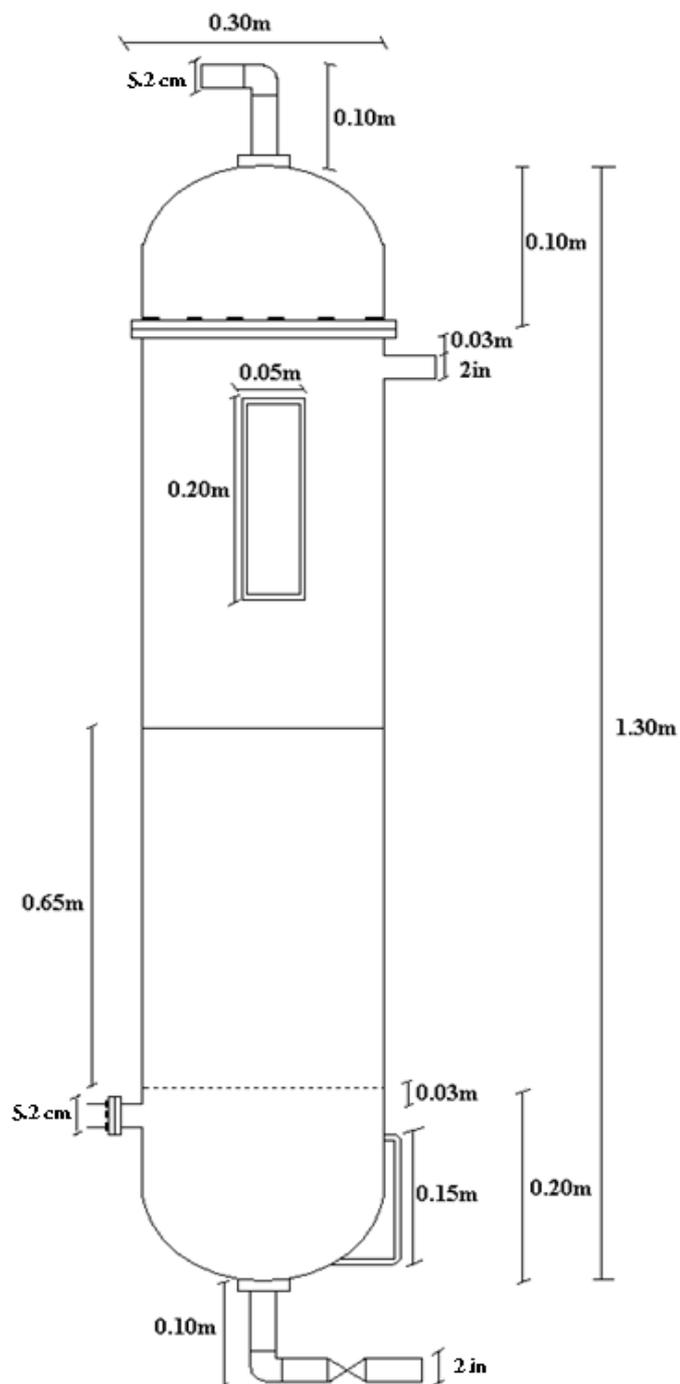
DIAGRAMA KG= f(L/G)



NOTAS	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA	ESPOCH	DIAGRAMA KG= f(L/G)		
	Por calificar <input type="checkbox"/> Para información <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Para archivar <input type="checkbox"/> Por eliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/>	FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA Realizado por: Bósquez Dany Yumi Carolina	Lámina	Escala	Fecha
			3		06/06/11

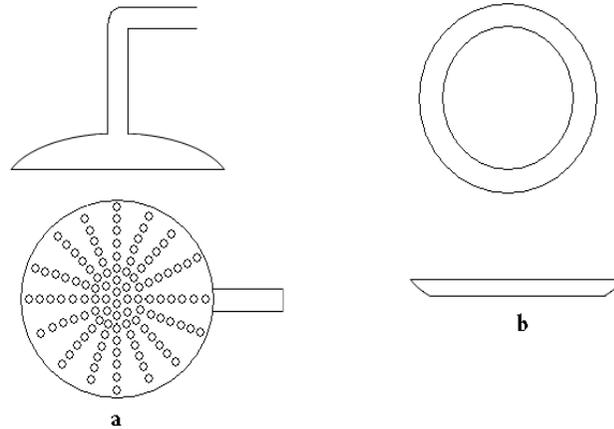
ANEXO IV

DIMENSIONES DE LA COLUMNA



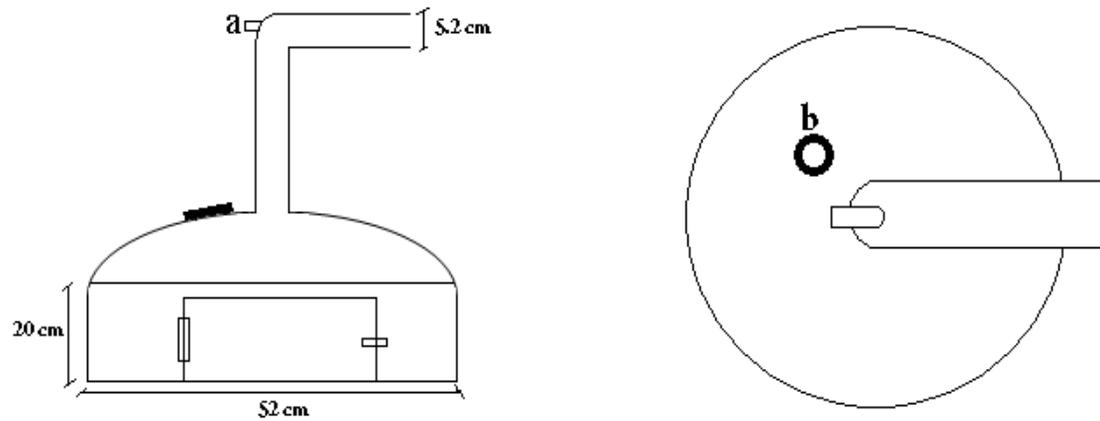
NOTAS	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA	ESPOCH FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUÍMICA Realizado por: Bósquez Dany Yumi Carolina	DIMENSIONES DE LA COLUMNA		
			Lámina	Escala	Fecha
	Por calificar <input type="checkbox"/> Para información <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Para archivar <input type="checkbox"/> Por eliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/>		4		06/06/11

**ANEXO V
DISTRIBUIDOR DE AGUA**



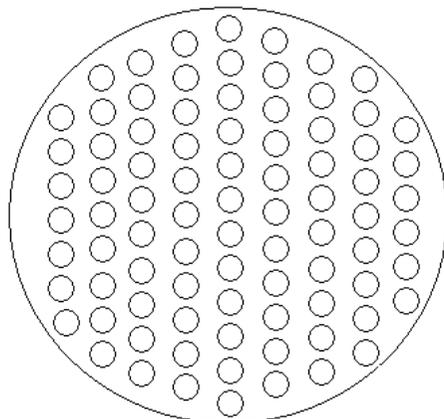
NOTAS	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA	ESPOCH FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA	DISTRIBUIDOR DE AGUA		
a: Distribuidor de agua b: Redistribuidor de agua	Por calificar <input type="checkbox"/> Par <input type="checkbox"/> información <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Para archivar <input type="checkbox"/> Por eliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/>	Realizado por: Bósquez Dany Yumi Carolina	Lámina	Escala	Fecha
			5		06/06/11

ANEXO VI
CÁMARA DE COMBUSTIÓN

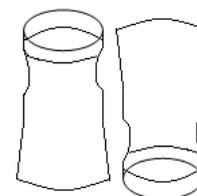


NOTAS	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA	ESPOCH FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA INGENIERÍA QUÍMICA Realizado por: Bósquez Dany Yumi Carolina	CÁMARA DE COMBUSTIÓN		
a: Entrada de aire. b: Mirilla de vidrio.	Por calificar <input type="checkbox"/> Para información <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Para archivar <input type="checkbox"/> Por eliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/>		Lámina	Escala	Fecha
			6		06/06/11

ANEXO VII
SOPORTE Y EMPAQUES



a



b

NOTAS	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA	ESPOCH	SOPORTE Y EMPAQUES		
<p>a: Soporte del relleno.</p> <p>b: Empaques de vidrio (picos de botella).</p>	<p>Por calificar <input type="checkbox"/> Para información <input type="checkbox"/></p> <p>Por aprobar <input type="checkbox"/> Para archivar <input type="checkbox"/></p> <p>Por eliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/></p>	<p>FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA INGENIERÍA QUÍMICA Realizado por: Bósquez Dany Yumi Carolina</p>	Lámina	Escala	Fecha
			7		06/06/11

**ANEXO VIII
CÁMARA DE COMBUSTIÓN Y COMPRESOR**



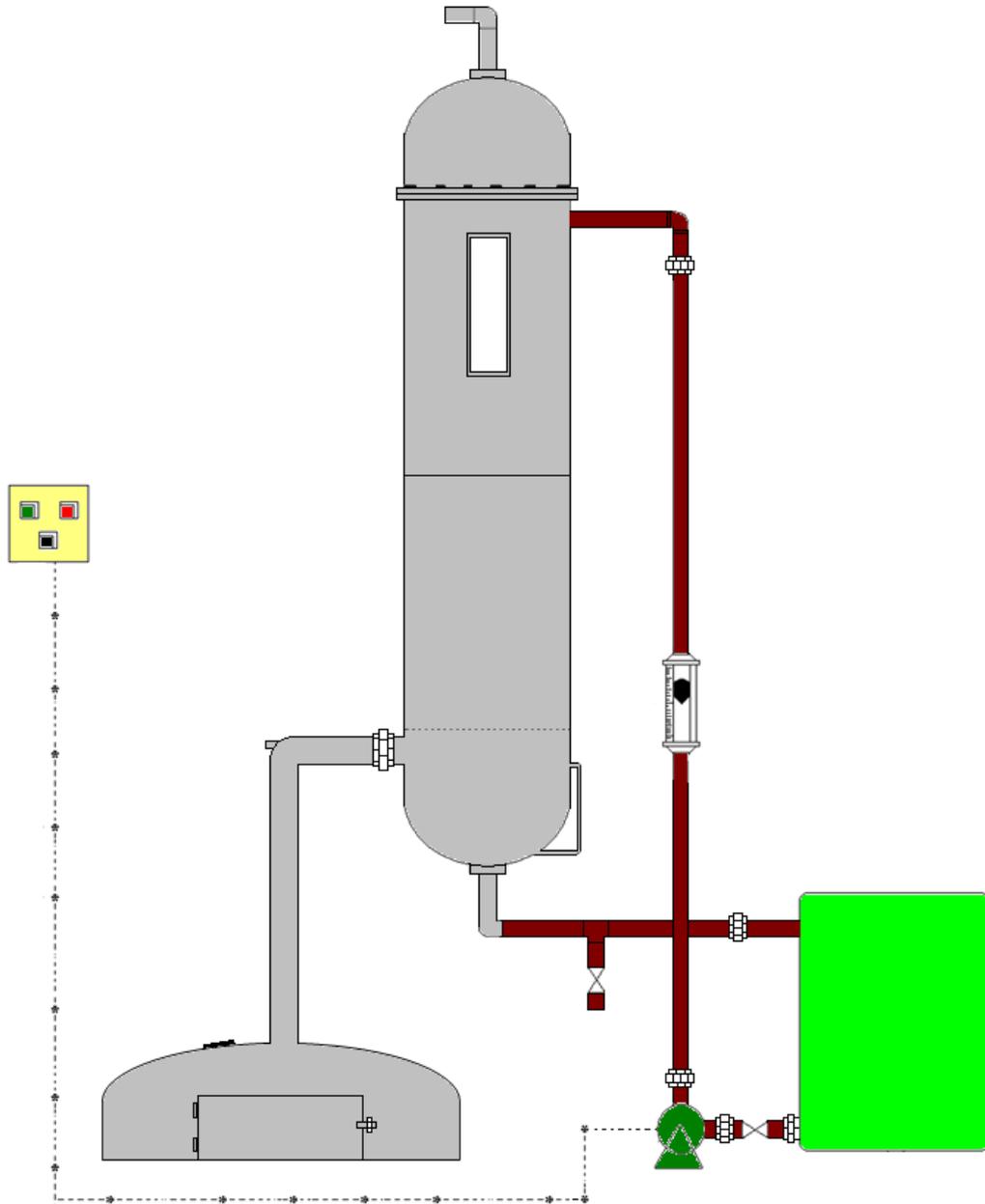
A



B

NOTAS	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA	ESPOCH FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA INGENIERÍA QUÍMICA Realizado por: Bósquez Dany Yumi Carolina	CÁMARA DE COMBUSTIÓN		
A: Cámara de combustión. B: Compresor.	Por calificar <input type="checkbox"/> Para información <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Para archivar <input type="checkbox"/> Por eliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/>		Lámina	Escala	Fecha
			8		06/06/11

ANEXO IX TORRE DE ABSORCIÓN



NOTAS	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA	ESPOCH	TORRE DE ABSORCIÓN		
	Por calificar <input type="checkbox"/> Para información <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Para archivar <input type="checkbox"/> Por eliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/>	FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUÍMICA Realizado por: Bósquez Dany Yumi Carolina	Lámina	Escala	Fecha
			9		06/06/11

ANEXO X
TORRE CONSTRUIDA



NOTAS	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA Por calificar <input type="checkbox"/> Para información <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Para archivar <input type="checkbox"/> Por eliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/>	ESPOCH FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUÍMICA Realizado por: Bósquez Dany Yumi Carolina	TORRE CONSTRUIDA		
			Lámina	Escala	Fecha
			10		06/06/11

ANEXO XI
MEDIDOR DE GAS “TESTO”



NOTAS	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA	ESPOCH FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA INGENIERÍA QUÍMICA	MEDIDOR DE GAS		
	Por calificar <input type="checkbox"/> Para información <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Para archivar <input type="checkbox"/> Por eliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/>	Realizado por: Bósquez Dany Yumi Carolina	Lámina	Escala	Fecha
			11		06/06/11