



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UNA COLUMNA
EMPACADA DE ABSORCIÓN DE GASES PARA LA MEZCLA BINARIA
AIRE-CO₂ EMPLEANDO COMO SOLVENTE UNA SOLUCIÓN DE
HIDRÓXIDO DE SODIO”**

PROYECTO DE GRADUACION

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presentado por:

Félix Manuel García Suárez

Karla Estefanía Reyes Vera

GUAYAQUIL – ECUADOR

2015

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por guiarnos diariamente en el transcurso de nuestra formación profesional y en todos los ámbitos y decisiones de la vida, por darnos la fortaleza necesaria para superar las adversidades y resolver las dificultades que se presentan, para así mejorar y alcanzar siempre las metas propuestas.

A nuestros padres por instruirnos y construir los pilares de nuestra esencia personal con sus enseñanzas y apoyo.

A nuestros abuelitos, por impulsarnos y motivarnos con su apoyo y ejemplo a siempre destacar dando nuestro mejor esfuerzo.

A nuestros profesores y colaboradores de la institución.

Al Ing. Raúl Serrano por su incondicional motivación y compartirnos sus conocimientos en todo momento.

A nuestro director de tesis Ing. Pablo Tejada por la guía en el desarrollo del presente trabajo.

.

DEDICATORIA

Yo, Félix Manuel García Suárez dedico este proyecto de grado a mi familia, especialmente a mis padres María y Manuel y mi abuelita Julia quienes me brindaron la fuerza e inspiración para seguir mis objetivos de vida.

Yo, Karla Estefanía Reyes Vera dedico esta tesis de grado a mi familia, especialmente a mi mamá Moly, a mi abuelito Artemires (+) y sobre todo a mi abuelita Leonor (+) que los amo profundamente y me han impulsado siempre a enfrentar los retos de la vida y alcanzar esta meta.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Oswaldo Valle
Decano FCNM

Ing. Pablo Tejada
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Carlos Balladares
VOCAL PRINCIPAL

PhD. Fernando Morante
VOCAL ALTERNO

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual, de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”
(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

Félix Manuel García Suárez

Karla Estefanía Reyes Vera

RESUMEN

La absorción gaseosa es una operación unitaria en la cual predomina el fenómeno de transferencia de materia en la cual, una mezcla de gases se pone en contacto, ya sea de manera paralela o en contra corriente, con un líquido puro o en solución, en el que esta mezcla de gases, que contiene el soluto a extraer, es más o menos soluble.

El presente proyecto enfoca su objetivo en el diseño, construcción y puesta en marcha de una columna empacada de absorción gaseosa para la mezcla binaria aire-CO₂ y utilizando como solvente una solución acuosa y diluida de Hidróxido de Sodio con una concentración 0,0025N. El sistema en mención hace referencia a una operación unitaria con transferencia de masa que se produce con una reacción química, para lo cual se efectuaron los cálculos de la cantidad de moles absorbidos en base a la constante de Henry y la presión parcial del componente en la mezcla. De esta manera al realizar el balance de masa teórico se determinaron los flujos molares de ingreso y salida de la torre. Una vez realizados estos cálculos se procedió a obtener la gráfica que registrará el desenvolvimiento de la operación unitaria, así junto con el coeficiente de transferencia de masa, propio del sistema, y la elección del tipo de relleno idóneo acorde a nuestro requerimiento y a la naturaleza de las corrientes, se calcularon los parámetros de diseño, para la construcción,

tales como volumen de relleno, altura del relleno, altura y diámetro de la torre.

En el cumplimiento de los requerimientos de la columna se determina un dimensionamiento de 1 m de longitud de relleno por 20 cm de diámetro, cuyo sustento teórico se encuentra desarrollado en el capítulo correspondiente a cálculos de diseño, del presente proyecto, además la altura total de la torre de 1,87m la cual incluye las dos cámaras; de dispersión del gas y distribución del líquido, así como también el espacio vacío en cada separación de los cuerpos de relleno. La absorción prevista, para un flujo de mezcla gaseosa a 5% de CO₂, es de 0,0009 Kmol/h en las condiciones de operación de la columna a 1 atm de presión y con una temperatura de 27°C. La absorción se seguirá con el muestreo del flujo líquido de salida en la parte inferior de la columna, a través de la medición de pH y usando el método analítico de titulación de la misma, así se obtendrán dos mediciones relevantes; CO₂ combinado y libre, cuyos valores serán 0,0000650 y 0,000882 respectivamente, dando, la suma de ambos, el valor total de 0,0009 Kmol/h de CO₂ absorbidos por el sistema, lo cual demuestra el cumplimiento satisfactorio de los objetivos didácticos y operacionales propuestos en el transcurso del trabajo.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	I
DEDICATORIA	II
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN	III
DECLARACIÓN EXPRESA	IV
RESUMEN	V
ÍNDICE GENERAL	VII
SIMBOLOGIA	XII
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABLAS	XVI
INTRODUCCION	1
1. GENERALIDADES	4
1.1. ANTECEDENTES	4
1.2. JUSTIFICACIÓN	5
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
1.4. HIPÓTESIS	9
1.5. OBJETIVOS	9
1.5.1. <i>Objetivo general</i>	9
1.5.2. <i>Objetivos específicos</i>	10
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1. ABSORCIÓN GASEOSA	11
2.2. MECANISMO DE ABSORCIÓN	13

2.2.1.	<i>Contacto de equilibrio en una etapa</i>	15
2.3.	DATOS DE EQUILIBRIO DE REACCIÓN GAS- LÍQUIDO PARA EL SISTEMA.....	17
2.4.	DEFINICIÓN DE COLUMNAS EMPACADAS Y DE PLATOS.....	18
2.4.1.	<i>Columnas de platos</i>	19
2.4.2.	<i>Columnas empacadas</i>	20
2.5.	DIFERENCIAS Y BENEFICIOS ENTRE LAS COLUMNAS EMPACADAS Y COLUMNAS DE PLATOS. 23	
2.6.	CARACTERÍSTICAS DEL EMPAQUE EN COLUMNAS DE ABSORCIÓN	27
2.7.	DISPOSICIÓN DEL EMPAQUE.....	31
2.7.1.	<i>Empaques al azar</i>	31
2.7.2.	<i>Empaques regulares</i>	32
2.8.	CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DEL DISOLVENTE	33
2.9.	USO INDUSTRIAL DE LA COLUMNA DE ABSORCIÓN GASEOSA.....	35
3.	ABSORCIÓN DE GASES CON REACCIÓN QUÍMICA	37
3.1.1.	<i>Proceso de absorción gaseosa con reacción química</i>	37
3.2.	ETAPAS DE REACCIÓN PARA EL SISTEMA CO ₂ - AIRE EN SOLUCIÓN ACUOSA DILUIDA DE NAOH.....	42
3.3.	PROPIEDADES DE LAS CORRIENTES A UTILIZAR (CO ₂ Y NAOH).....	44
3.3.1.	<i>Hidróxido de Sodio (NaOH)</i>	44
3.3.2.	<i>Dióxido de Carbono (CO₂)</i>	48
4.	CÁLCULOS DE DISEÑO	53
4.1.	GENERALIDADES.....	53
4.1.1.	<i>Balance de materia en columnas empacadas</i>	53
4.1.2.	<i>Balance diferencial</i>	56
4.1.3.	<i>Determinación de Variables de proceso</i>	57
4.1.4.	<i>Ecuación general de cálculo para columnas empacadas</i>	58

4.1.5.	<i>Absorción con reacción química</i>	61
4.1.6.	<i>Cálculos de diseño</i>	64
4.1.7.	<i>Dimensionamiento del equipo</i>	65
4.1.8.	<i>Caudal de gas a la entrada</i>	65
4.1.9.	<i>Área de la tubería de entrada</i>	66
4.1.10.	<i>Densidad componentes gaseosos</i>	67
4.1.11.	<i>Caudal de gas (G)</i>	71
4.1.12.	<i>Concentraciones del gas en porcentaje molar (mezcla)</i>	72
4.1.13.	<i>Presiones parciales del gas a la entrada</i>	72
4.1.14.	<i>Caudal del líquido a la entrada</i>	74
4.1.15.	<i>Caída de Presión</i>	75
4.1.16.	<i>Velocidad de Inundación</i>	75
4.1.17.	<i>Área transversal</i>	77
4.1.18.	<i>Relación L/G</i>	77
4.1.19.	<i>Recta de operación</i>	78
4.1.20.	<i>Concentración del líquido a la salida</i>	79
4.1.21.	<i>Número de unidades de transferencia (N_{OG})</i>	80
4.1.22.	<i>Altura de una unidad de transferencia (H_{OG})</i>	81
4.1.23.	<i>Coefficiente total de transferencia de masa K_L</i>	82
4.1.24.	<i>Datos de equilibrio</i>	83
4.1.25.	<i>Selección de cuerpo de empaque</i>	86
4.2.	DISEÑO DE LA COLUMNA DE ABSORCIÓN	88
4.2.1.	<i>Cálculo del caudal de gas a la entrada</i>	88
4.2.2.	<i>Cálculo del área de la tubería de entrada</i>	89
4.2.3.	<i>Cálculo de concentraciones del gas en porcentaje molar</i>	90
4.2.4.	<i>Cálculo de presiones parciales del gas de entrada</i>	90
4.2.5.	<i>Cálculo de caudal del líquido a la entrada</i>	91

4.2.6.	<i>Caída de Presión</i>	91
4.2.7.	<i>Velocidad de Inundación</i>	91
4.2.8.	<i>Área transversal</i>	92
4.2.9.	<i>Cálculo de la relación L/G</i>	92
4.2.10.	<i>Cálculo de la recta de trabajo</i>	93
4.2.11.	<i>Cálculo de la concentración del líquido a la salida</i>	94
4.2.12.	<i>Cálculo de Número de Unidades de Transferencia N_{OG}</i>	94
4.2.13.	<i>Cálculo del coeficiente global de transferencia de masa K_L</i>	95
4.2.14.	<i>Cálculo de Altura de Unidad de Transferencia H_{OG}</i>	96
4.2.15.	<i>Obtención de los datos de equilibrio</i>	97
5.	CARACTERÍSTICAS DE CONSTRUCCIÓN DE LA COLUMNA	99
5.1.	MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN Y DIMENSIONES DEL EQUIPO.....	99
5.2.	ELECCIÓN DEL RELLENO DE LA COLUMNA.....	102
5.3.	DIAGRAMA DE SISTEMA DE ABSORCIÓN GASEOSA CONSTRUIDO.....	104
5.4.	CONDICIONES DE OPERACIÓN.....	105
6.	REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE TRABAJO	107
6.1.	PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN DEL EQUIPO.....	107
6.2.	TOMA DE DATOS EN CAMPO.....	107
6.3.	DETERMINACIÓN DE CO_2 ABSORBIDO.....	110
6.3.1.	<i>Determinación del CO_2 libre:</i>	110
6.3.2.	<i>Determinación del CO_2 combinado.</i>	111
6.4.	PLAN DE MUESTREO.....	114
6.5.	RESULTADOS ESPERADOS.....	116
6.6.	DESENVOLVIMIENTO DEL EQUIPO.....	118
6.6.1.	<i>Resultados obtenidos</i>	118
6.7.	EFICIENCIA DEL EQUIPO.....	180

7. ANÁLISIS DE COSTOS PARA CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO	181
7.1. COSTOS DE INVERSIÓN.....	181
7.2. COSTOS DE OPERACIÓN	183
7.3. COSTO TOTAL	185
7.4. MANTENIMIENTO DEL EQUIPO.....	185
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	186
8.1. CONCLUSIONES	186
8.2. RECOMENDACIONES	193
ANEXOS	196
ANEXO I. CORRELACIÓN GENERALIZADA PARA LA CAÍDA DE PRESIÓN.....	197
ANEXO II. CORRELACIÓN GENERALIZADA ALTERNATIVA PARA LA CAÍDA DE PRESIÓN	198
ANEXO III. CARACTERÍSTICAS DE LOS EMPAQUES ALEATORIOS.....	199
ANEXO IV. ANEXO FOTOGRÁFICO	201
ANEXO V. MANUAL DE OPERACIONES.....	205
ANEXO VI. FICHAS TÉCNICAS	233
ANEXO VII. RANGOS DE FUNCIONAMIENTO.....	247
ANEXO VIII. RESUMEN ENSAYOS EXPERIMENTALES	248
BIBLIOGRAFIA	249

SIMBOLOGIA

°C	: Grados Celsius
mm	: Milímetro
cm	: Centímetro
m	: Metro
kg	: Kilogramo
g	: Gramo
mg	: Miligramo
l	: Litro
Kmol	: Kilomol
Lpm	: Litro por minuto
L_p	: Caudal líquido puro (Kmol/h.m ²)
G_p	: Caudal gas inerte (Kmol/h.m ²)
L₁	: Líquido y soluto a la salida (Kmol/h.m ²)
L₂	: Líquido y soluto a la entrada (Kmol/h.m ²)
G₁	: Gas inerte y soluto a la entrada (Kmol/h.m ²)
G₂	: Gas inerte y soluto a la salida (Kmol/h.m ²)
x₁ y x₂	: Fracción molar del gas en la fase líquida (mol/mol)
y₁ y y₂	: Fracción molar del soluto en la fase gaseosa (mol/mol)
X₁ y X₂	: Cocientes molares del gas en la fase líquida (mol/mol)
Y₁ y Y₂	: Cocientes molares del gas en la fase gaseosa (mol/mol)
p_i	: Presión parcial del componente (mmHg)
c_i	: Concentraciones del componente (g/g _{Total})

N_A	: Cantidad de componente que se transfiere de una fase a otra (Kg/h.m ²)
N_{OG}	: Número de unidades de transferencia
H_{OG}	: Altura de unidad de transferencia (m)
D	: Difusividad del soluto en la fase líquida (cm ² /s)
k_1	: Constante de velocidad de reacción
A	: Área superficial de la tubería (m ²)
Φ	: Diámetro de la tubería (m)
ρ	: Densidad del gas (Kg/m ³)
P	: Presión del gas (atm)
M	: Peso molecular del gas (Kg/Kg.mol)
R	: Constante universal de los gases (atm.m ³ /Kmol.K)
T	: Temperatura del gas (K)
Z	: Factor de compresibilidad (adimensional)
G	: Caudal del gas (Kmol/s)
U_{gas}	: Velocidad del gas (m/s)
A	: Área de tubería (m ²)
ρ_{gas}	: Densidad de gas (Kg/m ²)
M_{gas}	: Peso molecular del gas (Kg/Kmol)
i	: Componente de la mezcla gaseosa
P	: Presión parcial del componente (atm)
V	: Volumen de la mezcla (m ³)
η	: Número de moles del componente (Kmol)

T	: Temperatura de la mezcla (K)
[CO₂]	: Concentración CO ₂
P_{CO2}	: Presión parcial CO ₂ (atm)
ρ	: Densidad del líquido
Q	: Caudal del líquido (m ³ /h)
M	: Peso molecular del líquido (Kg/Kmol)
C_s	: Factor de capacidad (Adimensional)
F_p	: Factor de empaque (Anexo III)
V	: Viscosidad cinemática (cSt)
v_o	: Velocidad de operación del líquido (m/s)
m	: Pendiente de recta
L	: Caudal líquido (Kmol/h.m ²)
G	: Caudal del gas (Kmol/h.m ²)
Y	: Recta de operación
(L/G)	: Pendiente de recta de operación
x_i	: Concentración del líquido (mol/mol)
b	: Intersección de la recta.
m'	: Factor de corrección para mezclas enriquecidas (Adimensional)
K'_{ga}	: Coeficiente de transferencia de masa corregido (Kmol/m ³ .h)

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. CAMBIO DE CONCENTRACIÓN DEL COMPONENTE EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA DE LA DISTANCIA A LA INTERFASE	14
FIGURA 2. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UNA COLUMNA DE ABSORCIÓN GASEOSA. 16	
FIGURA 3. TORRE DE EMPAQUE AL AZAR.....	20
FIGURA 4. EMPAQUES COMUNES: A) ANILLOS RASCHIG; B) ANILLO METÁLICO PALL; C) ANILLO PLÁSTICO PALL; D) MONTURA BERL; E) MONTURA CERÁMICA INTALOX; F) MONTURA PLÁSTICA SUPER INTALOX.....	30
FIGURA 5. PERFIL DE CONCENTRACIÓN PARA ABSORCIÓN DE GASES CON REACCIÓN QUÍMICA.....	39
FIGURA 6. MECANISMO DE REACCIÓN PARA SISTEMA CO ₂ EN NaOH.	41
FIGURA 7. BALANCE DE MATERIA DE COLUMNA DE ABSORCIÓN.....	54
FIGURA 8. BALANCE DIFERENCIAL COLUMNA DE ABSORCIÓN.....	56
FIGURA 9. CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES DE LA MEZCLA GASEOSA A TRAVÉS DEL SOFTWARE FISICANET.....	70
FIGURA 10. DIMENSIONES DE COLUMNA DE ABSORCIÓN GASEOSA.....	103
FIGURA 11. DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE ABSORCIÓN GASEOSO.....	104
FIGURA 12. INDICADORES DE PH A UTILIZAR PARA TITULACIÓN Y DETERMINACIÓN DE ESPECIES ABSORBIDAS.....	112

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. SISTEMAS DE ABSORCIÓN GASEOSA DE IMPORTANCIA COMERCIAL.....	11
TABLA 2. ESPECIES PRESENTES EN LA CORRIENTE LÍQUIDA SEGÚN EL PH.....	43
TABLA 3. PROPIEDADES BÁSICAS DEL HIDRÓXIDO DE SODIO.	45
TABLA 4. PROPIEDADES BÁSICAS CO ₂	50
TABLA 5. COEFICIENTES K _L (LB/H.FT ³).....	82
TABLA 6. CAUDALES MOLARES DE ENTRADA Y SALIDA DE LA COLUMNA.....	91
TABLA 7. CÁLCULO DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE MASA.	95
TABLA 8. DATOS DE EQUILIBRIO DEL SISTEMA.	97
TABLA 9. DIMENSIONES DE COLUMNA DE ABSORCIÓN.	101
TABLA 10. CONDICIONES DE OPERACIÓN	105
TABLA 11. PLAN DE MUESTREO PARA EVALUACION DE COLUMNA DE ABSORCIÓN GASEOSA	115
TABLA 12. CONDICIONES DE OPERACIÓN, PRUEBA 1.	118
TABLA 13. CONDICIONES DE OPERACIÓN, PRUEBA 2.	120
TABLA 14. CONDICIONES DE OPERACIÓN, PRUEBA 3.	121
TABLA 15. CONDICIONES DE OPERACIÓN, PRUEBA 4.	122
TABLA 16. CONDICIONES DE OPERACIÓN, PRUEBA 5.	124
TABLA 17. CONDICIONES DE OPERACIÓN, PRUEBA 6.	126
TABLA 18. CONDICIONES DE OPERACIÓN, PRUEBA 7.	128
TABLA 19. CONDICIONES DE OPERACIÓN, PRUEBA 8.	130

TABLA 20.	CONDICIONES DE OPERACIÓN, PRUEBA 9.	132
TABLA 21.	CONDICIONES DE OPERACIÓN, PRUEBA 10.	134
TABLA 22.	CONDICIONES DE OPERACIÓN, PRUEBA 11.	136
TABLA 23.	CONDICIONES DE OPERACIÓN, PRUEBA 12.	138
TABLA 24.	RESULTADOS DE PH DE PRUEBA 12.	138
TABLA 25.	CONDICIONES DE OPERACIÓN, PRUEBA 13.	140
TABLA 26.	RESULTADOS CUANTITATIVOS DE PRUEBA 13.	140
TABLA 27.	DETERMINACIÓN DE VELOCIDAD DE REACCIÓN PRUEBA 14.	142
TABLA 28.	CONDICIONES DE OPERACIÓN, PRUEBA 14.	143
TABLA 29.	RESULTADOS CUANTITATIVOS DE PRUEBA 14.	143
TABLA 30.	DETERMINACIÓN DE VELOCIDAD DE REACCIÓN PRUEBA 14.	145
TABLA 31.	CONDICIONES DE OPERACIÓN, PRUEBA 15.	146
TABLA 32.	RESULTADOS CUANTITATIVOS DE PRUEBA 15.	146
TABLA 33.	DETERMINACIÓN DE VELOCIDAD DE REACCIÓN PRUEBA 15.	148
TABLA 34.	CONDICIONES DE OPERACIÓN, PRUEBA 16.	150
TABLA 35.	RESULTADOS CUANTITATIVOS DE PRUEBA 16.	150
TABLA 36.	DETERMINACIÓN DE VELOCIDAD DE REACCIÓN PRUEBA 16.	152
TABLA 37.	CONDICIONES DE OPERACIÓN, PRUEBA 17.	153
TABLA 38.	RESULTADOS CUANTITATIVOS DE PRUEBA 17.	153
TABLA 39.	DETERMINACIÓN DE VELOCIDAD DE REACCIÓN PRUEBA 17.	155
TABLA 40.	CONDICIONES DE OPERACIÓN, PRUEBA 18.	157

TABLA 41.	RESULTADOS CUANTITATIVOS DE PRUEBA 18.	157
TABLA 42.	DETERMINACIÓN DE VELOCIDAD DE REACCIÓN PRUEBA 18.	159
TABLA 43.	CONDICIONES DE OPERACIÓN, PRUEBA 19.	161
TABLA 44.	RESULTADOS CUANTITATIVOS DE PRUEBA 19.	161
TABLA 45.	DETERMINACIÓN DE VELOCIDAD DE REACCIÓN PRUEBA 19.	163
TABLA 46.	CONDICIONES DE OPERACIÓN, PRUEBA 20.	164
TABLA 47.	RESULTADOS CUANTITATIVOS PRUEBA 20.	164
TABLA 48.	DETERMINACIÓN DE VELOCIDAD DE REACCIÓN PRUEBA 20.	166
TABLA 49.	CONDICIONES DE OPERACIÓN, PRUEBA 21.	168
TABLA 50.	RESULTADOS CUANTITATIVOS PRUEBA 21.	168
TABLA 51.	DETERMINACIÓN DE VELOCIDAD DE REACCIÓN PRUEBA 21.	170
TABLA 52.	CONDICIONES DE OPERACIÓN, PRUEBA 22.	171
TABLA 53.	RESULTADOS CUANTITATIVOS PRUEBA 22.	171
TABLA 54.	DETERMINACIÓN DE VELOCIDAD DE REACCIÓN PRUEBA 22.	173
TABLA 55.	CONDICIONES DE OPERACIÓN, PRUEBA 23.	174
TABLA 56.	RESULTADOS CUANTITATIVOS PRUEBA 23.	174
TABLA 57.	DETERMINACIÓN DE VELOCIDAD DE REACCIÓN PRUEBA 23.	176
TABLA 58.	CONDICIONES DE OPERACIÓN, PRUEBA 24.	177
TABLA 59.	RESULTADOS CUANTITATIVOS PRUEBA 24.	177
TABLA 60.	DETERMINACIÓN DE VELOCIDAD DE REACCIÓN PRUEBA 24.	179
TABLA 61.	ANÁLISIS DEL SISTEMA TEÓRICO VS EXPERIMENTAL	180

TABLA 62. ANALISIS DE COSTOS DE INVERSION PARA CONSTRUCCION DE COLUMNA DE ABSORCIÓN DE GASES.....	181
TABLA 63. ESTIMACION DE COSTOS DE OPERACIÓN (CADA ENSAYO CON DURACION DE 20 MINUTOS).....	183
TABLA 64. COSTOS PARA 55 ENSAYOS (DISPONIBILIDAD EN TANQUE DE CO ₂)...	184
TABLA 65. COSTO TOTAL (DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA)	185

INTRODUCCION

A nivel de control de producción industrial, así como también a nivel de cuidado medio ambiental, las concentraciones de CO₂ en emisiones gaseosas deben ser reducidas puesto que su acumulación en la atmosfera contribuye al calentamiento global de la tierra, el cual es uno de las principales problemáticas que se desea confrontar.

La industria es responsable de la mayor tasa productiva de este gas durante sus actividades relacionadas con la quema con combustibles fósiles, los cuales poseen largas estructuras de hidrocarburos y por ende gran cantidad de carbono, por lo que su corriente residual corresponderían a toneladas de CO₂ que son enviados directamente al aire. Es por esto que el gobierno ha establecido medidas regulatorias para que esta cantidad de gases sea liberado bajo concentraciones máximas permitidas, una de las medidas para las empresas, para alcanzar este objetivo, es la utilización de estrategias de captura y recuperación del CO₂ desde la corriente gaseosa, utilizando sistemas físicos o sustancias químicas.

Existen otras aplicaciones industriales de importancia regulatoria, como lo es el endulzamiento del gas natural, cuyas tasas de CO_2 y compuestos azufrados deben ser removidos para evitar el deterioro de sus equipos de combustión y para disminuir las emisiones contaminantes al ser quemados.

La purificación de corrientes con sub productos contaminantes, como lo es el CO_2 se llevará a cabo en el presente proyecto de graduación, con el objetivo de que los futuros profesionales de la rama de Ingeniería Química puedan ilustrar sus conocimientos teóricos y aplicarlos en el campo laboral contribuyendo a la optimización de procesos industriales, recuperación del gas, cumplimiento de regulaciones ambientales y desarrollo sostenible de la producción.

Es por esto que se diseñó y construyó una columna que absorbe CO_2 en contracorriente, dotando de un nuevo equipo, al Laboratorio de Operaciones Unitarias de La Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas de la ESPOL, puesto que no contaba con uno, y estará a disposición de los estudiantes de la carrera para el complemento de su aprendizaje fomentando la implicación activa de los estudiantes en el desarrollo de las prácticas de laboratorio así como también su fortalecimiento profesional en realización de pruebas de campo y operación de

equipos industriales a pequeña escala o escala piloto, y así luego este proceso podría ser, por escalamiento, proyectado a tamaño industrial en pleno.

CAPITULO I

1. GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

El método de absorción gaseosa es una técnica antigua. La primera máquina de absorción fue construida en 1860 por Ferdinand Carré, una contribución exitosa en todo el mundo. Iniciando con máquinas que ofrecían un bajo rendimiento en la absorción, esta operación ha mejorado con el transcurso de los años incrementando la inversión tecnológica y capacidades.

Cada país aprovecha los beneficios de esta operación según sus necesidades, es así que los mayores productores de estos diseños, Japón y Estados Unidos, lo han instalado para usos tales como climatización doméstica o en edificios.

Industrialmente es usada para recuperación de corrientes gaseosas con valor económico o para purificar la misma retirando el componente contaminante, las cuales son mencionadas en la Tabla 1, así como también en la sección 2.9, titulada como “Uso industrial de la columna de absorción gaseosa”, en el presente trabajo.

Debido a su importancia comercial debe ser estudiada a fondo, a pesar de eso, la carrera de Ingeniería Química de la ESPOL no cuenta con ningún equipo de este tipo que haga posible la experimentación práctico-técnica,

1.2. Justificación

Desde hace varios años la Escuela Superior Politécnica del Litoral prepara a estudiantes universitarios en la carrera de Ingeniería Química donde la orientación práctica es un pilar fundamental para el posterior ejercicio de la profesión, por lo tanto, es indispensable contar con la instrumentación y maquinaria adecuada para el uso académico de los estudiantes, aunque sea una de las carreras más nuevas de la ESPOL.

La maquinaria de uso industrial debe siempre tener un especial cuidado en su manipulación, es por esto que el conocimiento de su uso debe ser impartido como complemento al material teórico; la preparación, su correcta puesta en marcha, toma de datos, seguridad industrial en su manipulación, detección de posibles fallas en su operación, troubleshooting, entre otros.

Siendo miembros activos de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas se percibe la necesidad del conocimiento práctico, observando que dentro del pensum académico se encuentra el aprendizaje de la operación unitaria de absorción gaseosa, muy importante dentro del campo industrial por sus diversos usos, pero el laboratorio no cuenta con el equipo apropiado para poder desarrollar esta práctica correctamente y lograr que los estudiantes palpén de manera real el funcionamiento e importancia de este equipo.

Es por esto que el presente proyecto propone el diseño y construcción de una columna de absorción de gases que, una vez terminada, pasará a formar parte del Laboratorio de Operaciones Unitarias ubicado en los predios de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

1.3. Planteamiento del problema

Una de las herramientas básicas para lograr la excelencia en la formación del Ingeniero Químico, es la aplicación práctica a nivel de laboratorio, de las Operaciones Unitarias aprendidas de manera teórica. El Laboratorio de Operaciones Unitarias es una infraestructura de docencia utilizada por los estudiantes para realizar sus prácticas correspondientes al complemento de ciertas materias, tales como Termodinámica, Transferencia de Calor, Operaciones Unitarias I y II, Flujo de Fluidos, entre otras. Este laboratorio ha ido implementándose con el paso de los años, y adquiriendo de a poco los equipos que se requieren; a pesar de esto, no existen todos los necesarios.

Incluso, en un futuro cercano, el mencionado Laboratorio de Operaciones Unitarias, puede llegar a certificar y brindar servicios no solo a la comunidad politécnica, sino también a nivel externo (Empresarial).

De manera específica, se dicta la clase teórica del tema de absorción gaseosa donde se puede percibir el problema principal, que el presente proyecto busca contribuir en su solución: la ausencia de un equipo de absorción gaseosa, a escala piloto, para el desarrollo de las prácticas dentro del Laboratorio de Operaciones Unitarias correspondiente a su asignatura teórica.

En síntesis, el problema práctico se detalla a continuación.

- ✓ **Problema práctico:** La facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas no cuenta con el equipo apropiado para poner en práctica los conocimientos teóricos adquiridos para la operación unitaria de absorción de gases, durante los años de estudio en la carrera de Ingeniería Química.
- ✓ **Pregunta de investigación:** ¿Cómo se puede aprender de manera práctica la operación unitaria de absorción de gases?
- ✓ **Problema de investigación:** Adquirir un equipo de absorción de gases para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas.

- ✓ **Respuesta de investigación:** Diseñar y construir un equipo de absorción de gases.

- ✓ **Aplicación al problema práctico:** Construir un equipo de absorción de gases de dimensiones tales para uso académico, por lo tanto será de tipo plan piloto

1.4. Hipótesis

Puede ser llevado a cabo con éxito el Diseño, Construcción y la Puesta en Marcha de una Columna de Absorción Gaseosa que permita su empleo, con fines educativos, en las Áreas del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la ESPOL

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Construir una columna empacada de absorción de gases, que opere con una mezcla de aire-CO₂ y Na(OH), en una solución acuosa diluida al 0,0025N, para uso y disposición de los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Química de la ESPOL en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

1.5.2. Objetivos 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
- ✓ Seleccionar los materiales óptimos para su construcción.
- ✓ Seleccionar el tipo de relleno que opere como la mejor superficie de contacto logrando el máximo de transferencia de componentes.
- ✓ Construir el equipo de absorción de gases.
- ✓ Realizar pruebas y estudio de su funcionamiento.
- ✓ Determinar los moles de CO_2 absorbidos a corrientes específicas de trabajo.

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Absorción gaseosa

Es una operación unitaria de transferencia de masa, usada con mucha frecuencia en la industria química y distintos procesos de manufactura, en donde un líquido se pone en contacto a contra corriente o de manera paralela con una corriente gaseosa la cual posee un soluto que quiere ser recuperado por tener algún valor o por ser un compuesto contaminante debe ser retirado de esta corriente. (1)

Existen varios sistemas de absorción gaseosa de importancia comercial los cuales se citan en la tabla a continuación:

Tabla 1. Sistemas de absorción gaseosa de importancia comercial.

Solutos	Solvente	Reactivo	Grado de importancia comercial		
			Alto	Medio	Bajo
CO ₂ , H ₂ S	Agua	-	X		
CO ₂ , H ₂ S	Agua	Monoetanolamina	X		
CO ₂ , H ₂ S	Agua	Dietalonamina	X		
CO ₂ , H ₂ S	Agua	Trietanolamina			X

CO ₂ , H ₂ S	Agua	Diaminoisopropanol			X
CO ₂ , H ₂ S	Agua	Metil dietalonamina			X
CO ₂ , H ₂ S	Agua	K ₂ CO ₃ , Na ₂ CO ₃	X		
CO ₂ , H ₂ S	Agua	NH ₃		X	
CO ₂ , H ₂ S	Agua	NaOH, KOH		X	
CO ₂ , H ₂ S	Agua	K ₃ PO ₄		X	
CO ₂	Agua	-	X		
HCl, HF	Agua	NaOH	X		
HCl, HF	Agua	-	X		
Cl ₂	Agua	-	X		
SO ₂	Agua	NH ₃		X	
SO ₂	Agua	Dimetil anilina		X	
SO ₂	Agua	Ca(OH), Oxígeno			X
NH ₃	Agua	-	X		
NO ₂	Agua	-	X		
HCN	Agua	NaOH	X		
CO	Agua	CuNH ₄	X		

Fuente: Tabla 14-1 chemical engineers hand book fourth edition by J.Perry

Puede haber dos tipos de absorción: física, si la separación es por disolución del componente rico en el gas en el solvente inerte, o química, si el compuesto que se quiere eliminar reacciona con el solvente seleccionado. (1)

2.2. Mecanismo de absorción

Para describir de manera más acertada el proceso de absorción se hace referencia a la teoría de dos películas de Whitman, la cual señala que en un sistema bifásico la materia es transferida por convección, mientras que las diferencias de concentración son consideradas insignificantes a excepción de la proximidad de la interfase. En la cercanías de cada lado de la interfase la convección es detenida y se forman sendas, o trayectorias que las partículas siguen para formar películas de fluido y transferir la materia por difusión molecular, siguiendo la ley de Fick que señala que la velocidad de transferencia por difusión es proporcional al gradiente de concentración y al área de la interfase en la que está ocurriendo la difusión. (2)

Se dice entonces que la dirección de la transferencia de materia a través de la interfase no depende de la diferencia de concentraciones entre las fases, depende de las relaciones de equilibrio, esto es, la diferencia de concentraciones de las fases con respecto a las del equilibrio. (2)

En la interfase el equilibrio se alcanza de manera instantánea, por lo que se asume que no hay resistencia en la transferencia de masa.

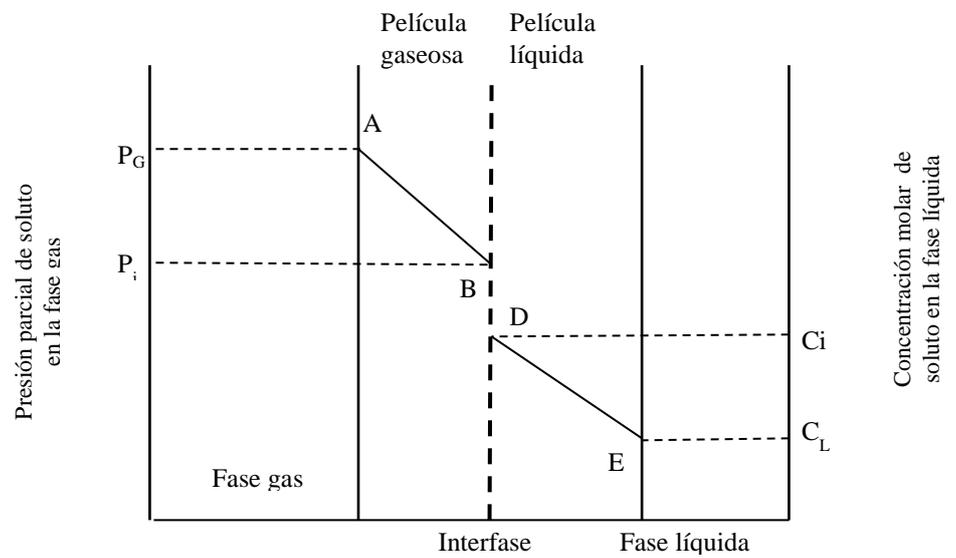


Figura 1. Cambio de concentración del componente en función de la distancia de la distancia a la interfase

Fuente: Introducción a las Operaciones de Separación, A. Marcilla.

Donde:

P_G : Presión parcial del componente en la fase gaseosa.

P_i : Presión parcial en la interfase.

C_i : Concentración del componente en la interfase, en equilibrio con P_i .

C_L : Concentración del componente en cuestión en la fase líquida

La fuerza impulsora es ahora la diferencia de presiones entre el seno de la fase gaseosa y la que estaría en equilibrio con la concentración en el seno de la fase líquida, o bien entre la concentración que estaría en equilibrio con la presión en el seno de la fase gas y la concentración en el seno de la fase líquida. (2)

2.2.1. Contacto de equilibrio en una etapa

Cuando se refiere a un contacto de equilibrio en una etapa se trata de un proceso en el cual se ponen en contacto íntimo dos fases diferentes para luego separarse. Al experimentar este tiempo de contacto, ambas fases se mezclan, por consiguiente sus componentes entran en contacto unos con otros difundándose y distribuyéndose. El tiempo que dure esta mezcla debe ser lo suficientemente adecuado como para que los componentes de ambas fases queden finalmente en equilibrio, una vez se haya separado. (2)

Así se ilustra la manera en que las dos fases de un sistema de absorción gaseosa se ponen en contacto en la Figura 2:

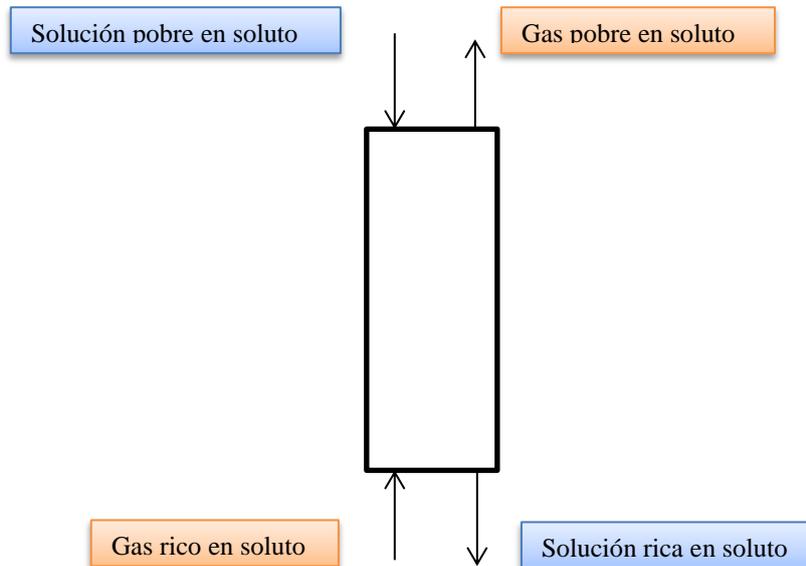


Figura 2. Esquema de funcionamiento de una columna de absorción gaseosa.

Elaborado por: Félix García, Karla Reyes

La transferencia de masa, en la absorción, ocurre de la fase gaseosa a la líquida.

2.3. Datos de equilibrio de reacción gas- líquido para el sistema.

- ✓ **La razón líquido/gas:** este valor indicará la cantidad de líquido necesario para la absorción acorde a la cantidad de gas, por lo que entre menor sea este valor menor será el gasto y menor será el dimensionado de las instalaciones
- ✓ **pH.** Acorde el sistema, este parámetro será el indicador de la concentración del gas dentro de la corriente líquida absorbente por lo que se debe de mantener dentro de unos límites para asegurar una alta solubilidad y evitar la formación de costras.
- ✓ **Velocidad del gas.** Por motivos de reducción de costos las columnas de absorción se diseñan a la máxima velocidad del gas posible, minimizando el tamaño de la misma.
- ✓ **Tiempo de residencia.** Este parámetro se calcula con el objetivo de asegurar que el gas se encuentre dentro de la columna de absorción el tiempo suficiente para que alcance la mayor solubilidad posible con el líquido en contacto.

- ✓ **La cantidad de líquido** necesitado para absorber el componente soluble que se encuentra en el gas, y el cual queremos obtener.

- ✓ **La cantidad de gas** necesitado que sea estequiométricamente dosificado tomando en cuenta la solubilidad máxima del mismo para lograr una mayor absorción sin desperdicio de solvente.

2.4. Definición de columnas empacadas y de platos

Para conseguir la máxima absorción se debe procurar una mayor superficie de contacto entre el gas y el solvente, esto conlleva a una cuidadosa elección del mismo, además los materiales para la construcción de este tipo de equipos deben ser resistentes, según sean las propiedades agresivas o no del sistema, asegurando su durabilidad y un fácil acceso al mantenimiento que prolongará la vida útil del mismo. (3)

Esta Operación Unitaria puede ser ejecutada tanto en torres de platos como en torres empacadas acorde a los requerimientos de proceso.

2.4.1. Columnas de platos

Este tipo de columna se utiliza por lo general cuando se trata de operaciones a gran escala y en las cuales se requiere un contacto discontinuo con el gas. (4)

- ✓ Tienen un contacto discontinuo con el gas.
- ✓ Gran diámetro de columna.
- ✓ En caso de que hubiese sólidos en suspensión.
- ✓ En sistemas en que puedan darse cambios bruscos de temperatura.
- ✓ Al trabajar con presiones elevadas.
- ✓ El paralelismo visual entre la curva de equilibrio del sistema y la recta de operación proporciona también un criterio para seleccionar una torre de absorción de gases de platos.

2.4.2. Columnas empacadas

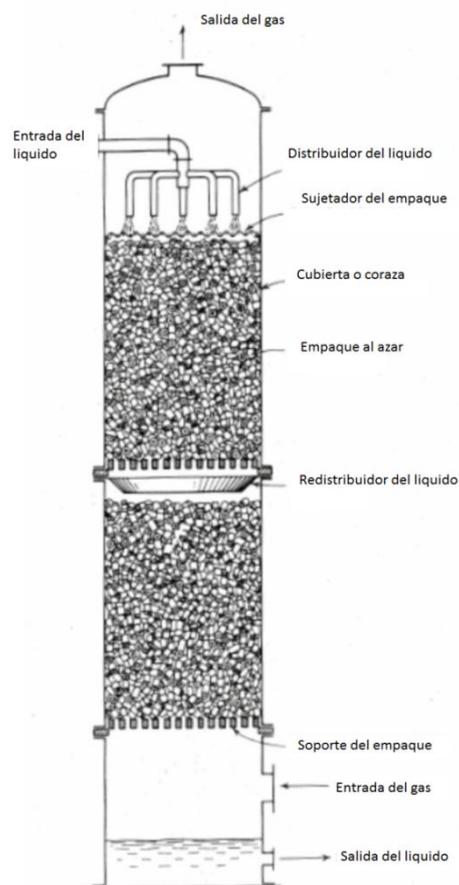


Figura 3. Torre de empaque al azar

Fuente: Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental.

Por motivos de contacto continuo se emplea una columna cilíndrica ya sea en flujo paralelo o contracorriente.

Aquellas con flujo en contracorriente poseen una entrada inferior del gas rico en soluto, hacia una cámara de distribución, y una entrada superior del líquido solvente por la parte superior con un dispositivo que asegure la mayor distribución de éste sobre el relleno posterior que servirá de superficie de contacto para ambas fases.

Este tipo de flujo proporciona una eficiencia de remoción teórica más alta, puesto que la fuerza impulsora promedio se maximiza ya que las fases se ponen en contacto cuando ambas se encuentran ricas (parte inferior de la columna), y pobre en soluto (parte superior de la columna) (5).

El flujo en paralelo en un sistema de absorción gaseosa solo será eficiente donde grandes fuerzas impulsoras son disponibles. (5)

Para el presente proyecto se eligió el arreglo de flujos en contracorriente puesto que se trabaja con una mezcla gaseosa aire-CO₂ pobre, con una concentración de 5% de soluto en su composición, por lo tanto no se dispone de una fuerza impulsora de gran magnitud.

Una vez que el gas entra en la cámara de distribución asciende a través de las aberturas o intersticios del relleno, poniéndose en contacto con el líquido que recorre en descenso el cuerpo de relleno por las mismas aberturas.

Estas aberturas mencionadas serán quienes den cabida a la Operación Unitaria de transferencia de masa brindando una extensa área de contacto de la manera más íntima posible entre el gas y el líquido.

La selección de relleno se realiza a conveniencia del diseño de la columna y buscando que favorezca la transferencia de masa, éstos pueden encontrarse comúnmente en el mercado en tamaños de 3 mm hasta unos 75 mm. Son construidos con materiales inertes y económicos, como arcilla, porcelana, plástico, cerámica o grafito, que posibiliten un apropiado y oportuno mantenimiento y por consiguiente la prolongación de su tiempo de vida útil. La selección del material del relleno también considera el grado de corrosividad de las componentes en las fases gas y líquido. (3)

Estos rellenos deben proporcionar una apropiada proporción de espacios, aproximadamente entre 60 y el 90%, (3) para que de esta manera el contacto entre fases se realice de mejor manera y con caídas de presión del gas relativamente baja, según el estudio de diseño indique será favorable para el sistema.

2.5.Diferencias y beneficios entre las columnas empacadas y columnas de platos.

Si bien sabemos, la selección del tipo de columnas dependerá de las condiciones de proceso y el tipo del sistema a emplear, se debe tener en cuenta, además, la variación de ciertos factores que se ven influenciados acorde a dicha selección, con el objetivo de alcanzar el diseño óptimo de la misma.

Estos factores se listan a continuación:

- ✓ Caída de presión del gas. En columnas empacadas la caída de presión requerida para una mejor operación será menor. (6)
- ✓ Retención del líquido. Dependiendo de ciertas condiciones, tales como, el diseño de los platos o el tipo y altura del relleno, en torres empacadas podrá conseguirse una menor retención del líquido, lo cual es beneficioso puesto que en ocasiones el solvente se ve afectado al incrementarse la temperatura, por lo que una retención del líquido menor será fundamental para no alterar las condiciones del proceso. (6)
- ✓ Relación líquido-gas. En las columnas de platos esta relación se trabaja con valores bajos, mientras que en las columnas empacadas es conveniente el uso de valores más altos. (6)
- ✓ Corrientes laterales. En las columnas de platos hay más facilidad para poder eliminarlas. (6)
- ✓ Sistemas espumantes. Durante la operación de las columnas empacadas, el burbujeo del gas a través del líquido es menor, por lo que son más adecuadas para este tipo de sistema.

- ✓ Corrosión. Cuando el sistema de trabajo es esencialmente corrosivo, es recomendable utilizar columnas de empaque puesto que el mantenimiento y reposición de las mismas es menos costosa que en las columnas de platos.

Además debe considerarse que una adecuada técnica para control de la corrosión, tanto en platos como en el uso de empaque, definirá finalmente la idoneidad del tipo de columna. (6)

- ✓ Presencia de sólidos. Una corriente con esta característica no es favorable para ninguno de los tipos de columnas, por lo que la corriente gaseosa debe ser primero desprovista de los sólidos (polvos o material particulado en general). Éste puede ser eliminado usando un lavador Venturi en el fondo de la torre. En el caso de que la corriente líquida sea quien se vea contaminada por material sólido, esta, puede filtrarse o bien clarificarse antes de entrar en la columna. (6)

- ✓ Limpieza. Realizar esta actividad de manera más frecuente es más sencillo con las torres de platos.

- ✓ Fluctuaciones grandes de temperatura. Al usar columnas de empaques, la fragilidad de los mismos ante estos cambios bruscos de temperatura puede provocar ruptura, dependiendo de su material de construcción, tales como, cerámica, tienden a romperse. Los platos o empaques de metal son más satisfactorios. (6)

- ✓ Carga sobre la base. Según sea el material de construcción de la columna, las columnas empacadas de plástico son menos pesadas que las torres de platos, las que a su vez son más ligeras que las torres de cerámica o empacadas de metal. Cual sea el caso, debe diseñarse una base que resista la carga no solo del peso de la columna, sino que también debe poseer un margen de resistencia que se extienda en caso de que la columna se llene accidental y completamente de líquido. (6)

2.6. Características del empaque en columnas de absorción

La elección del relleno es una decisión crucial al momento de diseñar o buscar la optimización en un equipo de absorción, puesto que de éste dependerá la velocidad a la cual se realice el proceso; determinará el diámetro y la altura que deberá tener el equipo para cumplir con el propósito de funcionamiento establecido.

Además seleccionar el relleno implica un análisis económico en cuanto al presupuesto del proyecto y la decisión de una inversión a corto o largo plazo, esto es, considerando el mantenimiento futuro del relleno según haya sido elegido.

Dicho esto, se debe tener en cuenta ciertas características fundamentales con las que el relleno debe cumplir, tales como:

- ✓ Debe ser químicamente inerte con respecto al tipo de fluidos con los que la torre esta especificada a operar.
- ✓ Debe tener resistencia mecánica pero a su vez no debe tener un peso excesivo.

- ✓ El diseño del relleno debe permitir que ambas corrientes fluyan de manera adecuada, sin que los líquidos se retengan de manera excesiva o que haya alta caída de presión. Una alta caída de presión reflejaría que en el sistema hay una rápida acumulación del líquido en el volumen de espacios vacíos presentes en el empaque. Cuando la retención del líquido aumenta puede producirse una inversión de fases o la inundación de la torre. (3)
- ✓ El área específica debe proporcionar un adecuado contacto entre la corriente líquida y gaseosa.
- ✓ Su costo debe estar dentro del presupuesto destinado para el equipo.

Una vez elegido el tipo de relleno, se debe tomar la importante decisión de seleccionar el material del cual estarán estos elaborados.

Comúnmente en el mercado se encuentran rellenos de arcilla, porcelana, cerámica, plástico, metal y vidrio. El tipo dependerá a su vez de las especificaciones que deseen cumplirse y el costo que se disponga a invertir. (3)

El material del relleno debe ser barato, inerte, ligero y de preferencia las unidades de relleno deben ser huecas para garantizar la porosidad del lecho y el paso de los fluidos. (3)

Como se conoce la figura ideal para la transferencia de masa por tener la mayor superficie específica es la esfera; por lo tanto y en definitiva para la selección del tipo y material de empaque primarán las consideraciones anotadas anteriormente, en caso de no trabajar con el relleno indicado. Obviamente considerando la porosidad como factor crítico de selección. (3)

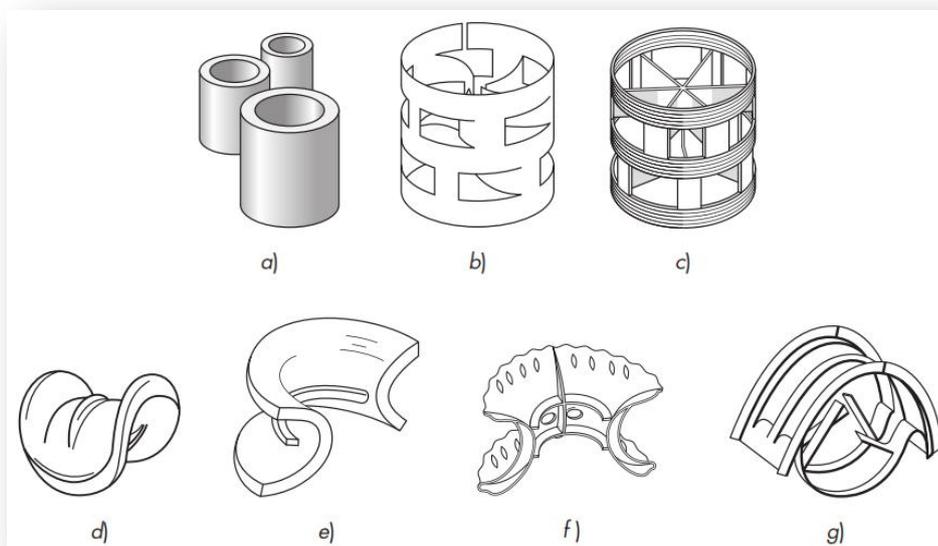


Figura 4. Empaques comunes: a) Anillos Raschig; b) Anillo metálico Pall; c) Anillo plástico Pall; d) Montura Berl; e) Montura cerámica Intalox; f) Montura plástica Super Intalox

Fuente: Operaciones Unitarias en Ingeniería Química – McCabe, Smith (2007)

2.7. Disposición del empaque

2.7.1. Empaques al azar

Los empaques al azar son aquellos que se colocan de forma aleatoria en la instalación de la torre. Antes se utilizaban materiales como piedras rotas, grava o pedazos de coque, que eran de fácil obtención y bajo costo, pero debido a su mal funcionamiento frente a los fluidos y a su escasa área superficial fueron modificándose con el tiempo. Actualmente existen fábricas para la producción de este tipo de empaques.

Los empaques más comunes son: Anillos Raschig, los cuales son cilindros huecos cuyo diámetro varía de 6 a 100 mm (1/4 a 4 in), se pueden fabricar de porcelana industrial, metales o plásticos, y es útil para la mayoría de sustancias líquidas, en la selección de los materiales plásticos deben tomarse en cuenta que pueden llegar a deteriorarse con la temperatura y con ciertos solventes orgánicos; los empaques de hojas delgadas de metal o plástico tienen la ventaja de ser ligeros, pero existe la posibilidad que la torre pueda llenarse de líquido; en el caso del empaque en forma de silla de montar (Berl e Intalox) pueden llegar a tener un tamaño de 6 a 75 mm (1/4 a 3 in) estos pueden

fabricarse de porcelana o plástico, entre otros empaques tenemos: anillos Pall (Flexiring, anillos de cascada), Hy-Pak que es una variación del anterior mencionado, además los Telleretes que los encontramos de plástico. (7)

Por lo general, los empaques de menor tamaño presentan una mayor superficie específica, pero además dan una mayor caída de presión, los empaques de mayor tamaño presentan un menor costo por unidad de volumen. Generalmente los tamaños de empaque de 25 mm o mayores utilizan un flujo gaseoso de $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$ (ca. $500 \text{ ft}^3/\text{min}$), 50 mm o mayores un flujo gaseoso de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (ca. $2000 \text{ ft}^3/\text{min}$), en el momento de la instalación estos empaques se colocan aleatoriamente, para prevenir la ruptura del empaque de cerámica o carbón la torre puede llenarse inicialmente con agua para reducir la velocidad de caída. (7)

2.7.2. Empaques regulares

Existen una variedad en este tipo de empaques, los empaques regulares tienen la ventaja de brindar una menor caída de presión del gas y un flujo mayor, por lo general este tipo de

empaques tienen un mayor costo de instalación en comparación con los empaques aleatorios. Entre los diversos tipos de empaques regulares tenemos los siguientes: anillos hacinados de Raschig, los cuales son económicos pero en un tamaño muy grande; rejillas o “vallas” de madera las cuales se utilizan cuando es necesario grandes volúmenes de vacío; malla de lana de alambre tejida, se enrolla como si fuera un cilindro lo que proporciona una gran superficie interfacial y una pequeña caída de presión. (7)

2.8. Características y propiedades del disolvente.

El uso del solvente adecuado es otra parte importante para el diseño óptimo del equipo, dentro de los disolventes comúnmente utilizados está el agua, que es considerado uno de los más baratos y completos, pero se deben tomar en cuenta otras condiciones como:

- ✓ Solubilidad del gas: Permitir la absorción del gas de manera rápida, aumenta su velocidad y reduce la cantidad de solvente a utilizar.
- ✓ Volatilidad: Baja presión de vapor ya que el gas en un proceso de absorción satura la solución y puede perderse en gran cantidad.
- ✓ Corrosión: Permite la selección indicada de los materiales de la columna.
- ✓ Costos: El disolvente debe ser de bajo costo y de fácil obtención.
- ✓ Viscosidad: Baja viscosidad permite una mayor rapidez de absorción, así como baja caída de presión en el bombeo.
- ✓ Misceláneos: No debe ser tóxico ni inflamable, debe ser químicamente estable y con bajo punto de congelamiento.

(8)

2.9. Uso industrial de la columna de absorción gaseosa.

Este equipo se encontrará con gran frecuencia en las industrias en las cuales se trabaje con disoluciones ácidas o básicas en agua como ácidos clorhídrico, sulfúrico y nítrico o hidróxido amónico. De esta manera se logra la recuperación de componentes que podrían ser considerados valiosos dentro de corrientes gaseosas que contengan estos componentes que a su vez podría tratarse de efluentes gaseosos contaminantes. (9)

En cuanto al enfoque hacia la corriente gaseosa, la absorción se emplea para recuperar gases ácidos como H_2S , mercaptanos y CO_2 , esto se realiza con el objetivo de controlar las emisiones contaminantes que serán descargadas a la atmosfera, reteniendo los compuestos que causarían afectación en la misma, como:

- ✓ Gases de combustión, que posean tasas de SO_2 fuera de los rangos legales permitidos.
- ✓ Óxidos de nitrógeno en corrientes gaseosas.
- ✓ Eliminación de butano y pentano en mezclas gaseosas provenientes de gases de refinería mediante la utilización un aceite pesado.

- ✓ Aprovechar la solubilidad de ciertos componentes inorgánicos encontrados en corrientes de aire para eliminarlos con agua.
- ✓ Endulzamiento del gas natural a través de la absorción de CO_2 y compuestos azufrados presentes.
- ✓ Eliminar gases de CO_2 o de H_2S en procesos con reacción utilizando soluciones acuosas de NaOH . (9)

Para ilustrar una aplicación industrial de la absorción gaseosa, en orden de recuperación de componentes valiosos, se describe brevemente su participación en un proceso de refinería para la absorción de gas licuado de petróleo (LPG) por contacto en contracorriente con gasóleo liviano craqueado (LCGO), en el cual una corriente de gases livianos ingresa a la columna de absorción de esponja del Petróleo y de esta manera se maximiza la recuperación de los componentes que se encuentren dentro de rangos de ebullición del LPG, presentes en la misma. Al salir de la columna, estos gases que se encuentran absorbidos en la corriente de LCGO, son enviados a un sistema de depuración de gas combustibles para su posterior tratamiento. (9)

CAPITULO III

3. Absorción de gases con reacción química

3.1.1. Proceso de absorción gaseosa con reacción química

El proceso de absorción y sus resultados se verán afectados por el caudal de gas alimentado (concentración del soluto en el mismo), el flujo y la concentración que tenga el solvente empleado.

En este tipo de absorción el compuesto A, ubicado en la fase gaseosa, es absorbido por la corriente líquida B a través de una reacción que sigue a la ecuación $A + B \rightarrow AB$. El gas y el líquido se encuentran en la interfase en donde el gas A se difunde a medida que se acerca a la misma (bajando su concentración) y reacciona con B. Una vez formado el producto AB, éste se difunde hacia la corriente líquida disminuyendo, por tanto, su concentración. De igual manera, la concentración del líquido, a medida que se acerca a la interfase, disminuye y cae para dar lugar a la difusión de A en la misma. (10)

Debido a que esta reacción química es rápida, es mandatorio que A se difunda antes de llegar a la interfase, ya que B se consumirá muy rápidamente. (10)

Luego de la interfase, donde se encuentran las dos corrientes, previamente difundidas, se produce una zona de reacción entre A y B, esta zona está alejándose de la interfase de los dos fluidos, y tendiendo hacia el cuerpo principal de la zona líquida. Esta zona de reacción estará posicionada en un punto, tal que, la velocidad de difusión de A desde la interfase de gas-líquido sea igual a la velocidad de difusión de B desde el cuerpo principal del líquido. La figura a continuación demuestra el proceso descrito (10):

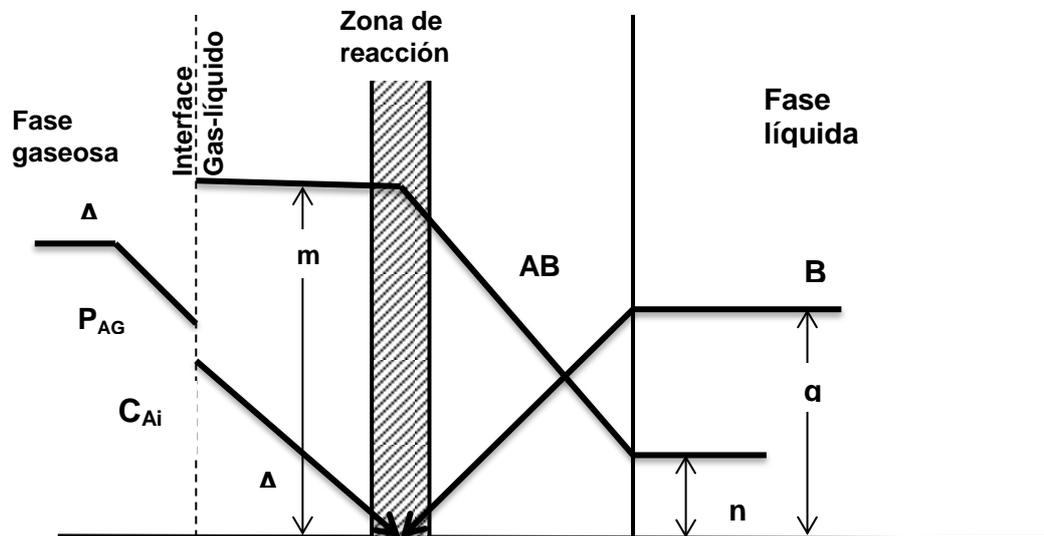


Figura 5. Perfil de concentración para absorción de gases con reacción química.

Fuente: Processes Controlled by Liquid-Film Resistance, Cap Absorption of Gases, AIChE

Donde:

P_{AG} presión parcial de A en el seno del gas

P_{Ai} presión parcial de A en la interfase

C_{Ai} concentración de A en la interfase

Ahora bien, esta difusión de A a través de la película de gas se produce como resultado de la fuerza impulsora $(P_{AG} - P_{Ai})$, es decir la presión parcial de A en el seno de gas será mayor que en la interfase, donde se encuentra con la fase líquida, lo cual provoca un descenso en su concentración y así se difunde a la zona de reacción (la fuerza impulsora en este punto es la diferencia de concentraciones generada por el descenso de la misma expresada en C_{Ai} por contacto con la fase líquida). El componente B se difunde desde la corriente principal del líquido a la zona de reacción siendo impulsado por la fuerza que es provocada por la diferencia de concentraciones de este componente entre el seno del líquido y la zona de reacción donde B estará siendo consumido por reacción con A, dando como producto no volátil AB que se difunde nuevamente hacia la masa principal del líquido bajo una fuerza impulsora $(m - n)$ la cual representa una diferencia en concentraciones del producto AB entre zona de reacción y el seno principal del líquido. (10)

Para el presente trabajo la corriente gaseosa a utilizar tendrá 5% de CO₂ (**A**) y 95% aire comprimido, y el solvente a utilizar será una solución acuosa de 0,00025N de NaOH (**B**), estas corrientes, al entrar en contacto, experimentaran una reacción química, siguiendo el proceso anteriormente explicado, como se muestra en la Figura 6.

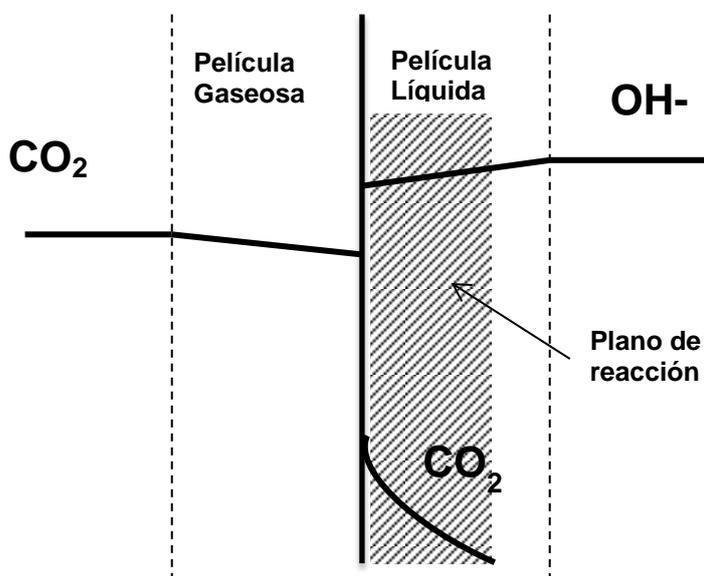


Figura 6. Mecanismo de reacción para sistema CO₂ en NaOH.

Fuente: Estudio Absorción de CO₂ en columna de burbujeo por reacción con álcalis, Grupos PF&PT y Ecoeficiencia. Departamento de Ingeniería Química-ETSE. Universidad de Santiago de Compostela.

3.2. Etapas de reacción para el sistema CO₂- aire en solución acuosa diluida de NaOH.

La carbonatación es el proceso mediante el cual se incorpora CO₂ al agua dando lugar a una reacción química.

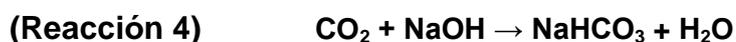
El CO₂ al combinarse con el agua forma ácido carbónico (H₂CO₃), el cual es débil, inestable y se descompone fácilmente como indican las reacciones. (11)



Como el H₂CO₃ es un ácido débil, se disocia parcialmente formando los iones carbonato y bicarbonato, según las reacciones:



La fase líquida (solución de NaOH) al absorber el CO₃⁼, realiza la operación unitaria mencionada por medio de reacción química general:





Así pues tenemos los siguientes productos principales, en la fase líquida, luego de la absorción gaseosa con reacción química:

Tabla 2. Especies presentes en la corriente líquida según el pH.

pH < 4,5	4,5 < pH < 8,3
H_2CO_3	HCO_3^- , $\text{CO}_3^{=}$
<ul style="list-style-type: none"> • Todo el CO_2 disuelto es gaseoso 	<ul style="list-style-type: none"> • Todo el CO_2 está ionizado. • Llamado CO_2 libre. • Puede reaccionar con el NaOH y llamarse CO_2 combinado.

La reacción química del CO_2 y la solución acuosa de NaOH se considera rápida, por lo que cuando la materia se transfiere de la fase gas a la líquido se cumple la etapa limitante del proceso global. (12)

3.3. Propiedades de las corrientes a utilizar (CO₂ y NaOH).

3.3.1. Hidróxido de Sodio (NaOH)

Es un compuesto de uso industrial también conocido como **soda cáustica** o **sosa cáustica**.

Su presentación a temperatura ambiente es la de un sólido blanco y cristalino, no posee olor y es higroscópico, es decir, que absorbe humedad del aire.

No es una sustancia inflamable, pero en contacto o al disolverse con agua o neutralizarse con ácidos, se libera una gran cantidad de calor, que podría encender materiales combustibles a su alrededor. (13)

Diamante	Riesgo	Valor	Descripción
	 Salud	3	Los daños que puede causar pueden ser serios y permanentes.
	 Inflamabilidad	0	No ardera de manera espontánea, a menos que se encuentre en condiciones típicas de formación de fuego.
	 Reactividad	1	Normalmente estable, pero a ciertas condiciones de presión y temperatura puede volverse inestable.
	 Especial	W	No debe estar en contacto con el agua.
	Corrosividad		

Fuente: CameoChemicals

Para efecto del presente proyecto se utilizará una solución diluida de 0,0025N de Hidróxido de sodio, con el propósito de iniciar la operación del equipo con una solución conocida.

A continuación se presenta un extracto condensado de las propiedades básicas de este compuesto químico:

Tabla 3. Propiedades básicas del Hidróxido de Sodio.

Parámetro	Valor
Peso molecular	40
Punto de ebullición a 760 mmHg	1.390C / 2.534 F
Densidad	2.1 g/cm ³
Gravedad específica	2,13
Punto de fusión	310 C / 590F
Solubilidad en agua, g/100g de agua a 20C	109 (muy elevada).

Fuente: Wikipedia.

Elaborado por: Félix García, Karla Reyes

El hidróxido de sodio es conocido también como sosa caustica, es un material sólido de color blanco cristalino, no posee olor, absorbe humedad del aire y es corrosivo.

Su reacción en contacto con el agua es violenta y exotérmica por lo que libera gran cantidad de calor. (13)

Toxicología:

- ✓ Este producto químico requiere un manejo muy delicado, pues su mínimo contacto con la piel provoca enrojecimiento, dolor, o incluso graves quemaduras y ampollas.
- ✓ Como su reacción con el agua es violenta y exotérmica, debe tenerse especial cuidado con las salpicaduras, y si éstas llegasen a los ojos provocara enrojecimiento, dolor, visión borrosa y hasta quemaduras graves.
- ✓ El hidróxido de sodio al ser inhalado produce tos, molestia y dolores en la garganta, acompañado de una sensación de quemadura.
- ✓ La ingesta provoca dolor abdominal, quemaduras en la boca, garganta y pecho. Dependiendo de la cantidad y concentración ingerida se provocan náuseas, vómitos, shock o colapso. (14)

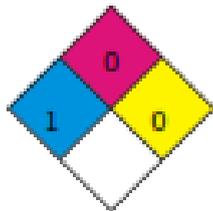
Normas básicas de seguridad

- ✓ En su manipulación debe procurarse el uso de guantes, protección visual y respiratoria. Totalmente prohibida su ingesta en ninguna proporción.
- ✓ Evítese el contacto con la piel o mucosas, de ser el caso, retírese las prendas contaminadas y enjuáguese inmediatamente con abundante agua durante 15 minutos
- ✓ Si los ojos entran en contacto con el compuesto, lavarlos con abundante agua por varios minutos, retirar lentes de contactos, de ser el caso.
- ✓ Si ha sido ingerido, lavar la boca y no provocar el vomito
- ✓ Para cualquiera que sea el contacto con esta sustancia solicitar opinión médica. (14)

3.3.2. Dióxido de Carbono (CO₂)

Es un gas incoloro con un olor penetrante un sabor ácido, en la atmósfera se encuentra como uno de los menores componentes, se obtiene como producto de la combustión, fermentación, respiración animal, entre otras.

Producto de la quema de combustibles fósiles y otras actividades industriales cuyo resultado ha provocado el incremento de su concentración en la atmósfera causando el conocido calentamiento global. (15)

Diamante	Riesgo	Valor	Descripción
	 Salud	1	Los daños que puede causar serian ocasionados en caso de exposición a altas concentraciones.
	 Inflamabilidad	0	No arderá de manera espontánea, es un medio de extinción de fuego.
	 Reactividad	0	Es estable
	 Especial	0	No presenta riesgos especiales.
	Gas Comprimido No Inflamable		

Fuente: Linde Gas

La corriente gaseosa estará formada por una mezcla cuya composición es de 95% aire y 5% de Dióxido de Carbono.

- ✓ Para esto se utiliza CO_2 contenido en un tanque de 20 Kg y se dispensa mediante un regulador que consta de tres partes principales:
- ✓ Flujómetro con válvula manual reguladora.
- ✓ Manómetro que indica presión interna del tanque.
- ✓ Bobina de calentamiento eléctrico con conexión a 110V, con una potencia de 0,2 kW, ubicada en la parte posterior del regulador para para calentamiento de la corriente saliente del tanque.
- ✓ Este regulador proporcionara una adecuada expansión del CO_2 para que al salir del tanque éste no se congele y su flujo sea constante de 10 l/min a 30C.

A continuación se presenta un extracto condensado de las propiedades básicas de este compuesto químico:

Tabla 4. Propiedades básicas CO₂.

Parámetro	Valor
Peso molecular	44
Punto de sublimación	-79 °C
Densidad relativa de vapor (aire = 1)	1,5
Presión de vapor, kPa a 20°C	5720
Solubilidad en agua, ml/100 ml a 20°C	88

Fuente: Wikipedia.

Elaborado por: Félix García, Karla Reyes

La sustancia se descompone al calentarla intensamente, por encima 2000°C produciendo monóxido de carbono tóxico.

Toxicología:

Este producto no representa peligro grave por contacto, a pesar de eso, su exposición excesiva provoca:

- ✓ Vértigo, dolor de cabeza, presión sanguínea elevada, ritmo cardíaco acelerado, asfixia, pérdida del conocimiento.

La inhalación a niveles elevados puede originar pérdida de conciencia, asfixia, salivación excesiva, disminución del nivel de alerta mental, pérdida del conocimiento y la muerte. La exposición a atmósferas que contengan un 8-10% o menos de oxígeno provoca la pérdida del conocimiento.

- ✓ En contacto con líquido: congelación. (15)

Normas básicas de seguridad

En la sección de anexos se presenta la ficha técnica de seguridad de ambos productos para su revisión profunda y conocimiento de medidas especiales de manipulación, seguridad y almacenamiento. Ver Anexo VI.

CAPITULO IV

4. Cálculos de diseño

4.1. Generalidades

4.1.1. Balance de materia en columnas empacadas

En el estudio de una columna de absorción de estado estacionario, se considera flujo estacionario, ya que las propiedades dentro de la columna se mantienen constantes en temperatura, masa y energía, el proceso idealizado se caracteriza con la constancia dentro del volumen de control, es decir no hay cambio de masa, volumen y contenido de energía total; además con flujo contracorriente, donde nuestra mezcla gaseosa es binaria (aire-CO₂), el balance de materia será (16):

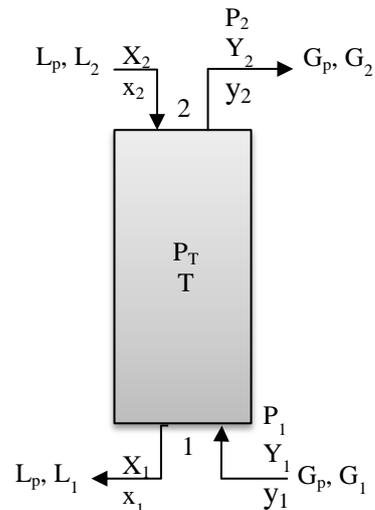


Figura 7. Balance de materia de columna de absorción.

Donde:

L_p : Caudal líquido puro (Kmol/h.m^2)

G_p : Caudal gas inerte (Kmol/h.m^2)

L_1 : Líquido y soluto a la salida (Kmol/h.m^2)

L_2 : Líquido y soluto a la entrada (Kmol/h.m^2)

G_1 : Gas inerte y soluto a la entrada (Kmol/h.m^2)

G_2 : Gas inerte y soluto a la salida (Kmol/h.m^2)

x_1 y x_2 : Fracción molar del gas en la fase líquida (mol/mol)

y_1 y y_2 : Fracción molar del soluto en la fase gaseosa (mol/mol)

X_1 y X_2 : Cocientes molares del gas en la fase líquida (mol/mol)

Y_1 y Y_2 : Cocientes molares del gas en la fase gaseosa (mol/mol)

$$\text{(Ecuación 1)} \quad L = L_i(1 - x_i) = \frac{L_i}{1 - L_i}$$

$$\text{(Ecuación 2)} \quad G = G_i(1 - y_i) = \frac{G}{1 - G_i}$$

$$\text{(Ecuación 3)} \quad x_i = \frac{X_i}{1 + X_i} \rightarrow X_i = \frac{x_i}{1 - x_i}$$

$$\text{(Ecuación 4)} \quad y_i = \frac{Y_i}{1 + Y_i} = \frac{P_i}{P_T} \rightarrow Y_i = \frac{y_i}{1 - y_i} = \frac{P_T}{P_T - P_i}$$

Siendo i cualquier punto en la columna.

Ya que el gas inerte y el líquido disolvente no varían en cantidad en la columna el balance de materia se puede expresar en función de ellos mediante la ecuación:

$$\text{(Ecuación 5)} \quad G(Y_1 - Y_i) = L(X_1 - X_i)$$

Ya que i representa cualquier punto en la columna, podría corresponder al punto 2 en la figura, tenemos:

$$\text{(Ecuación 6)} \quad G(Y_1 - Y_2) = L(X_1 - X_2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{Kmol_{gas}}{h \cdot m^2} \left(\frac{Kmol_{soluta}}{Kmol_{gas \text{ ingreso}}} - \frac{Kmol_{soluta}}{Kmol_{gas \text{ salida}}} \right) \\ & = \frac{Kmol_{liquido}}{h \cdot m^2} \left(\frac{Kmol_{soluta}}{Kmol_{liquido \text{ salida}}} - \frac{Kmol_{soluta}}{Kmol_{liquido \text{ ingreso}}} \right) \end{aligned}$$

$$\frac{Kmol_{gas}}{h \cdot m^2} \left(\frac{Kmol_{soluta}}{Kmol_{gas}} \right) = \frac{Kmol_{liquido}}{h \cdot m^2} \left(\frac{Kmol_{soluta}}{Kmol_{liquido}} \right)$$

$$\frac{Kmol_{soluta}}{h \cdot m^2} = \frac{Kmol_{soluta}}{h \cdot m^2}$$

(Ecuación 7) $\frac{L}{G} = \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2}$

4.1.2. Balance diferencial

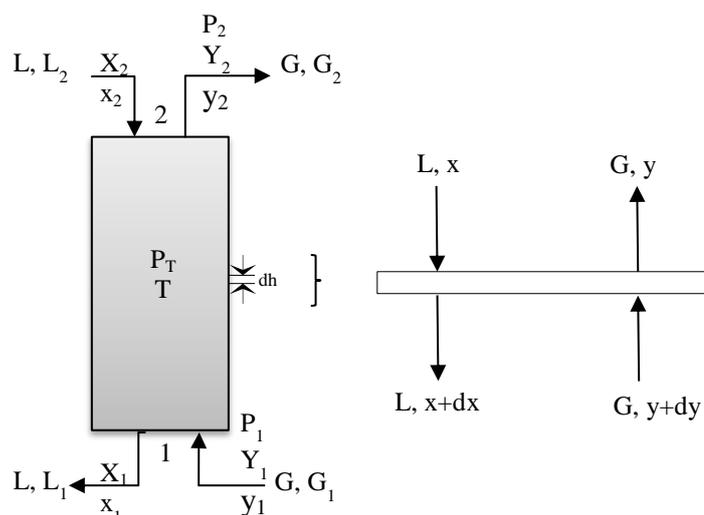


Figura 8. Balance diferencial columna de absorción.

(Ecuación 8) $Lx + G(y + dy) = L(x + dx) + Gy$

$$\frac{Kmol_{solvente}}{h \cdot m^2} \left(\frac{Kmol_{soluta}}{Kmol_{solvente}} \right) + \frac{Kmol_{gas}}{h \cdot m^2} \left(\frac{Kmol_{soluta}}{Kmol_{gas}} \right)$$

$$= \frac{Kmol_{solvente}}{h \cdot m^2} \left(\frac{Kmol_{soluta}}{Kmol_{solvente}} \right) + \frac{Kmol_{gas}}{h \cdot m^2} \left(\frac{Kmol_{soluta}}{Kmol_{gas}} \right)$$

$$\frac{Kmol_{soluta}}{h \cdot m^2} + \frac{Kmol_{soluta}}{h \cdot m^2} = \frac{Kmol_{soluta}}{h \cdot m^2} + \frac{Kmol_{soluta}}{h \cdot m^2}$$

$$\frac{Kmol_{soluta}}{h \cdot m^2} = \frac{Kmol_{soluta}}{h \cdot m^2}$$

(Ecuación 9) $Gdy = Ldx$

La ecuación nos indica la conservación de masa en el proceso, donde la cantidad de gas transferida de la fase gaseosa es la que se disuelve en la fase líquida.

4.1.3. Determinación de Variables de proceso

El proceso de absorción gaseosa se encuentra regido por variables que se deben dirigir para obtener el mayor rendimiento en los requerimientos solicitados. El ingeniero químico debe saber manipular las condiciones de operación sin afectar el rendimiento mínimo. En el caso del desarrollo del diseño de la columna de absorción, se debe conocer los flujos molares gaseosos disponibles. La solubilidad del componente en el solvente rige las condiciones de operación, ya que con ello se definirá las características físico-químicas de los fluidos que se encontrarán en contacto (16).

El diseño de la columna empacada se define con ciertas variables características en la fase líquida y la fase gaseosa.

Estas variables consideradas son:

- ✓ Fase líquida: Concentración molar del componente transferible, razón molar del componente transferible a componente portador, caudal molar de componente portador.
- ✓ Fase gaseosa: Presión parcial del componente transferible, razón molar del componente transferible a componente portador, caudal molar del componente portador (16).

4.1.4. Ecuación general de cálculo para columnas empacadas.

La transferencia del componente varía proporcionalmente al gradiente de concentraciones. Tenemos las siguientes ecuaciones con respecto a cada fase (16).

- ✓ Fase gaseosa:

$$(Ecuación 10) \quad N_A = k_G(y - y_i)$$

$$\frac{Kmol_{soluta}}{h \cdot m^2} = \frac{Kmol_{soluta}}{h \cdot m^2 (Kmol_{soluta}/Kmol_{gas})} (Kmol_{soluta}/Kmol_{gas})$$

✓ Fase líquida:

$$(Ecuación 11) \quad N_A = k_L(x_i - x)$$

$$\frac{Kmol_{soluta}}{h \cdot m^2} = \frac{Kmol_{soluta}}{h \cdot m^2 (Kmol_{soluta}/Kmol_{liquido})} (Kmol_{soluta}/Kmol_{liquido})$$

Donde:

y_i : Concentración componente gaseoso (mol/mol)

x_i : Concentraciones del componente (mol/mol)

N_A : Cantidad de componente que se transfiere de una fase a otra (Kg/h.m²)

K_G y K_L : Coeficiente de transferencia de masa (Kg/h.m³)

$$(Ecuación 12) \quad z = \int_{y_2}^{y_1} \frac{G}{k_y \cdot a} \frac{dy}{(1-y)(y-y^*)}$$

$$(Ecuación 13) \quad Z = H_{OG} * N_{OG}$$

$$(Ecuación 14) \quad N_{OG} = \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{(1-y)(y-y^*)}$$

$$(Ecuación 15) \quad H_{OG} = \frac{G}{K_G \cdot a}$$

$$m = \frac{Kmol/h \cdot m^2}{Kmol/h \cdot m^3}$$

Se puede simplificar el cálculo en el N_{OG} en el caso de la curva de equilibrio sea una recta.

$$(Ecuación 16) \quad N_{OG} = \frac{\int_{y_2}^{y_1} dy}{(y-y^*)_M} = \frac{y_1-y_2}{(y-y^*)_M}$$

$$(Ecuación 17) \quad (y-y^*)_M = \frac{(y-y^*)_{fondo} - (y-y^*)_{cabeza}}{\ln\left(\frac{(y-y^*)_{fondo}}{(y-y^*)_{cabeza}}\right)}$$

Los valores de X^* y Y^* se ubican mediante las gráficas conjuntas de equilibrio y la recta de operación. Las ecuaciones antes presentadas se identifican para diseño con mezcla de gases no enriquecidos, es decir, con un porcentaje de soluto menor del 10% en concentración molar en la mezcla gaseosa, en el caso del uso de corrientes gaseosas enriquecidas se usará el factor de corrección.

En el cálculo en mezclas concentradas se deberá tomar en cuenta la variación en el flujo gaseoso, y además para el cálculo se utiliza el coeficiente de transferencia de masa global en la fase líquida (16).

$$(Ecuación 18) \quad \frac{1}{K'_{Ga}} = \frac{(1-y)_M}{k_{Ga}} + \frac{m'}{k_{La}}$$

Donde:

m' : Factor de corrección para mezclas enriquecidas (Adimensional)

K'_{Ga} : Coeficiente de transferencia de masa corregido ($\text{Kmol/m}^3 \cdot \text{h}$)

4.1.5. Absorción con reacción química

La función principal de la reacción química en la fase líquida es aumentar la solubilidad del componente gaseoso. La reacción química permite una disminución en la altura de transferencia (H_{OG}) conservando la misma concentración deseada, debido a que el coeficiente de transferencia de masa aumenta considerablemente. En la fase líquida las moléculas del componente gaseoso deben difundirse hasta encontrar el reactante y luego el producto de reacción debe difundirse en la masa del líquido. Esto nos indica que la razón de absorción depende la concentración y difusividad de los reactantes y los productos, de la velocidad de reacción química y la profundidad de la película de reacción (16).

En el caso de una reacción irreversible de segundo orden, existe proporcionalidad entre la velocidad de reacción y la concentración de soluto.

Para el diseño de la columna de absorción, en el presente proyecto, el coeficiente global de transferencia de masa se obtuvo a través de tabulaciones del mismo en estudios bibliográficos previos, como se citan en la Tabla 7. En caso de requerirse su determinación, de manera teórica, debe considerarse que para el sistema propuesto interviene una reacción química en el proceso de transferencia de masa, así pues se disponen las siguientes ecuaciones, que para efectos de nuestros cálculos no fueron utilizadas por no formar parte de los objetivos del trabajo:

Considerando un elemento entre dos planos de unidad de área separados dx , en el elemento el soluto posee una razón de difusión de $-D(dc/dx)$ y la razón fuera del elemento sería $-D(dc/dx + d^2c/dx^2 * dx)$ la diferencia entre las cantidades sería la razón de soluto removido por la reacción química, obteniendo (16):

$$(Ecuación 19) \quad -D \frac{d^2c}{dx^2} * dx = -k_1 * c * dx$$

$$(Ecuación 20) \quad -D \frac{d^2c}{dx^2} = k_1 * c$$

Donde:

D : Difusividad del soluto en la fase líquida

k₁ : Constante de velocidad de reacción

Siendo la ecuación el resultado de la integración entre los siguientes límites:

$$c : c_i \text{ a } c_L$$

$$x : 0 \text{ a } x_L$$

$$(Ecuación 21) \quad N_A = \frac{b \cdot D (c_i - c_L)}{x_L}$$

Donde:

$$(Ecuación 22) \quad b = \frac{x_L \sqrt{\frac{k_1}{D}}}{\tan x_L \sqrt{\frac{k_1}{D}}}$$

El resultado final de la ecuación es similar a la absorción física, variando en la adición de la variable b, siendo la representación de la reacción química.

Los coeficientes de película se detallarían a continuación:

$$(Ecuación 23) \quad k_L = \frac{b \cdot D}{x_L}$$

$$(Ecuación 24) \quad \frac{1}{k_G} = \frac{p_A - p^*}{N_A} = \frac{p_A - p_i}{N_A} + \frac{m(c_i - c_A)}{N_A} = \frac{1}{k_G} + \frac{m}{k_L}$$

$$(Ecuación 25) \quad \frac{1}{k_L} = \frac{c^* - c_A}{N_A} = \frac{p_A - p_i}{m \cdot N_A} + \frac{(c_i - c_A)}{N_A} = \frac{1}{m \cdot k_G} + \frac{1}{k_L}$$

4.1.6. Cálculos de diseño

En el diseño de una columna rellena de absorción gaseosa que opera en estado estacionario se debe considerar la altura de relleno ya que éste será el dispositivo de contacto continuo, el procedimiento de diseño está relacionado a conceptos tales como, HTU (Altura de una Unidad de Transferencia) y NTU (Número de Unidades de Transferencia), los resultados de diseño están sujetos a las variantes de funcionalidad de la columna (3).

Las características de los fluidos en contacto presentarán sus especificaciones lo que permitirá la selección óptima del tipo de empaque para la columna. El sistema planteado opera con una mezcla binaria de Aire-CO₂ y una solución alcalina de NaOH 0,0025N, lo cual presenta un indicativo de corrosividad dentro del sistema, por este motivo se seleccionó un empaque plástico de anillos Raschig, además que presentan un alta área específica lo cual favorece el espacio de contacto para la interacción de las dos fases.

4.1.7. Dimensionamiento del equipo

Es de suma importancia un adecuado dimensionamiento de la columna de absorción, el cual involucra principalmente al diámetro de la columna y la altura total de relleno, estas características tienen la mayor influencia en cuanto a costos para la construcción de la misma.

El dimensionamiento del equipo se rige por las condiciones de operación planteadas inicialmente, tales como: caudales, concentraciones iniciales y finales. Estas condiciones pueden ser variadas, para obtener diferentes resultados en la operación.

4.1.8. Caudal de gas a la entrada

La corriente que ingresa a la columna, por ser una mezcla binaria de gases, deben considerarse las condiciones del gas, es decir presión y temperatura. Estas condiciones son importantes para que la mezcla gaseosa se encuentre en las proporciones requeridas. Para el dimensionamiento de la columna es necesario el conocimiento de varios detalles descritos en los siguientes puntos. (16).

4.1.9. Área de la tubería de entrada

El área superficial de la tubería debe tomarse en cuenta desde el enfoque de transporte de fluidos, este parámetro permitirá conocer la velocidad, además de identificar el comportamiento que pueden tener los fluidos dentro de la tubería.

La determinación del área se realiza mediante el previo conocimiento del diámetro de la tubería, además de ser un círculo la figura de la tubería (16).

$$(Ecuación 26) \quad A = \frac{\pi \cdot \varphi_d^2}{4}$$

Donde:

A : Área superficial de la tubería (m²)

φ_d : Diámetro interno de la tubería (m)

4.1.10. Densidad componentes gaseosos

La determinación de las propiedades físico-químicas del componente gaseoso es crucial para el diseño de la columna de absorción, ya que las relaciones dentro de la columna se ven afectadas por dichas propiedades. Una propiedad importante es la densidad, la misma que se puede calcular tomando los componentes como gases ideales, teniendo el conocimiento previo de los Factores de Compresibilidad (Z). (16)

Debido a que la mezcla gaseosa se encuentra en movimiento en la tubería para que exista la mezcla. Las moléculas de aire y CO_2 no son las mismas por lo que la mezcla gaseosa debe considerarse como gas real y utilizar los factores de compresibilidad.

Condiciones de Gases Ideales:

- ✓ Constituido por partículas con masa muy pequeña, que no tienen volumen.
- ✓ Las partículas se hallan en movimiento caótico permanente.

- ✓ El choque de las partículas con las paredes del recipiente que las contiene, origina una fuerza promedio por unidad de área, es decir, una presión.
- ✓ No existe atracción intermolecular.
- ✓ Los choques de las partículas son perfectamente elásticos, es decir no existe pérdida de energía por fricción. (17)

En el caso de los gases reales cuando poseen presiones bajas y temperaturas altas puede considerarse como gas ideal.

(Ecuación 27)
$$\rho = \frac{PM}{RTz}$$

Donde:

ρ : Densidad del gas (Kg/m³)

P : Presión del gas (atm)

M : Peso molecular del gas (Kg/Kmol)

R : Constante universal de los gases (atm.m³/Kmol.K)

T : Temperatura del gas (K)

Z : Factor de compresibilidad (Adimensional)

El Factor de compresibilidad (Z) representa la relación entre el volumen real de un gas y el volumen ideal del mismo. Este factor se utiliza para comparar el comportamiento de un gas con respecto a la ecuación de gases ideales. (16)

La ecuación permite el conocimiento del volumen real de los gases.

(Ecuación 28) $P * V_{real} = n * R * T * z$

El valor de Z permite la corrección de los volúmenes a su comportamiento ideal, y tomando como base la ecuación sabemos que:

- ✓ Z=1, comportamiento como gas ideal (altas temperaturas y bajas presiones)
- ✓ Z>1, gas difícilmente compresible (altas temperaturas y presiones)
- ✓ Z<1, gas fácilmente compresible (bajas temperaturas y altas presiones) (16)

Para determinación de las propiedades de la mezcla a concentraciones específicas, requeridas para la etapa de diseño, se utilizó un software a disposición en la plataforma FisicaNet.

Sustancia	Fórmula	Fración molar	Mol kg	C_p J/mol K	C_v J/mol K	k C_p/C_v	T_c K	P_c bar
Vapor de agua:	H ₂ O	0.00000	0.018015	34.769	26.482	1.3129	647.10	220.64
Aire (atmosférico):	-	0.90000	0.028960	29.130	20.800	1.4005	132.42	37.74
Amoniaco:	NH ₃	0.00000	0.017031	36.953	28.280	1.3067	405.55	112.40
Argón:	Ar	0.00000	0.039948	20.830	12.480	1.6691	150.72	48.64
Benceno:	C ₆ H ₆	0.00000	0.078108	77.862	69.520	1.1200	561.80	48.54
i-Butano:	CH(CH ₃) ₃	0.00000	0.058124	94.163	85.846	1.0969	408.13	36.50
n-Butano:	C ₄ H ₁₀	0.00000	0.058124	100.365	92.048	1.0904	425.16	37.97
Ciclohexano:	C ₆ H ₁₂	0.00000	0.084161	127.519	119.177	1.0700	553.50	40.73
Ciclopentano:	C ₅ H ₁₀	0.00000	0.070134	112.622	104.280	1.0800	511.60	45.08
Cloro:	Cl ₂	0.00000	0.070906	35.317	27.004	1.3078	417.15	77.10
Criptón:	Kr ₂	0.00000	0.083800	21.037	12.622	1.6667	209.40	54.90
Decano:	CH ₃ (CH ₂) ₈ CH ₃	0.00000	0.142285	286.421	278.079	1.0300	617.70	21.00
Dimetil Eter:	(CH ₃) ₂ O	0.00000	0.046069	65.690	59.180	1.1100	400.05	52.70
Dióxido de azufre:	SO ₂	0.00000	0.064063	39.884	30.932	1.2894	430.75	78.84
Dióxido de carbono:	CO ₂	0.10000	0.044011	37.564	28.541	1.3161	304.19	73.82
Etano:	C ₂ H ₆	0.00000	0.030070	53.346	44.769	1.1916	305.50	49.10
Eteno (Etileno):	C ₂ H ₄	0.00000	0.028054	43.428	34.899	1.2444	283.05	51.20
Etino (Acetileno):	C ₂ H ₂	0.00000	0.026038	44.308	35.915	1.2337	308.35	61.90
Fluor:	F ₂	0.00000	0.037997	31.449	23.165	1.3576	144.30	52.15
Freón 11:	CCl ₃ F	0.00000	0.137368	77.613	68.321	1.1360	471.15	44.08
Xenón:	Xe	0.00000	0.131300	21.012	12.658	1.6600	289.74	58.38
Total = 1.00000								
Para calcular el factor de compresibilidad de la mezcla (Z) complete los siguientes datos								
Presión: <input type="text" value="1.01"/> bar - Temperatura: <input type="text" value="301.18"/> °C								
<input type="button" value="Calcular"/>								
Propiedades de la mezcla gaseosa								
k	=	1.3893						(Relación C_p/C_v)
mol	=	0.030465	kg					(Masa molar)
C_p	=	29.973	J/mol K	=	7.175	BTU/lb mol °R		(Calor específico a presión constante)
C_v	=	21.574	J/mol K	=	5.165	BTU/lb mol °R		(Calor específico a volumen constante)
R	=	8.3990	J/mol K	=	2.0100	BTU/lb mol °R		(Constante de los gases para la mezcla)
sT_c	=	149.60	K	=	269.27	°R		(Temperatura seudocrítica)
sP_c	=	41.35	bar	=	599.55	psi		(Presión seudocrítica)
sT_r	=	383.91						(Temperatura seudoreducida)
sP_r	=	4.90						(Presión seudoreducida)
$s\rho_r$	=	0.0034						(Densidad seudoreducida)
Z	=	1.00112						(Factor de compresibilidad)

Figura 9. Cálculo de las propiedades de la mezcla gaseosa a través del software Fisicanet.

Los resultados proporcionados por el software brindan las propiedades requeridas para el cálculo de diseño de la columna de absorción.

4.1.11. Caudal de gas (G)

La cantidad total de masa que ingresa por la parte inferior a la columna se la denomina G, esto es, la mezcla gaseosa de aire – CO₂, este caudal se expresa sobre unidad de área, ya que se relaciona con el área de sección transversal de la columna de absorción. Para el diseño es necesario expresar el caudal másico en unidades molares, ya que de esta manera también se expresan las relaciones de concentraciones.

$$(Ecuación 29) \quad G = \frac{v_{gas} * A * \rho_{gas}}{M_{gas}}$$

Donde:

G : Caudal del gas (Kmol/s)

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

A : Área de tubería (m²)

ρ_{gas} : Densidad de gas (Kg/m³)

M_{gas} : Peso molecular del gas (Kg/Kmol)

4.1.12. Concentraciones del gas en porcentaje molar (mezcla).

La cantidad de gas disponible en la corriente de alimentación debe considerarse en el diseño de una columna de absorción, ya que serán utilizadas para el trazado de las rectas de operación y equilibrio.

Las concentraciones pueden ser másicas, volumétricas o molares, las mismas que deben adaptarse al sistema que se está diseñando. Las concentraciones molares en la columna se presentan en concentración molar, donde se tiene 5% CO₂ y 95% Aire.

4.1.13. Presiones parciales del gas a la entrada

Una propiedad que rige la absorción gaseosa es la presión del sistema, además influye la presión parcial de cada componente, ya que es esta característica la que produce el flujo de masa de la fase gaseosa a la líquida. Además está ligado con el número de moles de cada componente y de las moles totales de la mezcla. (16)

(Ecuación 30) $P_i V = n_i R T$

Donde:

i: Componente de la mezcla gaseosa

P: Presión parcial del componente (atm)

V: Volumen de la mezcla (m³)

n_i: Número de moles del componente (Kmol)

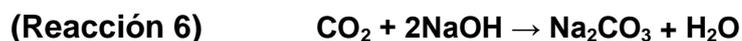
T: Temperatura de la mezcla (K)

R: Constante universal de los gases (atm.m³/Kmol.K)

El conocimiento de las moles totales gaseosas, además de la presión parcial permitirá el cálculo del consumo de solución para la absorción del componente gaseoso requerido.

4.1.14. Caudal del líquido a la entrada

La cantidad de líquido (L) requerida para el funcionamiento de la columna es necesaria para la correcta absorción del componente gaseoso. El flujo requerido se encuentra ligado con la reacción química, que ocurre en la columna, ya que ésta ayudará al incremento la cantidad absorbida y una reducción del flujo de ingreso. (18)



La solubilidad del componente gaseoso en el líquido rige también el consumo másico del líquido.

(Ecuación 31) $[\text{CO}_2] = 10^{-1,47} P_{\text{CO}_2}$

Donde:

[CO₂] : Concentración CO₂ (Kmol/m³)

P_{CO2} : Presión parcial CO₂ (atm)

En el cálculo molar de la solución se utilizan los valores de las propiedades físicas a las condiciones dadas.

(Ecuación 32) $L = \frac{\rho \cdot Q}{M}$

Donde:

L : Flujo total del líquido (Kg/min)

ρ : Densidad del líquido (Kg/l)

Q : Caudal del líquido (lpm)

M : Peso molecular del líquido (Kg/Kmol)

4.1.15. Caída de Presión

La caída de presión en la columna de absorción se calculará mediante el diagrama de correlación entre las propiedades de los flujos resultando con unidades de Pa/m. Esta caída de presión está relacionada directamente con el relleno de la columna y su altura.

Esta propiedad permite el cálculo de la velocidad de inundación de la columna y además con ello posterior cálculo del diámetro de la misma.

4.1.16. Velocidad de Inundación

La velocidad a la que el líquido circulará, dentro de la columna, deriva el diámetro de la misma ya que para la operación de la columna se debe tomar en cuenta la velocidad de inundación, es

decir cuando el líquido se empieza acumular dentro de la columna. (3)

Para el cálculo se utiliza la correlación generalizada de la caída de presión, el $C_s F_p^{0.5} V^{0.05}$ y la relación de los flujos dentro de la columna.

$$(Ecuación 33) \quad C_s F_p^{0.5} V^{0.05} = \textit{Gráfico}$$

$$(Ecuación 34) \quad C_s = v_o \sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_L - \rho_G}}$$

Donde:

C_s : Factor de capacidad (Adimensional)

F_p : Factor de empaque (Anexo III)

V : Viscosidad cinemática (cSt)

v_o : Velocidad de operación del líquido (m/s)

La velocidad de inundación es dos veces la de velocidad del líquido.

$$(Ecuación 35) \quad v_{inundación} = 2 * v_o$$

4.1.17. Área transversal

El conocimiento de la velocidad de operación, y del caudal del líquido permite el cálculo del diámetro de la columna ya que se diseñará una columna cilíndrica. (16)

$$\text{(Ecuación 36)} \quad Q = A * v_o$$

Donde:

Q : Caudal del líquido (m³/s)

A : Área transversal del cilindro (m²)

4.1.18. Relación L/G

La composición de la fase gaseosa y líquida en los puntos de la columna están dados por la recta de operación, este tipo de gráficas son muy utilizadas en el diseño de torres de enfriamiento, absorción, desorción y destilación.

$$\text{(Ecuación 37)} \quad m = \frac{L}{G}$$

Donde:

M : Pendiente de recta

L : Caudal líquido (Kmol/h.m²)

G : Caudal del gas (Kmol/h.m²)

La recta de operación está ligada a la pendiente de la recta mínima, la cual permite la consideración ideal, en estado óptimo del equipo, para un buen desempeño de la columna se considera lo siguiente.

(Ecuación 38) $L_{real} = 1,50 * L_{min}$

4.1.19. Recta de operación

La recta de operación indica el comportamiento de la columna en sus diferentes puntos, además de esta manera permitirá el cálculo posterior de número de etapas presentes en la absorción requerida. (16)

(Ecuación 39) $Y = \left(\frac{L}{G}\right) x_i + b$

Donde:

Y : Recta de operación

(L/G) : Pendiente de recta de operación

x_i : Concentración del líquido

b : Intersección de la recta.

4.1.20. Concentración del líquido a la salida.

La concentración del soluto a la salida, es la razón molar a la cual se encontrará el soluto con el líquido en la parte inferior de la columna de absorción, esto se calculará con los datos ya conocidos. (16)

(Ecuación 40)
$$x_1 = \frac{y_1 - y_2}{m}$$

Donde:

y_1 : Concentración de CO₂ en la entrada de la columna.

y_2 : Concentración de CO₂ en la salida de la columna

m : Pendiente de la recta de operación

x_1 : Concentración de salida del líquido

4.1.21. Número de unidades de transferencia (N_{OG})

El número de unidades de transferencia es necesario para el cálculo de la altura total de la columna de absorción, en el caso que se presente un paralelismo en la recta de operación y la de equilibrio el número de unidades de transferencia será igual al número de platos en una columna de absorción. (3)

El N_{OG} está regido por las concentraciones de ingreso y salida, además de las concentraciones en la curva de equilibrio, las ecuaciones para el cálculo son las siguientes.

$$(Ecuación 41) \quad (y - y^*)_M = \frac{(y - y^*)_{fondo} - (y - y^*)_{cabeza}}{\ln\left(\frac{(y - y^*)_{fondo}}{(y - y^*)_{cabeza}}\right)}$$

$$(Ecuación 42) \quad N_{OG} = \frac{y_1 - y_2}{(y - y^*)_M}$$

4.1.22. Altura de una unidad de transferencia (H_{OG})

En el caso de columnas rellenas se debe calcular la altura del relleno necesario para la absorción requerida, mediante los datos de fase líquida o gaseosa, y así también determinar por cuál de éstas se encuentra regida la transferencia de masa. (3)

$$(Ecuación 43) \quad H_{OG} = \frac{(L/S)}{K_x a}$$

$$(Ecuación 44) \quad H_{OG} = \frac{(G/S)}{K_y a}$$

Donde

$K_x a$ y $K_y a$: Coeficientes globales de transferencia de masa
(Kg/h.m³)

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

4.1.23. Coeficiente total de transferencia de masa K_L

El coeficiente global de transferencia de masa, para el caso de un sistema con alimentación líquida de NaOH y CO₂, se encuentra estudiado en la investigación 'PACKED COLUMN MASS TRANSFER COEFFICIENTS FOR CONCURREND AND COUNTERCURRENT FLOW: AN ANALYSIS OF RECENT WORK' de John D. Miller y Thomas R. Rehm en la Universidad de Arizona. Dentro de la investigación podemos encontrar los valores experimentales, del coeficiente global de transferencia de masa, determinados para varios sistemas en distintas condiciones. (19)

Tabla 5. Coeficientes K_L (lb/h.ft³)

Fuentes de Estudio	Koch et al (1949)	Sherwood & Holloway (1939)	Sherwood & Holloway (1939)
Empaque	3/8" – 1 1/4" Anillos Raschig	1/2" Anillos Raschig	1/2" Monturas Berl
G (lb/h.ft²)	18.75 – 84.3	100	230
L (lb/h.ft ²)	1500	1090	2017
	2000	1436	2434
	3000	2120	3166
	4000	2793	3817
	6000	4122	4967
	8000	-	3224
	10000	-	3968
			9718

En la tabla apreciamos los valores de coeficientes para flujos contracorrientes de un sistema de CO_2 – Aire – Agua, las mismas condiciones que simula nuestro sistema, por operar con un solvente diluido, además de presentar varios tipos de rellenos y flujos que deben de involucrarse en el diseño de la columna. (19)

4.1.24. Datos de equilibrio

La transferencia del componente gaseoso al líquido depende de la diferencia del equilibrio que exista en el sistema, por este motivo es necesario el conocimiento de las características en equilibrio del sistema.

La solubilidad de un compuesto gaseoso se describe como la cantidad de gas que se transfiere a un líquido relativamente no volátil a una temperatura y presión dadas, ya que se conoce que la propiedad se verá afectada directamente con estas dos condiciones.

En el caso de mezclas gaseosas, la solubilidad en el equilibrio se encontrará en función de la temperatura y además de las presiones parciales de la mezcla gaseosa, en el caso del cálculo

de diseño de esta columna se considera al aire como un componente muy insoluble en el agua, por lo tanto la absorción solo se verá afectada por la presión parcial del CO_2 .

Una de las consideraciones que se toman es que la fase líquida es ideal, por este motivo la presión parcial puede ser calculada sin determinaciones experimentales. Las características para la consideración ideal son las siguientes:

- ✓ Las fuerzas de atracción y repulsión promedio en la solución no presentan variaciones en la mezcla de componentes.
- ✓ Existe variación lineal entre el volumen de la solución y la composición.
- ✓ No existe variación de calor al mezclar los componentes, en el caso de gases solubles en líquidos, esto no toma en cuenta el calor de condensación del gas.
- ✓ En la solución, la presión de vapor total cambia linealmente con la composición.

La idealidad en las soluciones reales no existe, pero existen unas que, para soluciones en ingeniería, se asemejan a lo ideal lo que permite poder hacer esta consideración. La mezcla gaseosa en

equilibrio también se la puede considerar en la idealidad, donde se permitirá el cálculo con la presión parcial del soluto gaseoso y la Ley de Raoult.

$$(Ecuación 45) \quad p^* = p x$$

El uso de la Ley de Raoult nos da a conocer la presión parcial de los componentes, además se debe conocer la concentración del soluto en el líquido por lo que se utilizará la Ley de Henry.

$$(Ecuación 46) \quad y^* = \frac{p^*}{p_t} = mx$$

Siendo m una constante que varía para cada uno de los gases y la presión parcial.

$$(Ecuación 47) \quad m = 10^{-1,47} * p^*$$

4.1.25. Selección de cuerpo de empaque

La selección del tipo de relleno a utilizar está restringido por varias consideraciones del sistema, en este caso la columna a diseñar utilizará un empaque aleatorio, la restricción en columnas de laboratorio o plantas piloto es de no ser mayor a 1 pulgada de diámetro. Las principales restricciones que se tuvieron con la selección del relleno de la columna son (7):

- ✓ Químicamente inerte a los fluidos de la columna
- ✓ Resistencia mecánica sin peso excesivo
- ✓ Pasos adecuados con un mínimo de retención de líquido y caída de presión.
- ✓ Buena superficie contacto entre líquido y gas
- ✓ Costo razonable

Los empaques ordenados o estructurados presentan una menor caída de presión, pero se sufre una disminución en el área superficial. Además de disminuir las incrustaciones este tipo de empaques no son muy utilizados a nivel industrial ya que los estructurados se deben de ordenar en la medida específica, además de que resultan más costosos. Al utilizar una solución

acuosa no es necesario un relleno estructurado, además actualmente no se encuentra disponible en el mercado nacional (3).

Por lo tanto se seleccionó un relleno de anillos Raschig de ½" plásticos (PVC) para cumplir con los requerimientos del sistema.

4.2. Diseño de la columna de absorción

4.2.1. Cálculo del caudal de gas a la entrada

Como parámetro inicial de trabajo, se establece como condición de entrada una mezcla gaseosa con 5% de CO₂ y 95% de Aire (en porcentaje molar), esta distribución es en base a la búsqueda de una operación de la columna con gases pobres, que sustenten la utilización de las ecuaciones de diseño manejadas en el presente trabajo.

Esta concentración en mezcla equivale a tener un ingreso de moles totales de 0,06 Kmol/h, sometidos a las propiedades de operación de 1 atm y 28°C.

En el cálculo del flujo volumétrico que se requiere se realizó utilizando la Ecuación 28 con el conocimiento de las propiedades.

$$V_{CO_2} = \frac{0,003 * 0,082(273,25 + 28) * 1,00127}{1}$$

$$V_{aire} = \frac{0,057 * 0,082(273,25 + 28) * 1,00109}{1}$$

Con esto se llega a conocer que es necesario 1.40 m³/h de aire y 0.075 m³/h de CO₂.

4.2.2. Cálculo del área de la tubería de entrada

La disponibilidad que se encuentra en el laboratorio, permite adaptarnos a una tubería de ¾ pulgada para el servicio de aire, con lo cual utilizará la Ecuación 26 y de esta forma poder calcular la velocidad del aire necesaria.

$$A_{aire} = \frac{\pi * 0,01905^2}{4}$$

Dando un área de ingreso de 2.85E-4 m² en la tubería de alimentación de aire.

4.2.3. Cálculo de concentraciones del gas en porcentaje molar

Las relaciones molares del gas de alimentación se poseen, ya que al conocer que el gas de alimentación ingresa al 5% de CO₂ y 95% de aire, con un total de 0.06 Kmol/h.

$$Y = \frac{0,003}{0,06}$$

Por lo tanto se tiene una fracción molar de 0.05 en la alimentación gaseosa.

4.2.4. Cálculo de presiones parciales del gas de entrada

Debido a las condiciones de la mezcla, la presión parcial será proporcional a la concentración molar que existe, por este motivo, se puede deducir que las presiones parciales están distribuidas de 0.05 atm para el CO₂ y 0.95 atm para el aire, ya que las condiciones indican una operación a 1 atm.

4.2.5. Cálculo de caudal del líquido a la entrada

El cálculo de la corriente líquida se realizará en base a la solubilidad del CO₂ presente de la solución, además de la cantidad que de CO₂ que se desea absorber.

Tabla 6. Caudales molares de entrada y salida de la columna.

Compuesto	Ingreso (Kmol/h)	Salida (Kmol/h)
CO ₂	0.003	0.0023
Aire	0.057	0.057

Solubilidad del CO₂ en agua 1.69E-3 Kmol/m³.

Las condiciones planteadas para el diseño requieren un consumo de solución de 0.3994 m³/h, es decir 6.66 lpm.

4.2.6. Caída de Presión

El resultado gráfico de la caída de presión presenta un valor de 633Pa/m.

4.2.7. Velocidad de Inundación

Con el conocimiento de la caída de presión se precisa el punto en la gráfica de correlación para el factor de capacidad.

$$\text{(Ecuación 48)} \quad C_s F_p^{0.5} V^{0.05} = 0,353$$

Siendo $F_p=$ y $V=8,9$.

Usando la Ecuación 34 en el cálculo de la velocidad v_o indica un valor de 20,95 m/h y una velocidad de inundación de 41,9 m/h.

4.2.8. Área transversal

Utilizando el caudal y la velocidad operación , se obtiene como resultado el área transversal, y por consiguiente el diámetro que tendrá la columna.

$$A = 2,96E-2 \text{ m}^2$$

$$D = 0,19 \text{ m}$$

La columna de absorción se diseña con un diámetro de 20 cm.

4.2.9. Cálculo de la relación L/G

✓ Cálculo L_{real}

Para determinar el caudal real que se utilizará para la operación ,de la columna de absorción, se emplea la Ecuación 38 lo que

nos resulta un consumo de 10 lpm de solución para la absorción deseada.

✓ Cálculo L_{real}/G

En el cálculo de la pendiente de la recta se utiliza los nuevos valores de alimentación de la solución.

$$\frac{L_{real}}{G} = 9,985$$

4.2.10. Cálculo de la recta de trabajo

La recta de trabajo es necesaria para conocer la variación de las concentraciones de la solución.



Gráfico 1. Recta de operación del sistema.

4.2.11. Cálculo de la concentración del líquido a la salida

Debido al conocimiento de los moles absorbidos y del flujo real de solución es posible determinar la concentración de líquido a la salida, además que dicho valor puede ser ubicado en la curva de trabajo.

$$X_b = 1.75E-3$$

4.2.12. Cálculo de Número de Unidades de Transferencia

N_{OG} .

El conocimiento de la curva de operación y de equilibrio permite el cálculo del número de unidades de transferencia que permitirá la absorción indicada.

$$(y - y^*)_M = 7,52E - 4$$

$$N_{OG} = 1,56$$

4.2.13. Cálculo del coeficiente global de transferencia de masa K_L

El coeficiente de transferencia de masa se calcula adaptando las variables de las investigaciones previas a las condiciones a utilizar por nuestro equipo.

Tabla 7. Cálculo del coeficiente global de transferencia de masa.

		G (lb/ft ² .h)	
		55	100
L (lb/ft ² .h)	4000	2793	3817
	6000	4122	4967

Condiciones:

$$G = 11,6 \text{ lb/ft}^2 \cdot \text{h}$$

$$L = 4280 \text{ lb/ft}^2 \cdot \text{h}$$

$$K_L = 2015 \text{ lb/ft}^3 \cdot \text{h} = 32355 \text{ Kg/m}^3 \cdot \text{h}$$

En la investigación previamente mencionada ('PACKED COLUMN MASS TRANSFER COEFFICIENTS FOR CONCURREND AND COUNTERCURRENT FLOW: AN ANALYSIS OF RECENT WORK' de John D. Miller y Thomas R. Rehm en la Universidad

de Arizona.) donde se encuentran los valores del coeficiente global de transferencia de masa no presenta influencia con el flujo gaseoso, por este motivo se utiliza el K_{La} para el cálculo de la altura de unidad de transferencia. En este estudio se realizó las experimentaciones en varios tipos de condiciones y rellenos. (19)

4.2.14. Cálculo de Altura de Unidad de Transferencia H_{OG}

La altura de unidad de transferencia permite el cálculo de la altura total de relleno dentro de la columna, y de esta manera se puede definir claramente la fase de diseño de la columna de absorción.

$$H_{OG} = 0,65 \text{ m}$$

$$Z = 1,56 * 0,65 = 1 \text{ m}$$

De esta manera se define la altura total del relleno dentro de la columna de absorción en 1 m, el cual será dividido en tres cuerpos de 33cm cada uno, con el propósito de facilitar la limpieza y mantenimiento del mismo.

4.2.15. Obtención de los datos de equilibrio

La obtención de los datos en equilibrio se obtiene mediante el uso de la Ecuación 31 de solubilidad con las presiones parciales.

Tabla 8. Datos de equilibrio del sistema.

X	Y
0,00E +00	0,000
1,69E -04	0,005
3,39E -04	0,010
5,08E -04	0,015
6,78E -04	0,020
8,47E -04	0,025
1,02E -03	0,030
1,19E -03	0,035
1,36E -03	0,040
1,52E -03	0,045
1,69E -03	0,050



Grafico 2. Curva de equilibrio del sistema.

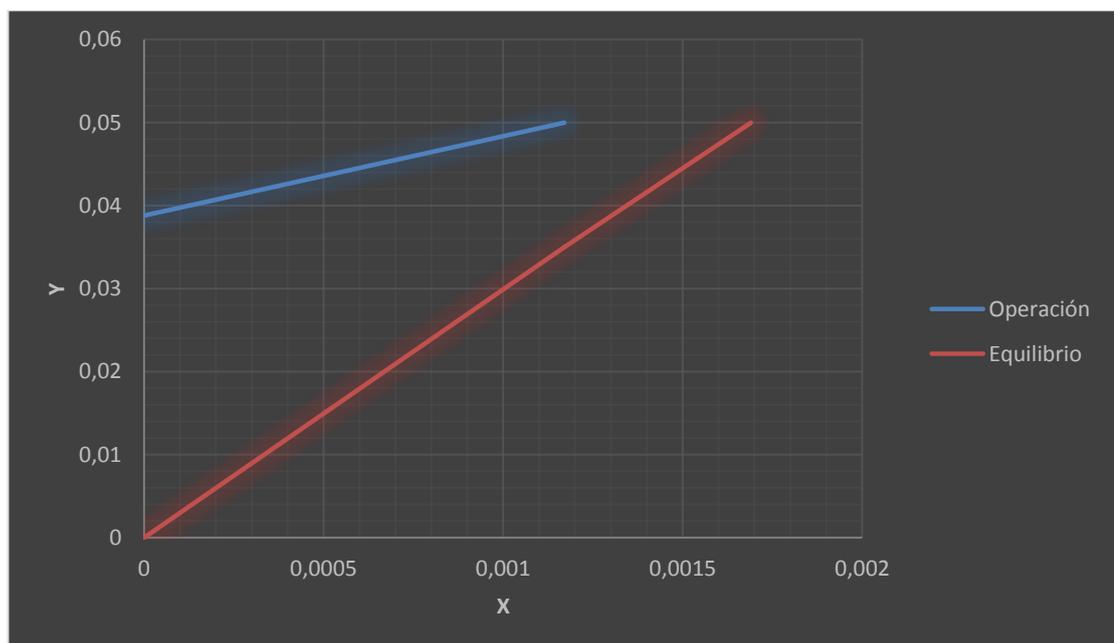


Grafico 3. Curva de operación y de equilibrio del sistema.

CAPITULO V

5. Características de construcción de la columna

5.1. Materiales de construcción y dimensiones del equipo

El cuerpo principal es la columna cilíndrica de acrílico formada por el ensamblaje de 5 cuerpos, los cuales se encuentran unidos entre sí por bridas del mismo material.

La columna se construyó transparente con el objetivo de que su utilización sea didáctica y permita apreciar el desarrollo de esta operación unitaria.

El material de construcción fue seleccionado por su bajo costo en comparación a otros materiales transparentes, por su resistencia a deformaciones térmicas para la elaboración de la columna, no reacciona con las corrientes que intervienen en la absorción gaseosa, y además puede exponerse a largos periodos de tiempo a la intemperie y a temperaturas de hasta 80°C conservando sus propiedades sin presentar cambios significativos en su color y apariencia. Este material es 100% reciclable y no emite compuestos volátiles.

En el Anexo VI se encuentra la ficha técnica de las especificaciones principales de los materiales utilizados para la construcción del sistema.

El cuerpo 1 corresponde a la cámara de distribución del gas, tendrá una altura de 29 cm y en su parte inferior una línea para salida del líquido rico en soluto.

El cuerpo 2, 3 y 4 corresponden a aquellos que contienen relleno en su interior tendrán las mismas dimensiones entre si, con una altura de 43 cm, de los cuales 33 cm serán de altura de relleno y 10 cm de espacio vacío.

El cuerpo 5 corresponde al ubicado en la parte superior de la columna, tendrá 29 cm de altura, es en donde se encuentran los tubos distribuidores de líquido y con el tubo de desprendimiento lateral por donde será expulsado el gas pobre en soluto al finalizar el proceso de absorción.

La siguiente tabla detalla las dimensiones de construcción de la columna.

Tabla 9. Dimensiones de columna de absorción.

Parámetro	Medida
Diámetro de la torre	20 cm
Diámetro de Entrada lateral de gas	11 cm
Diámetro de Salida lateral de gas	13 cm
Altura de cuerpos (de abajo hacia arriba)	
<ul style="list-style-type: none"> • Altura cuerpo 1 • Altura cuerpo 2 • Altura cuerpo 3 • Altura cuerpo 4 • Altura cuerpo 5 	29 cm 43 cm 43 cm 43 cm 29 cm
Atura de relleno en cuerpo 2,3 y 4	33 cm
Diámetro exterior de bridas	26 cm
Espesor de bridas	1 cm
Longitud de tubos de rocío de líquido X4 (parte superior)	20 cm c/u

5.2. Elección del relleno de la columna.

El relleno de la columna es de material plástico de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro y con una superficie específica de $108 \text{ m}^2/\text{m}^3$, siendo además la más alta en comparación con los demás empaques, además de la porosidad es de 0,91. Estos anillos se depositan en el interior de los tres cuerpos intermedios de la columna, en cada uno alcanza una altura de 33cm, será soportado por una rejilla del mismo material, que evitara el paso del relleno de un cuerpo al otro, pero si permitirá el paso del líquido y el gas sin impedimento, a su vez, ésta, colaborara con la distribución del líquido al pasar de un cuerpo al otro.

En la parte superior de la columna se encuentra la alimentación líquida y la salida del gas, la alimentación líquida cuenta con una cámara de dispersión que permite el descenso del líquido por debajo de la salida del gas por medio de 7 tubos de PVC de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro. En la parte inferior de la columna se ubica la salida de líquido y el ingreso de la mezcla gaseosa.

Las tuberías de alimentación y de salida son de PVC, puesto que este material no reacciona con las corrientes que intervienen en la absorción.

La siguiente figura ilustra las dimensiones de tabuladas en la Tabla 9.

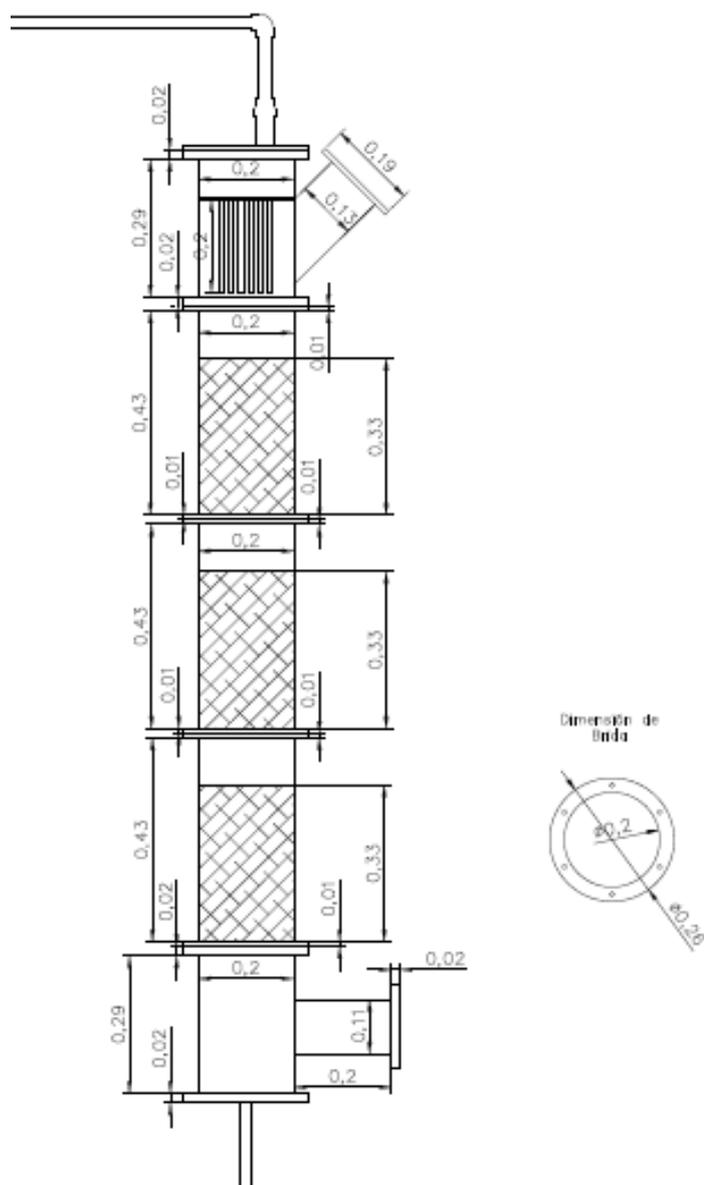


Figura 10. Dimensiones de columna de absorción gaseosa.

En el ANEXO V adjunto en el manual de operaciones se describe con en detalle los equipos que forman parte de las líneas utilitarias de alimentación, y fotografías descriptivas de la columna construida.

5.3. Diagrama de sistema de absorción gaseosa construido

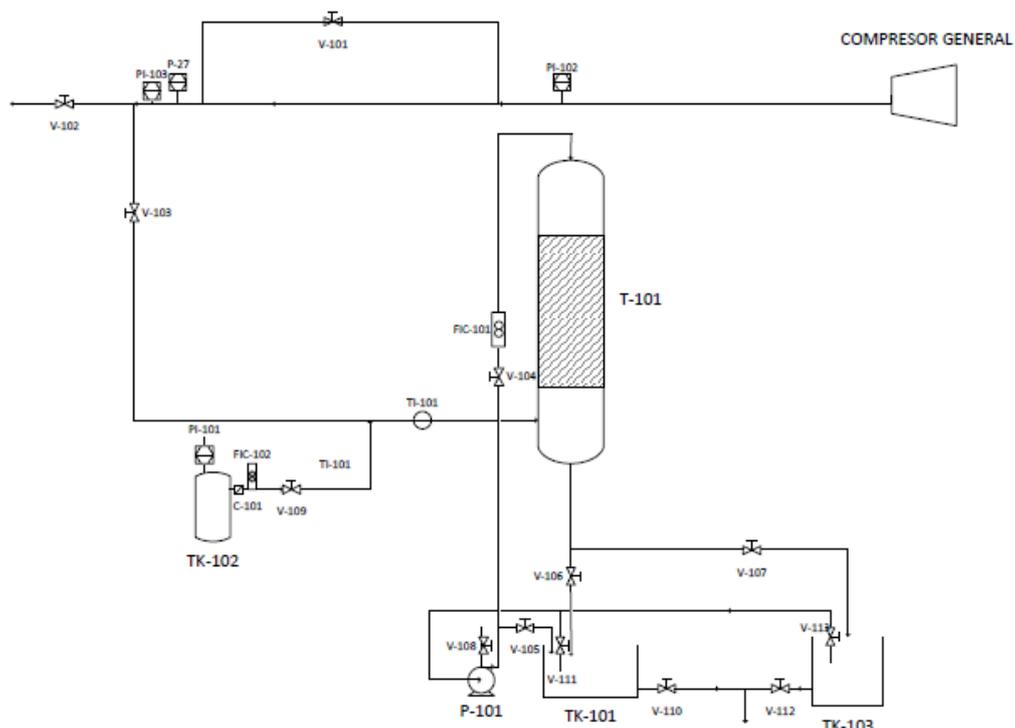


Figura 11. Diagrama de flujo del sistema de absorción gaseosa.

5.4. Condiciones de operación

La práctica tendrá una duración de 20 minutos y se llevará a cabo utilizando el equipo de protección personal, indicado en la sección de Anexo VI, según la tarea a desempeñar.

En la tabla a continuación se resumen las condiciones con las cuales se pondrá en marcha el equipo construido para obtener y verificar los resultados descritos en el presente proyecto.

Tabla 10. CONDICIONES DE OPERACIÓN		
Parámetro	Valor	Observación
Fase Gaseosa		
Flujo de Aire (l/min)	30	Medida la velocidad con anemómetro 1,8 m/s para luego ser calculado
Flujo de CO ₂ (l/min)	2	Regulado con flujómetro del tanque.
Temperatura de mezcla	30	Mediante el uso del pre calentador de salida ubicado en el tanque de CO ₂ se asegura que el flujo no se enfríe, al disminuir la presión, puesto que la reacción química del sistema es endotérmica, un descenso de temperatura desfavorecería la absorción.
Fase líquida		
Concentración (N)	0,0025	Elevar la alcalinidad de la solución, en la sección resultados se presentan cuadros comparativos de resultados variando la concentración de NaOH.
Flujo de solución acuosa (l/min)	10	Relacionado estequiométricamente con los moles que se desean absorber.
pH (aproximadamente)	11	Reducir la presencia de CO ₂ libre en la solución.

Cabe señalar que pueden hacerse una gran cantidad de variaciones a los parámetros para estudiar el comportamiento de este fenómeno de transporte de masa, tales como:

- ✓ Incremento de flujos
- ✓ Reducción de flujos
- ✓ Variación del pH inicial
- ✓ Variación de la concentración del gas
- ✓ Variación de la concentración de la solución líquida.
- ✓ Apertura de la línea de recirculación.

Se recomienda no cambiar la naturaleza de las corrientes seleccionadas sin antes revisar las limitaciones del equipo en cuanto a capacidad y compatibilidad de los materiales, puesto que podrían afectar el estado del equipo y deteriorarlo.

CAPITULO VI

6. Realización de pruebas de trabajo

6.1. Procedimiento de operación del equipo

El procedimiento de encendido y manejo del equipo se detalla en el Anexo IV, el cual es el adjunto del manual de operación respectivo, acompañado de la memoria técnica del equipo y las normas de seguridad requeridas para su utilización.

6.2. Toma de datos en campo

Para la realización de las pruebas de funcionamiento se procedió con anterioridad a verificar el estado de construcción del equipo, asegurando que cada una de sus partes estuvieran correctamente ajustadas y sus instrumentos de medición estuviesen calibrados y funcionales. Una vez realizada esta revisión se procedió a poner en marcha el equipo como se indica en el punto anterior, estabilizando las corrientes de alimentación según las especificaciones de prueba requeridas.

Se instaló un laboratorio de campo en donde se dispuso el siguiente equipamiento para seguimiento del proceso de absorción:

- ✓ Cronómetro digital hacer toma de muestra cada minuto.
- ✓ Un equipo medidor de pH digital, conocido como peachímetro, previamente calibrado
- ✓ Vaso de precipitación de 500ml para recolección de muestra.
- ✓ Dos probetas de 100ml para medición de volumen.
- ✓ Bureta de 50 ml para titulación de la muestra con NaOH.
- ✓ Bureta de 10ml para titulación de la muestra con HCl
- ✓ Fenolftaleína para indicador de cambio de pH en titulación, el cual es transparente al añadirse a muestras con pH inferior a 8,3, y su tonalidad cambia a rosa intenso al alcanzarlo.
- ✓ Anaranjado de metilo para indicador de cambio de pH en titulación, el cual es amarillo al añadirse a muestras con pH superior a 4,5, y su tonalidad cambia a rojo intenso al alcanzarlo.
- ✓ Solución de NaOH 0,02N para titulación.
- ✓ Solución de HCl 0,1N para titulación.
- ✓ Dos Matraces Erlenmeyer 250 ml.

- ✓ Piseta con agua destilada para lavados y enjuagues.

Las 11 primeras pruebas, indicadas en el plan de muestreo, corresponden a un seguimiento únicamente del pH para mediante las curvas obtenidas se caracterice de manera cualitativa el proceso de absorción gaseosa que se está llevando a cabo, esto es, a medida que el tiempo avanza la absorción gaseosa debe incrementar y reflejarse en un descenso del pH en la solución líquida, puesto que, el ácido carbónico y sus formas iónicas libres, formadas en la reacción, la acidificarán.

El equipo de medición debe ser calibrado antes de empezar cada ensayo.

Se midió el pH inicial de la alimentación líquida y posteriormente muestras de la solución líquida a la salida de la torre, en un vaso de precipitación, cada dos minutos.

Para la determinación cuantitativa de la cantidad de CO_2 absorbido en cada toma de muestra, se titularon dos muestras, de 100 ml cada una, en la misma recolección para determinación por separado del CO_2 libre y CO_2 combinado.

6.3. Determinación de CO₂ absorbido

6.3.1. Determinación del CO₂ libre:

Utilizando fenolftaleína como indicador se titula gota a gota con una solución de NaOH 0,02N siguiendo reacción:



Para luego aplicar el cálculo utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{(Ecuación 49)} \quad \text{ppm CO}_2 \text{ libre} = \frac{A \cdot 0,02 \cdot 44.000}{B}$$

A: ml de NaOH utilizados para titulación.

B: volumen inicial de la muestra (100ml).

Este procedimiento nos dará el valor en ppm de CO₂ presente en la muestra en forma de H₂CO₃, el cual por ser un ácido débil inestable y se descompone muy fácilmente y puede estar presente en sus formas iónicas. (4)

6.3.2. Determinación del CO₂ combinado.

Otra cantidad de la misma muestra será titulada utilizando anaranjado de metilo como indicador con una solución de HCl 0,1N siguiendo reacción (4):



Para luego aplicar el cálculo utilizando la siguiente ecuación:

(Ecuación 50) $\text{ppm CO}_2 \text{ combinado} = \frac{A \cdot 0,1 \cdot 44.000}{B}$

A: ml de HCl utilizados para titulación.

B: volumen inicial de la muestra (100ml).

La suma de estos dos valores de obtenidos en cada una de las titulaciones representara la cantidad total de CO_2 absorbidos durante el ensayo.

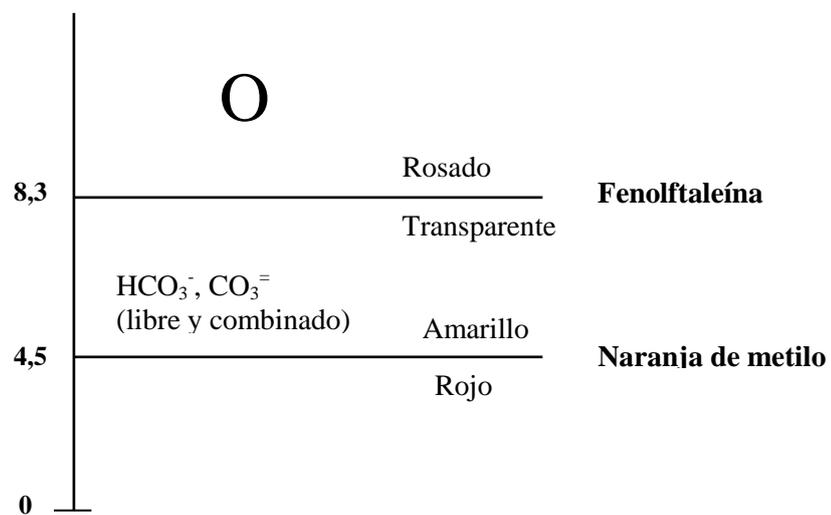


Figura 12. Indicadores de pH a utilizar para titulación y determinación de especies absorbidas.

Determinación de Velocidad de reacción:

Para la determinación nos guiaremos por la reacción intermedia del CO_2 con el agua indicada:



La cual tiene una velocidad de reacción dada por:

(Ecuación 51) $\text{Velocidad (gmol/L}\cdot\text{s)} = k_{\text{OH}} (\text{CO}_2) * (\text{OH}^-)$

En donde la constante de reacción para el kOH para una disolución infinita varía con la temperatura de acuerdo a la siguiente reacción (20):

(Reacción 10) $\text{Log (kOH)} = 13,635 - \frac{2895}{T}$

T: Temperatura, en K

6.4. Plan de muestreo

Una vez terminado de construir el equipo, instaladas sus líneas de alimentación y eléctricamente conectado a la fuente, se procedió a evaluarla para determinar:

- ✓ Que el equipo no presente fugas.
- ✓ Que opere como se planteó al inicio del presente proyecto.
- ✓ Determinar la absorción de CO₂ mediante seguimiento del pH.
- ✓ Verificar la influencia de las concentraciones, de las corrientes de alimentación, en la absorción con reacción química.
- ✓ Ajustar los parámetros para conseguir el óptimo funcionamiento de la columna.

Se realizaron 11 corridas al equipo, variando ciertos parámetros con el propósito de ajustarlos y comprobar su influencia dentro del proceso como parte del estudio del comportamiento del equipo, los cuales se mostraran de manera detallada en el punto 3.6, y se resumen en el siguiente cuadro de plan:

Tabla 11. PLAN DE MUESTREO PARA EVALUACION DE COLUMNA DE ABSORCIÓN GASEOSA

No	Parámetros				Objetivo
	Fluido	Caudal		Unidades	
1	Aire	13	222,32	l/min	Comprobar el correcto funcionamiento del equipo, detección de fugas, corrección de errores de manejo
	CO2	10		l/min	
	NaOH (0.1N)	10		l/min	
2	Aire	10	171,01	l/min	Corrección de errores de manejo, incremento parcial del flujo de CO2 para ajuste de corriente
	CO2	12		l/min	
	NaOH (0.1N)	10		l/min	
3	Aire	8	136,81	l/min	Corrección de errores de manejo, incremento del flujo de CO2 para ajuste de corriente
	CO2	20		l/min	
	NaOH (0.1N)	10		l/min	
4	Aire	13	222,32	l/min	Cambiar el equipo de regulación de CO2 por uno con calentamiento, verificar la influencia del mismo, se retoman los valores iniciales de flujo de CO2
	CO2	10		l/min	
	NaOH (0.1N)	10		l/min	
5	Aire	13	222,32	l/min	Mantener el calentamiento, disminuir el flujo de alimentación líquida, registrar cambios
	CO2	10		l/min	
	NaOH (0.1N)	5		l/min	
6	Aire	0	0	l/min	Mantener el calentamiento, mantener el flujo anterior de alimentación líquida, cerrar la alimentación de aire, registrar cambios
	CO2	10		l/min	
	NaOH (0.1N)	5		l/min	
7	Aire	0	0	l/min	Mantener el calentamiento, volver al flujo inicial de alimentación líquida, cerrar la alimentación de aire, registrar cambios
	CO2	10		l/min	
	NaOH (0.1N)	10		l/min	
8	Aire	4,5	76,956	l/min	Mantener el calentamiento, volver a alimentación líquida inicial, reducir flujo de aire aún más, mantener la alimentación inicial de CO2, registrar cambios
	CO2	10		l/min	
	NaOH (0.1N)	10		l/min	
9	Aire	4,5	76,956	l/min	Mantener el calentamiento, alimentar con el mismo flujo líquido pero solo de agua para verificar la influencia de concentración del NaOH en la reacción , mantener flujo de aire anterior, mantener la alimentación inicial de CO2, registrar cambios
	CO2	10		l/min	
	NaOH (0.1N)	0		l/min	
	Agua	10		l/min	
10	Aire	4,5	76,956	l/min	Mantener el calentamiento, volver a alimentación líquida inicial pero elevando su pH a 11 y reducir el CO2 libre presente en la solución para verificar la concentración optima de trabajo, mantener la alimentación inicial de CO2, registrar cambios
	CO2	10		l/min	
	NaOH (0.0025N)	10		l/min	
11	Aire	1,8	30,78	l/min	Disminuir flujo de mezcla gaseosa, manteniendo su relación

	CO2	2		l/min	porcentual, según solubilidad máxima del soluto con respecto al solvente, registrar estabilidad del sistema.
	NaOH (0.1N)	10		l/min	
12	Aire	1,8	30,783	l/min	Determinación cuantitativa de los Kmol/h absorbidos durante el proceso, elaboración de curvas de pH y CO2 vs tiempo
	CO2	2		l/min	
	NaOH (0.0025N)	10		l/min	
13	Aire	1,6	27,362	l/min	Determinación cuantitativa de los Kmol/h absorbidos durante el proceso, elaboración de curvas de pH y CO2 vs tiempo, comparar resultados, determinar estabilidad y características del sistema.
	CO2	2		l/min	
	NaOH (0.0025N)	10		l/min	

Con respecto a los valores tabulados para la corriente del aire, el primer valor corresponde a la velocidad medida con el anemómetro (m/s) y el segundo valor corresponde al caudal volumétrico (l/min) calculado usando la velocidad y el área transversal de la tubería por la cual el aire es conducido a la columna.

6.5. Resultados esperados

Previo a la realización de las pruebas de campo, se plantean las siguientes expectativas:

- ✓ Lograr un significativo descenso en el pH, lo cual refleje la efectiva absorción del CO₂ desde la mezcla gaseosa.
- ✓ Que el sistema alcance un estado de estabilización de manera rápida.

- ✓ Que se absorba un porcentaje de CO_2 de 30%, aproximadamente, del que ingreso a la columna, porcentaje calculado de manera teórica.
- ✓ Que el equipo refleje de manera correcta la Operación Unitaria de absorción gaseosa y no presente fallas de diseño o construcción.
- ✓ Determinar satisfactoriamente el CO_2 libre o combinado que se encuentra a la salida de la columna.
- ✓ Que la concentración de CO_2 libre determinado en la corriente líquida de salida de columna, sea mayor a la concentración de CO_2 combinado en la misma.

6.6. Desarrollo del equipo

6.6.1. Resultados obtenidos

Prueba 1

✓ 4,3 % de CO₂

Tabla 12. Condiciones de operación, prueba 1.

Aire	222,32	l/min
CO ₂	10	l/min
NaOH (0.1N)	10	l/min

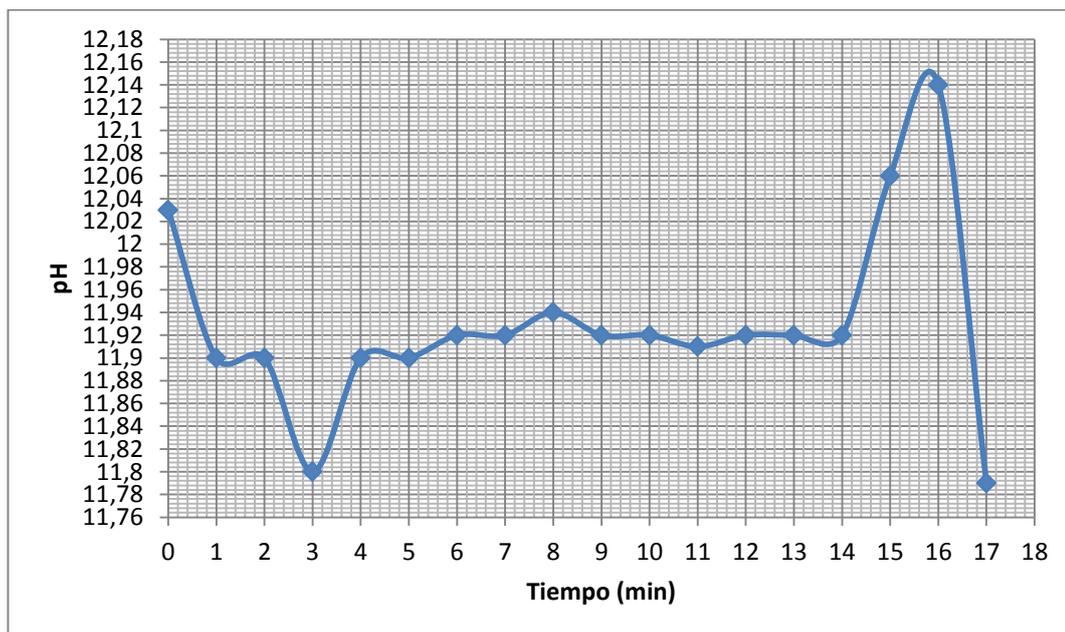


Gráfico 4. Curva experimental pH vs tiempo, prueba 1.

Resultado:

El equipo no presento fugas, y las válvulas funcionaron de la manera esperada, inicialmente el pH desciende de 12,03 a 11,8 siendo el valor más bajo alcanzado, el resto de la prueba presento solo fluctuaciones alrededor de este valor, pero no hubo mayor descenso en el pH, por lo que no se alcanzó un resultado satisfactorio.

Prueba 2

✓ 6,56 % de CO₂

Tabla 13. Condiciones de operación, prueba 2.

Aire	171,01	l/min
CO ₂	12	l/min
NaOH (0.1N)	10	l/min

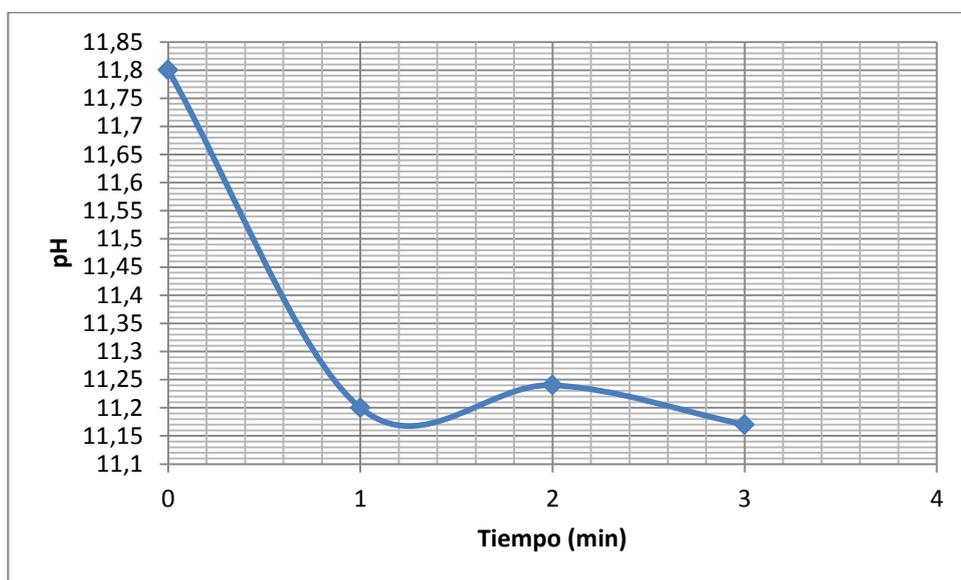


Gráfico 5. Curva experimental pH vs tiempo, prueba 2.

Resultado:

La absorción fue un poco mayor puesto que se aumentó el flujo de CO_2 , se observó un rápido descenso en el pH desde 11,8 hasta un 11,17, con lo que se pensó que el flujo del aire dificultaba el ingreso de CO_2 a la columna.

Prueba 3

✓ 12,76% de CO_2 .

Tabla 14. Condiciones de operación, prueba 3.

Aire	136,81	l/min
CO_2	20	l/min
NaOH (0.1N)	10	l/min

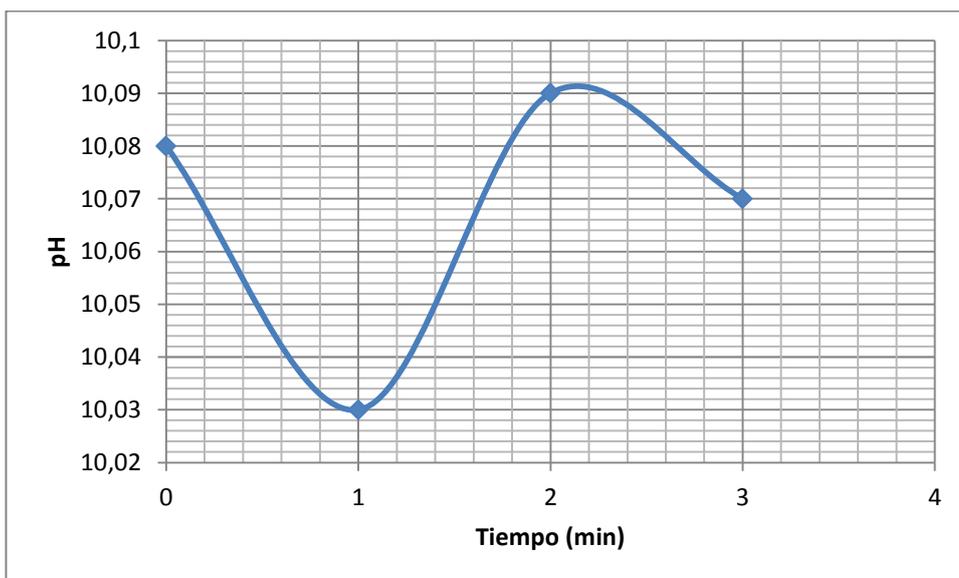


Grafico 6. Curva experimental pH vs tiempo, prueba 3.**Resultado:**

No hubo descenso significativo del pH, se declara prueba fallida debido a que el equipo de medición de pH se descalibró durante el procedimiento por lo que fue interrumpida.

Prueba 4

✓ 4,31% de CO₂.

Tabla 15. Condiciones de operación, prueba 4.

Aire	222,32	l/min
CO ₂	10	l/min
NaOH (0.1N)	10	l/min

- Inicio de pruebas con calentamiento

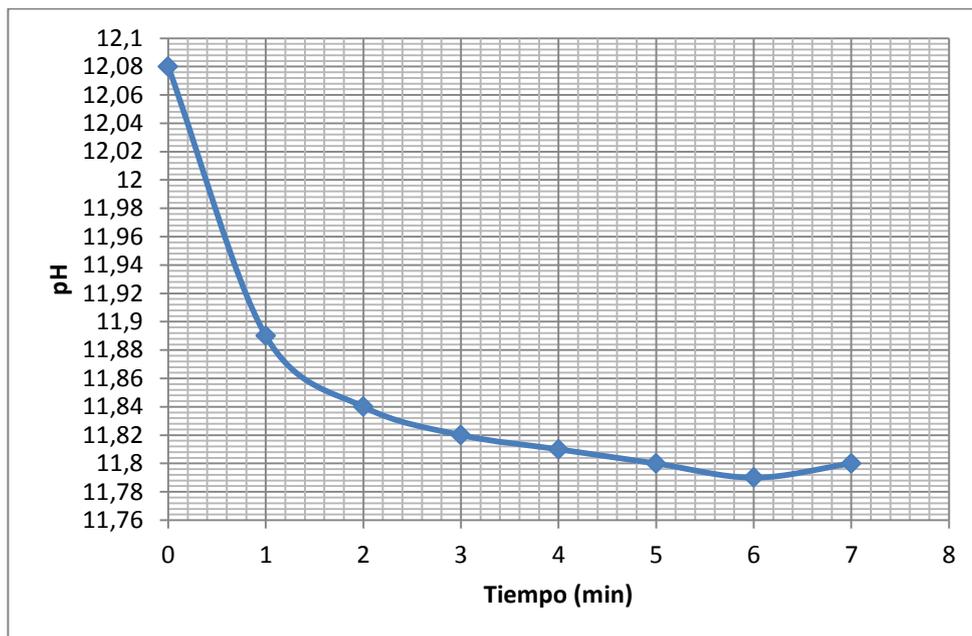


Grafico 7. Curva experimental pH vs tiempo, prueba 4.

Resultado:

El calentamiento de la corriente de CO_2 , para mantenerlo a temperatura ambiente, favoreció a la reacción dentro de la columna, así pues el pH tuvo un descenso de 12,08 a 11,8 en 7 minutos, pero aun así no se consideró como resultado satisfactorio o cercano al esperado.

Prueba 5

✓ 4,31% de CO₂.

Tabla 16. Condiciones de operación, prueba 5.

Aire	222,32	l/min
CO ₂	10	l/min
NaOH (0.1N)	5	l/min

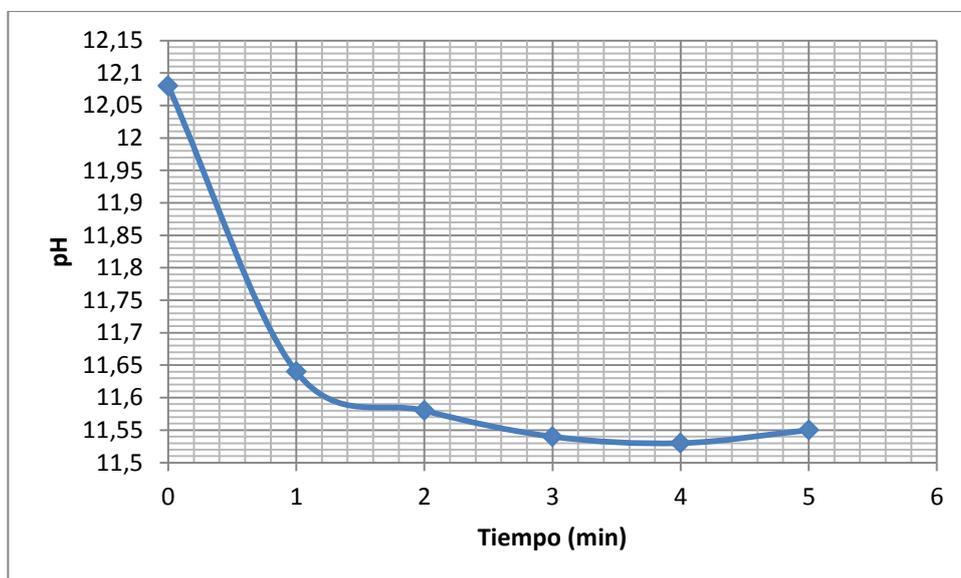


Gráfico 8. Curva experimental pH vs tiempo, prueba 5.

Resultado:

El disminuir el flujo de alimentación líquida, equivale a duplicar la concentración gaseosa, el pH tuvo un descenso rápido de 12,08 a 11,64, para luego estabilizarse en valores que oscilan alrededor del 11,55. Podemos ver el cambio es significativo con respecto a las anteriores pruebas.

Prueba 6

✓ 100% de CO₂.

Tabla 17. Condiciones de operación, prueba 6.

Aire	0	l/min
CO ₂	10	l/min
NaOH (0.1N)	5	l/min

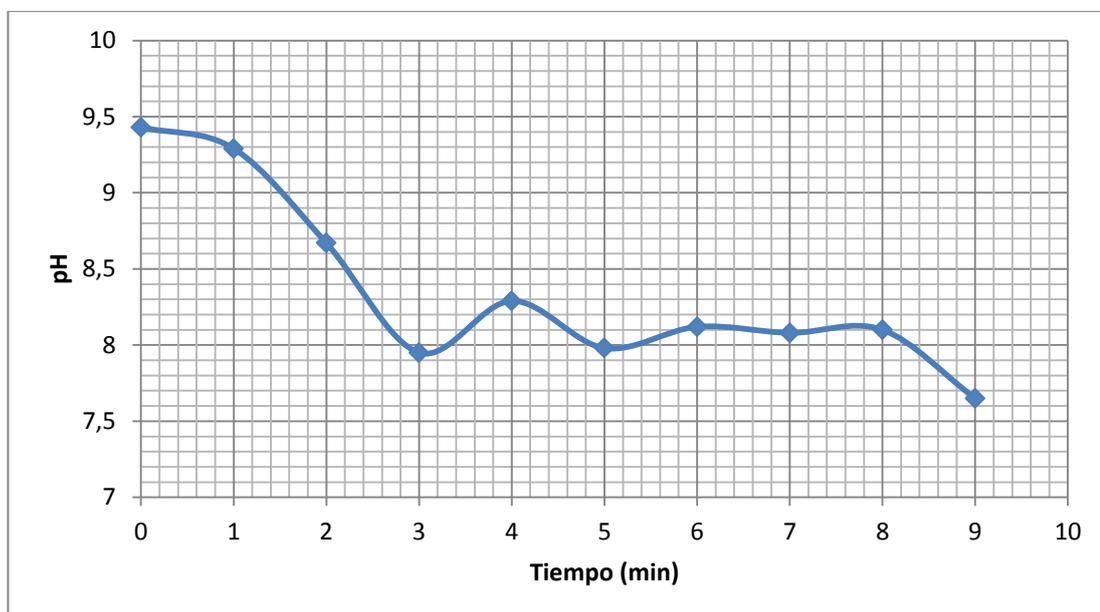


Gráfico 9. Curva experimental pH vs tiempo, prueba 6.

Resultado:

Quitando el flujo de aire, enviamos una corriente de CO₂ puro, se aprecia un descenso desde 9,43 a 7,65 esto es debido al incremento de la presión parcial del CO₂ lo que favorece a la solubilidad del mismo con el agua.

Prueba 7

✓ 100% de CO₂.

Tabla 18. Condiciones de operación, prueba 7.

Aire	0	l/min
CO ₂	10	l/min
NaOH (0.1N)	10	l/min

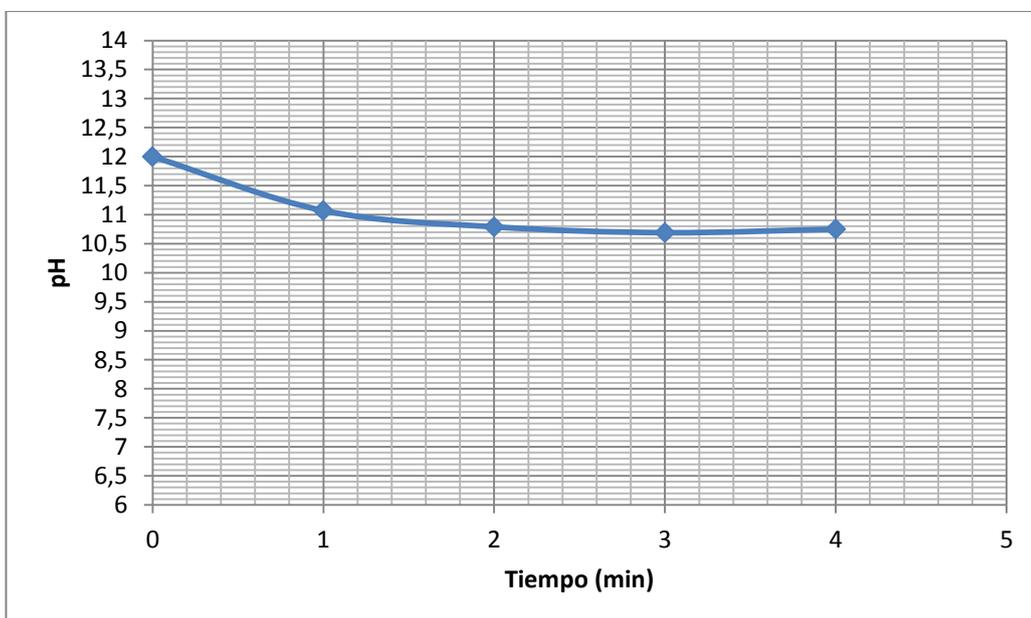


Gráfico 10. Curva experimental pH vs tiempo, prueba 7.

Resultado:

Al mantener la ausencia del aire, como en la prueba anterior la presión parcial del CO₂ puro favorece a la solubilidad lo cual se refleja en la gráfica en su descenso hasta 10,75.

Prueba 8

✓ 11,50% de CO₂.

Tabla 19. Condiciones de operación, prueba 8.

Aire	76,956	l/min
CO ₂	10	l/min
NaOH (0.1N)	10	l/min

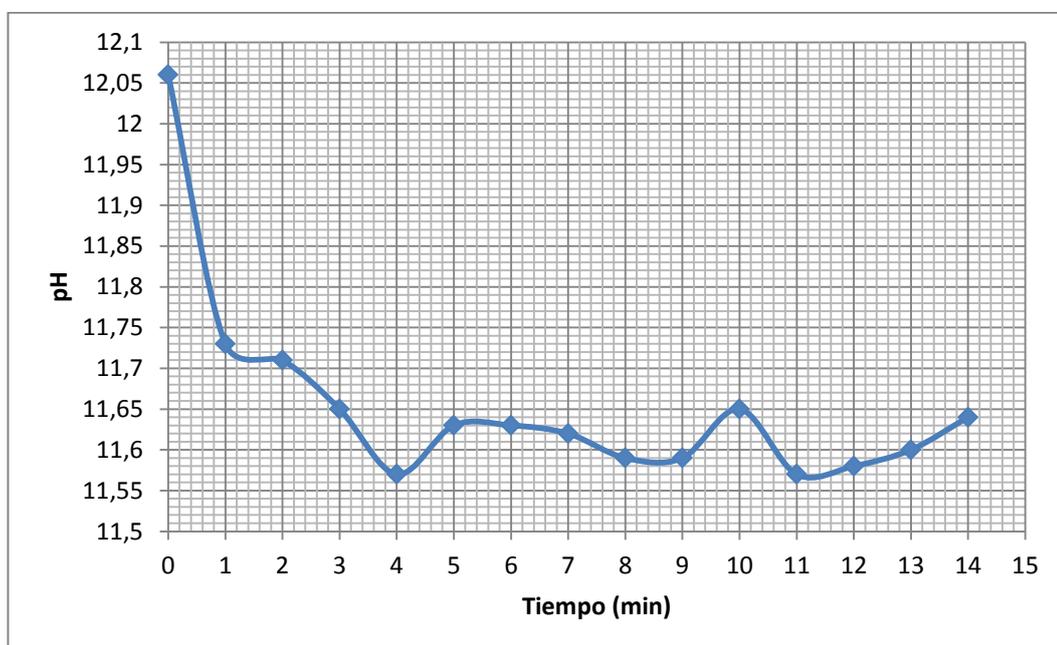


Grafico 11. Curva experimental pH vs tiempo, prueba 8.

Resultado:

Los datos de pH registrados continúan mostrando similar tasa de disminución que as pruebas anteriores, se reCálculo a 4,5 m/s la velocidad de entrada del aire a la columna como condición favorable de operación.

Prueba 9

✓ 11,50% de CO₂.

Tabla 20. Condiciones de operación, prueba 9.

Aire	76,956	l/min
CO ₂	10	l/min
NaOH (0.1N)	0	l/min
Agua	10	l/min

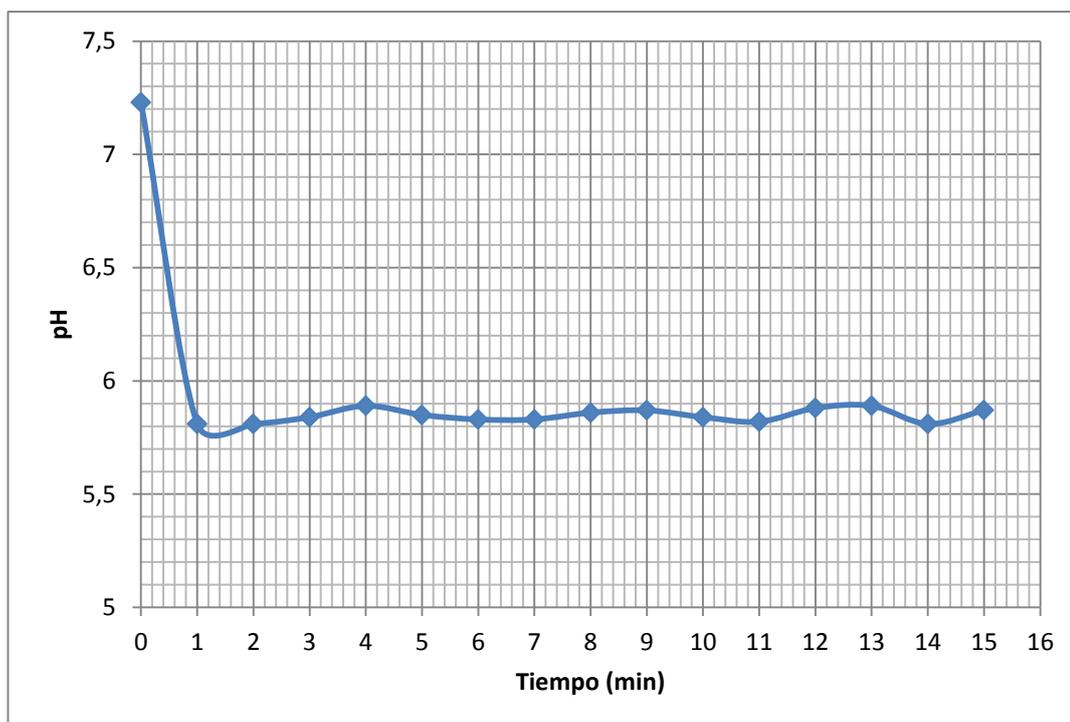


Gráfico 12. Curva experimental pH vs tiempo, prueba 9.

Resultado:

A finalizar esta prueba se notó que el pH desciende significativamente a usar agua pura como solvente, esto provoca que mayor cantidad de CO_2 libre se forme después de la absorción, lo que interviene directamente con el descenso.

Si bien aumenta la concentración de CO_2 libre, disminuye a cero la concentración de CO_2 combinado, lo que se traduce a una disminución global de la concentración de CO_2 , ratificando la mejora al utilizar la reacción química

Prueba 10

✓ 11,50% de CO₂.

Tabla 21. Condiciones de operación, prueba 10.

Aire	76,956	l/min
CO ₂	10	l/min
NaOH (0,04ppm)	10	l/min

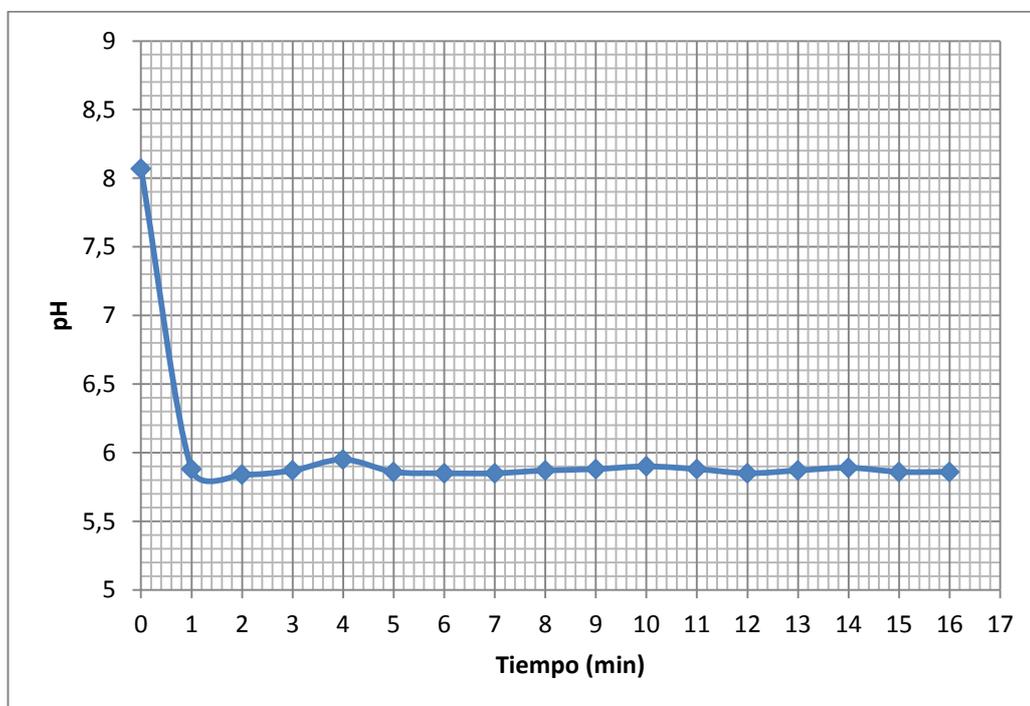


Gráfico 13. Curva experimental pH vs tiempo, prueba 10.

Resultado:

Se añade NaOH a la alimentación a una concentración de 0,04ppm con el objetivo de elevar su pH a 8, de esta manera reducir el CO₂ libre presente en cuerpo del agua, lo cual favorecerá a la absorción, permitiendo que aumente, lo cual se ve reflejado en la gráfica.

Prueba 11

✓ 6,10% de CO₂.

Tabla 22. Condiciones de operación, prueba 11.

Aire	30,78	l/min
CO ₂	2	l/min
NaOH (0.04ppm)	10	l/min

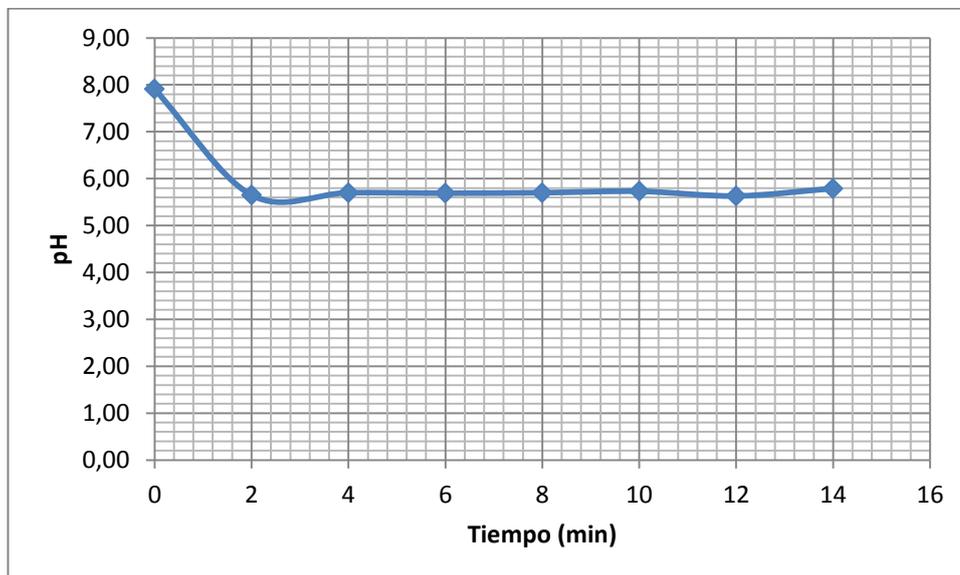


Gráfico 14. Curva experimental pH vs tiempo, prueba 11.

Una vez estudiado el manejo de la columna y algunas de sus variaciones en cuanto a sus condiciones de operación, se establecen los parámetros de funcionamiento para el presente proyecto en base al cálculo de la solubilidad máxima del soluto (CO_2) con respecto al solvente, con esto se reduce el flujo de mezcla gaseosa y se obtiene un descenso de pH de 7,91 a 5,79, de esta manera, en comparación con la prueba anterior, se obtiene como resultado que la solubilidad máxima había sido alcanzada y es por esto que el descenso del pH es similar en ambos ensayos.

Se procede a realizar los ensayos de medición cuantitativa de absorción del CO_2 , para lo cual mediante titulación se obtuvieron los siguientes resultados:

Prueba 12

✓ 6,10% de CO₂.

Tabla 23. Condiciones de operación, prueba 12.

Aire	27,36	l/min
CO ₂	2	l/min
NaOH (0,025 N)	10	l/min

Tabla 24. Resultados de pH de prueba 12.

Tiempo	pH
0	12,13
2	11,00
4	11,05
6	10,96
8	10,97
10	10,94
12	10,99
14	10,91
16	10,83
Promedio	10,96

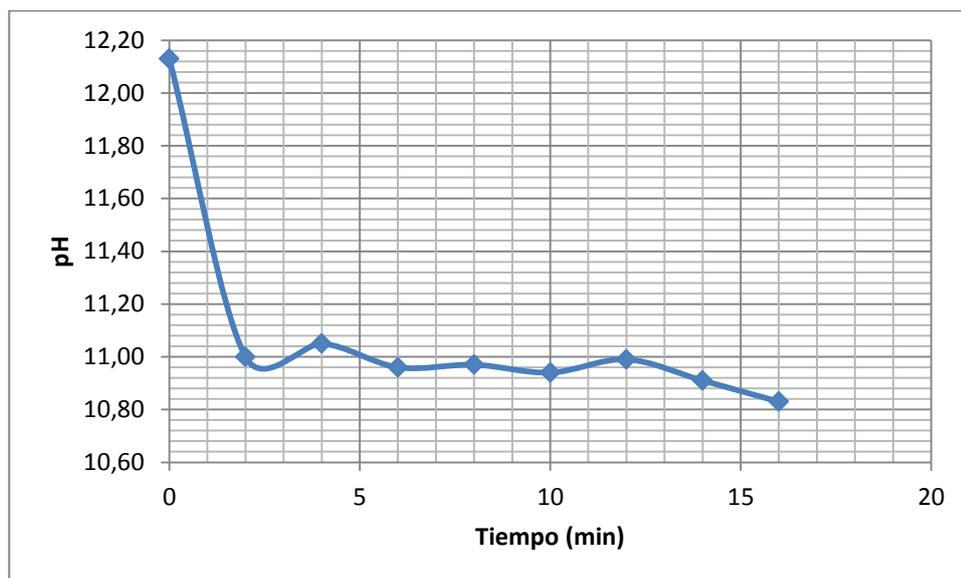


Grafico 15. Curva experimental pH vs tiempo, prueba 12.

Resultados:

- ✓ Para la experimentación se buscó la cuantificación de la absorción, pero por motivo de limitantes de titulación no se logró identificar los componentes.
- ✓ Se observa un claro descenso de pH desde el primer muestreo.
- ✓ Se recomienda descender la concentración para poder cuantificar la absorción.

Prueba 13

✓ 6,81% de CO₂.

Tabla 25. Condiciones de operación, prueba 13.

Aire	30	l/min
CO ₂	2	l/min
NaOH (0,0025N)	10	l/min

Tabla 26. Resultados cuantitativos de prueba 13.

		TITULACIÓN CON HCL 0,1N CO ₂ COMBINADO			TITULACIÓN CON NAOH 0,02N CO ₂ LIBRE			TOTAL
Tiempo	pH	ppm inicial CO ₂	ppm CO ₂ Abs	CO ₂ Kmol/h	ppm inicial CO ₂	ppm CO ₂ Abs	CO ₂ Kmol/h	CO ₂ absorbido Kmol/h
0	11,18	140,80	140,80	0,001920	0,00	0,00	0,000000	0
2	6,39	140,80	35,20	0,000480	0,00	50,16	0,000684	0,001164
4	6,37	140,80	-11,00	-0,000150	0,00	56,32	0,000768	0,000618
6	6,36	140,80	-4,40	-0,000060	0,00	54,56	0,000744	0,000684
8	6,38	140,80	6,60	0,000090	0,00	113,52	0,001548	0,001638
10	6,33	140,80	4,40	0,000060	0,00	58,96	0,000804	0,000864
12	6,30	140,80	-2,20	-0,000030	0,00	54,56	0,000744	0,000714
PROMEDIO	6,36						PROMEDIO	0,0009470

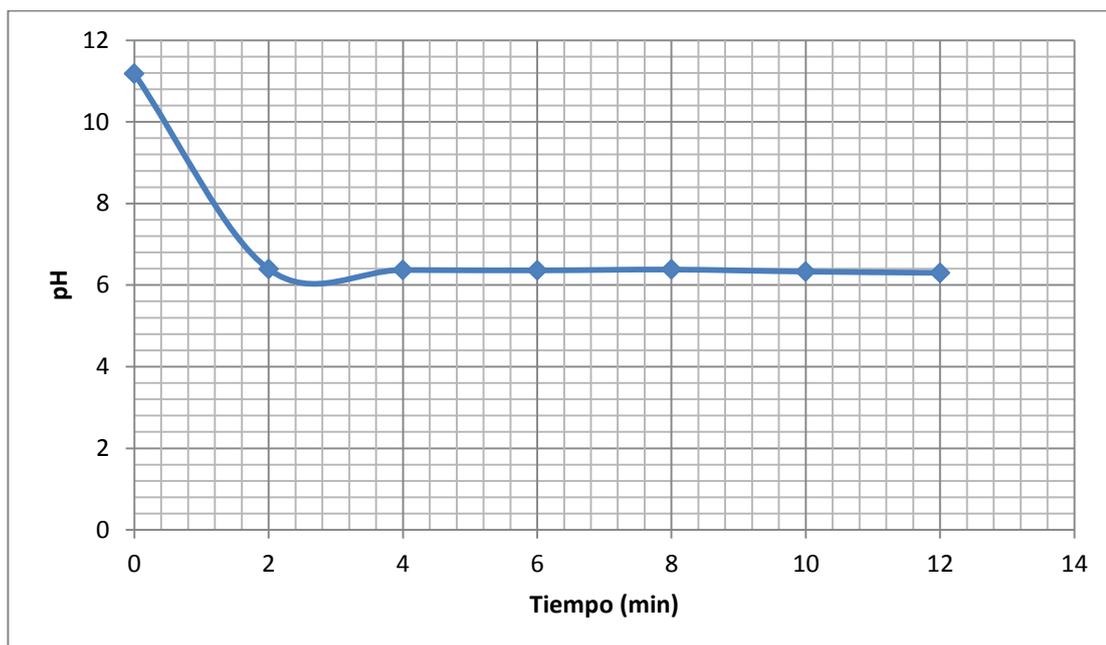


Grafico 16. Curva experimental pH vs tiempo, prueba 13.

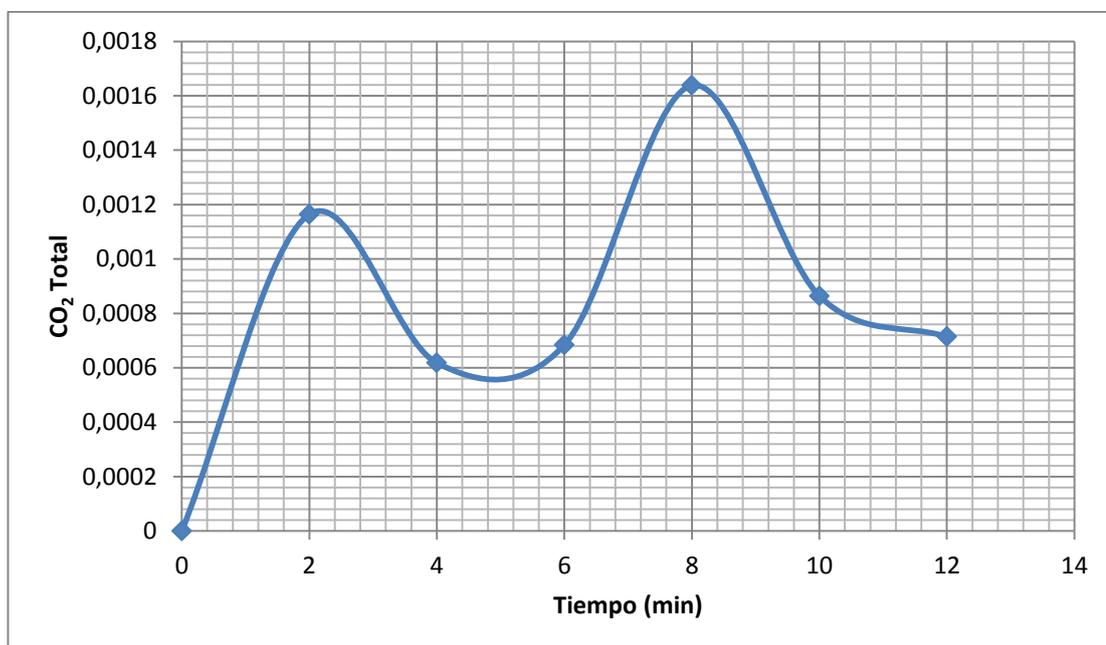


Grafico 17. Curva experimental CO₂ total absorbido (Kmol/h) vs tiempo, prueba 13.

Tabla 27. Determinación de velocidad de reacción prueba 14.

VELOCIDAD DE REACCION	
pH	6,36
pOH	7,645
[OH]	2,2646E-08
T (C)	27
T (K)	300,15
Volumen l/h	600
[CO ₂] (gmol/l)	0,00157833
kOH	9768,38097
Velocidad (gmol/l·s)	3,4916E-07
Velocidad (Kmol/m ³ ·h)	0,00125697

Resultados:

- ✓ Se observa un claro descenso del pH de 11,8 hasta 6,30 aproximadamente.
- ✓ Se observa un ligero incremento en la absorción del CO₂.

Prueba 14

✓ 5% de CO₂.

Tabla 28. Condiciones de operación, prueba 14.

Aire	30	l/min
CO ₂	2	l/min
NaOH (0,0025N)	17	l/min

Tabla 29. Resultados cuantitativos de prueba 14.

		TITULACION CON HCl 0,1N CO ₂ COMBINADO			TITULACION CON NaOH 0,02N CO ₂ LIBRE			TOTAL
Tiempo	pH	ppm inicial CO ₂	ppm CO ₂ Abs	CO ₂ Kmol/h	ppm inicial CO ₂	ppm CO ₂ Abs	CO ₂ Kmol/h	CO ₂ absorbido Kmol/h
0	11,00	140,80	140,80	0,003264	0,00	0,00	0,000000	0
2	6,50	140,80	17,60	0,000408	0,00	64,24	0,001489	0,001897
4	6,52	140,80	17,60	0,000408	0,00	61,60	0,001428	0,001836
6	6,49	140,80	17,60	0,000408	0,00	60,72	0,001408	0,001816
8	6,43	140,80	17,60	0,000408	0,00	55,44	0,001285	0,001693
PROMEDIO	6,49						PROMEDIO	0,0018105

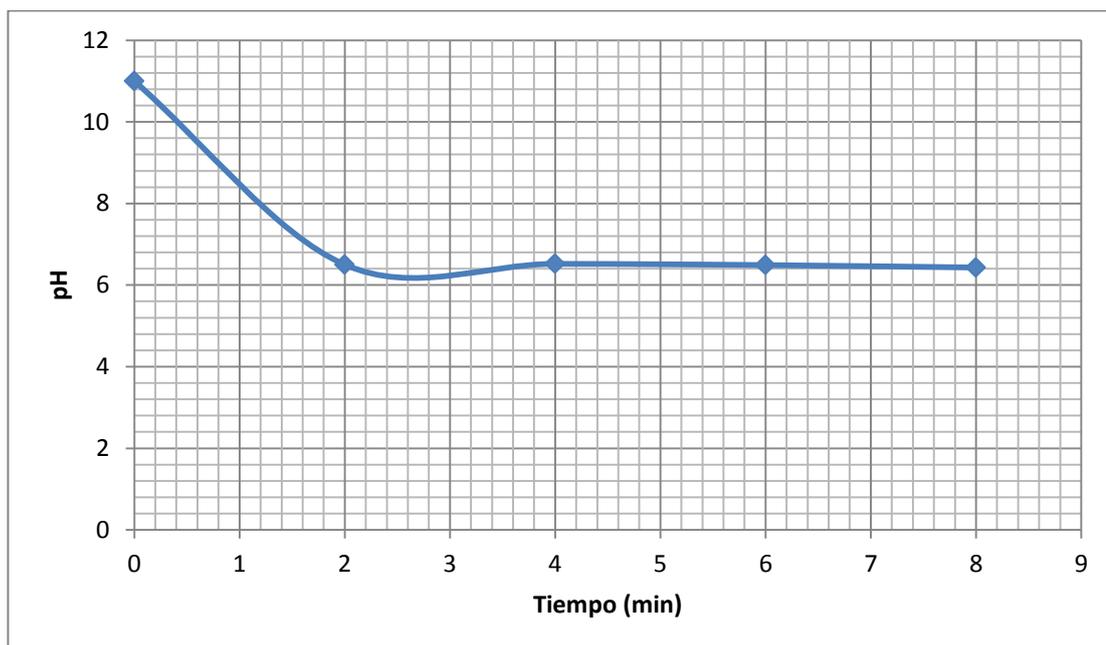


Grafico 18. Curva experimental pH vs tiempo, prueba 14.

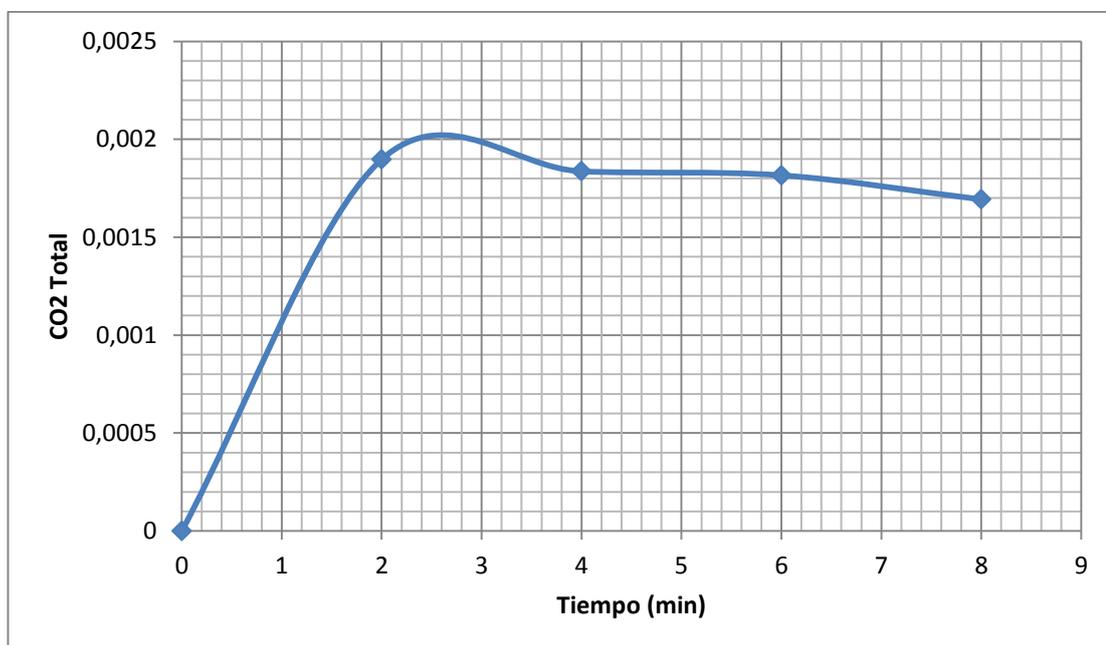


Grafico 19. Curva experimental CO₂ total absorbido (Kmol/h) vs tiempo, prueba 14.

Tabla 30. Determinación de velocidad de reacción prueba 14.

VELOCIDAD DE REACCION	
pH	6,49
pOH	7,515
[OH]	3,0549E-08
T (C)	27
T (K)	300,15
Volumen l/h	1020
[CO ₂] (gmol/l)	0,001775
kOH	9768,38097
Velocidad (gmol/l·s)	5,2969E-07
Velocidad (Kmol/m ³ ·h)	0,00190688

Resultados:

- ✓ Se observa un claro descenso del pH de 11 hasta 6,43 aproximadamente.
- ✓ Se observa un incremento en la absorción a 0,0018 Kmol/h.

Prueba 15

✓ 5% de CO₂.

Tabla 31. Condiciones de operación, prueba 15.

Aire	27	l/min
CO ₂	2	l/min
NaOH (0,0001N)	10	l/min

Tabla 32. Resultados cuantitativos de prueba 15.

Tiempo	pH	Titulación con HCl 0,1N CO ₂ Combinado			Titulación con NaOH 0,02N CO ₂ libre			TOTAL
		ppm inicial CO ₂	ppm CO ₂ Abs	CO ₂ Kmol/h	ppm inicial CO ₂	ppm CO ₂ Abs	CO ₂ Kmol/h	CO ₂ absorbido Kmol/h
0	9,98	79,2	79,20	0,001080	0	0	0	0
2	6,01	79,2	17,60	0,000240	0	51,04	0,000696	0,000936
4	5,97	79,2	-4,40	-0,000060	0	54,56	0,000744	0,000684
6	5,96	79,2	0,00	0,000000	0	61,60	0,000840	0,000840
8	6,0	79,2	-4,40	-0,000060	0	48,40	0,000660	0,000600
10	5,96	79,2	-28,60	-0,000390	0	56,32	0,000768	0,000378
12	5,97	79,2	19,80	0,000270	0	52,80	0,000720	0,000990
14	5,96	79,2	-4,40	-0,000060	0	49,28	0,000672	0,000612
16	5,91	79,2	-4,40	-0,000060	0	58,08	0,000792	0,000732
PROMEDIO	5,97						PROMEDIO	0,000722

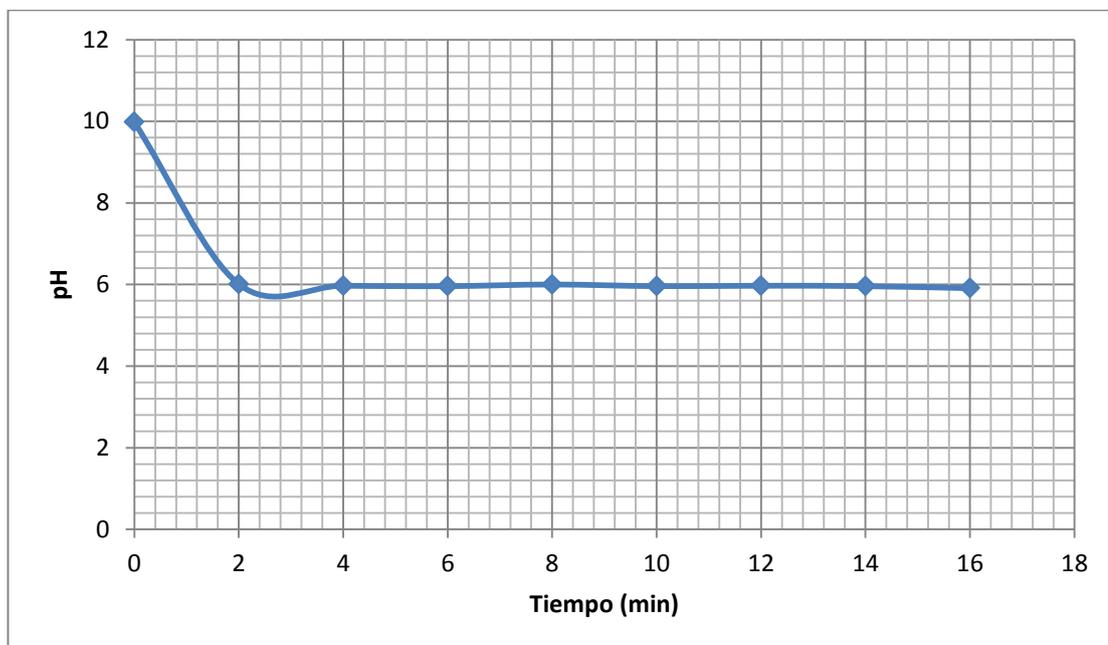


Gráfico 20. Curva experimental pH vs tiempo, prueba 15.

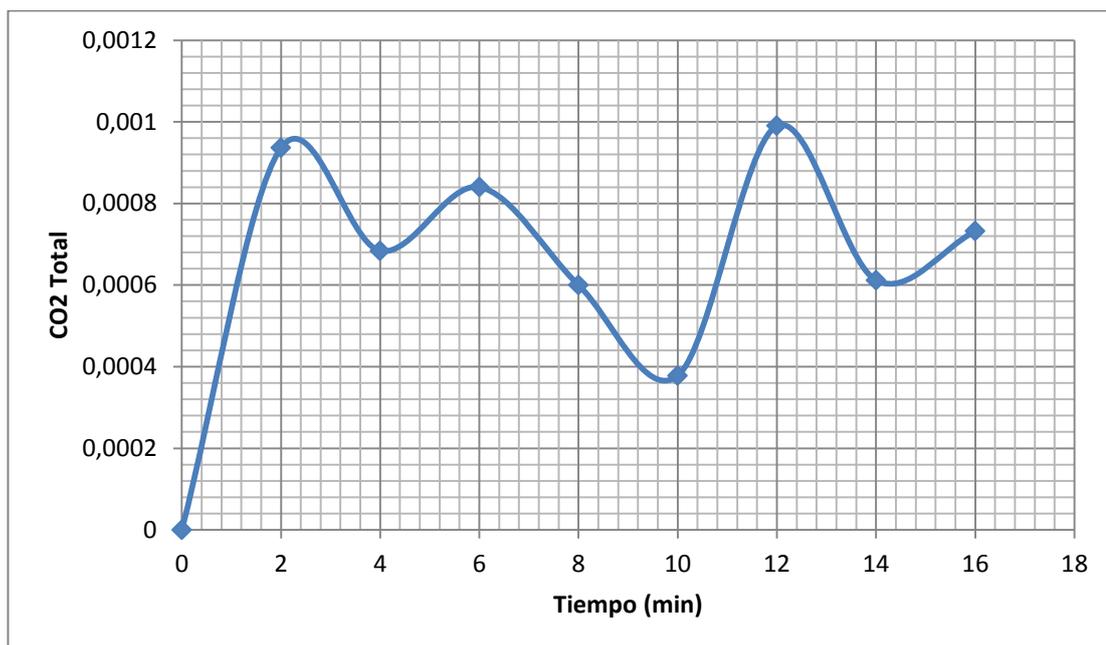


Gráfico 21. Curva experimental CO₂ total absorbido (Kmol/h) vs tiempo, prueba 15.

Tabla 33. Determinación de velocidad de reacción prueba 15.

VELOCIDAD DE REACCION	
pH	5,97
pOH	8,0325
[OH]	9,279E-09
T (C)	27
T (K)	300,15
Volumen l/h	600
[CO ₂] (gmol/l)	0,0012025
kOH	9768,38097
Velocidad (gmol/l·s)	1,09E-07
Velocidad (Kmol/m ³ ·h)	0,00039238

Resultados:

- ✓ Se observa un claro descenso del pH de 10 hasta 5,97 aproximadamente.
- ✓ Se observa una oscilación en el CO₂ absorbido ubicándose en un promedio de 0,0007 Kmol/h.

Prueba 16

✓ 5% de CO₂.

Tabla 34. Condiciones de operación, prueba 16.

Aire	29	l/min
CO ₂	2	l/min
NaOH (0,0001N)	17	l/min

Tabla 35. Resultados cuantitativos de prueba 16.

Tiempo	pH	Titulación con HCl 0,1N CO ₂ Combinado			Titulación con NaOH 0,02N CO ₂ libre			TOTAL
		ppm inicial CO ₂	ppm CO ₂ Abs	CO ₂ Kmol/h	ppm inicial CO ₂	ppm CO ₂ Abs	CO ₂ Kmol/h	CO ₂ absorbido Kmol/h
0	9,91	74,80	74,80	0,001734	0	0	0	0
2	6,05	74,80	24,93	0,000578	0	52,36	0,0012138	0,0017918
4	6,0	74,80	-4,40	-0,000102	0	44,44	0,0010302	0,0009282
6	6	74,80	2,20	0,000051	0	56,32	0,0013056	0,0013566
8	5,98	74,80	-2,20	-0,000051	0	53,68	0,0012444	0,0011934
PROMEDIO	6,02						PROMEDIO	0,0013175

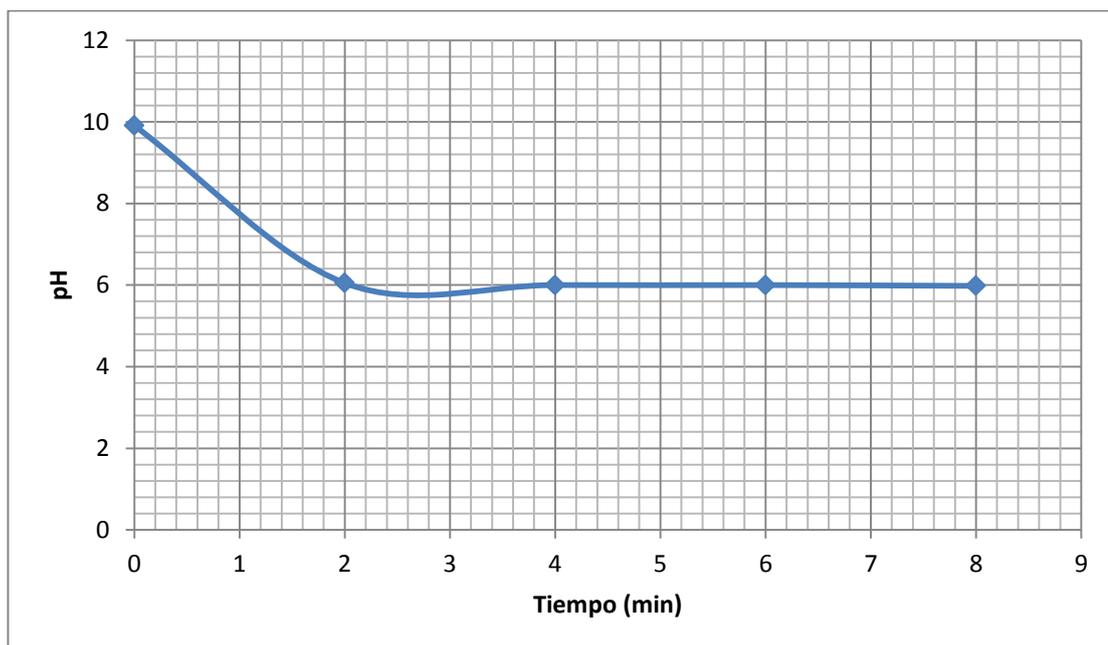


Grafico 22. Curva experimental pH vs tiempo, prueba 16.

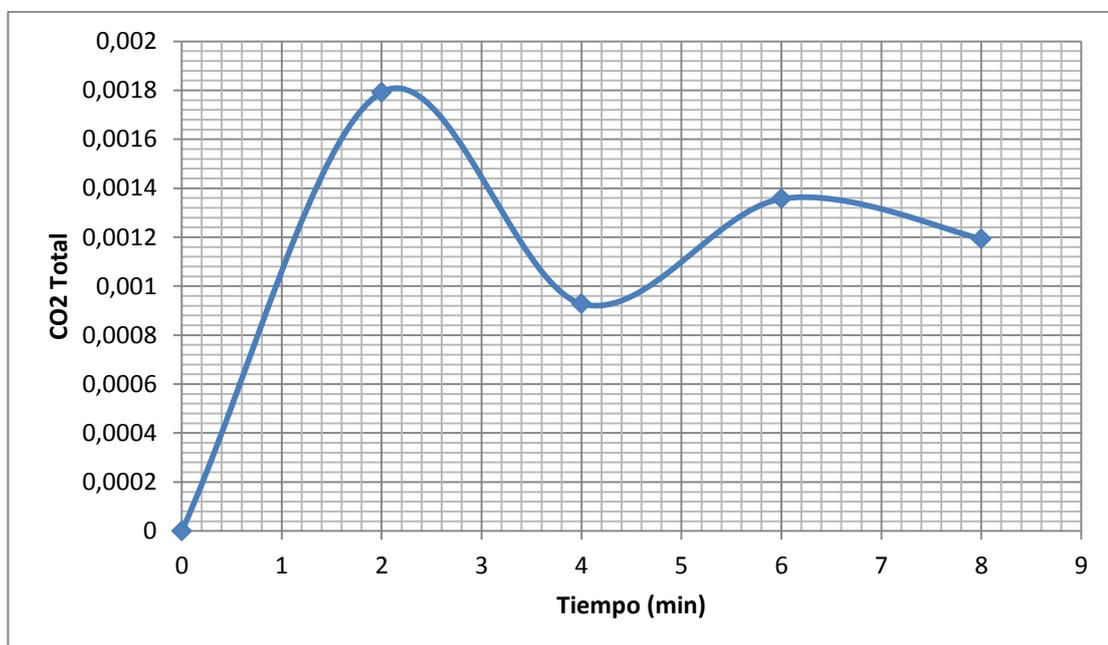


Grafico 23. Curva experimental CO₂ total absorbido (Kmol/h) vs tiempo, prueba 16.

Tabla 36. Determinación de velocidad de reacción prueba 16.

VELOCIDAD DE REACCION	
pH	6,02
pOH	7,9825
[OH]	1,0411E-08
T (C)	27
T (K)	300,15
Volumen l/h	1020
[CO ₂] (gmol/l)	0,00129167
kOH	9768,38097
Velocidad (gmol/l·s)	1,3136E-07
Velocidad (Kmol/m ³ ·h)	0,00047291

Resultados:

- ✓ Se observa un claro descenso del pH de 10 hasta 6,02 aproximadamente.
- ✓ Se observa una oscilación en el CO₂ absorbido incrementa considerando el encontrado a flujo de 10 lpm.

Prueba 17

✓ 5% de CO₂.

Tabla 37. Condiciones de operación, prueba 17.

Aire	27	l/min
CO ₂	2	l/min
NaOH (0,00001N)	10	l/min

Tabla 38. Resultados cuantitativos de prueba 17.

Tiempo	pH	Titulación con HCl 0,1N CO ₂ Combinado			Titulación con NaOH 0,02N CO ₂ libre			TOTAL
		ppm inicial CO ₂	ppm CO ₂ Abs	CO ₂ Kmol/h	ppm inicial CO ₂	ppm CO ₂ Abs	CO ₂ Kmol/h	CO ₂ absorbido Kmol/h
0	9	52,8	52,80	0,000720	0	0	0	0
2	5,92	52,8	23,47	0,000320	0	44,00	0,000600	0,000920
4	5,88	52,8	0,00	0,000000	0	52,80	0,000720	0,000720
6	5,92	52,8	0,00	0,000000	0	48,40	0,000660	0,000660
8	5,88	52,8	0,00	0,000000	0	44,88	0,000612	0,000612
10	5,87	52,8	-2,20	-0,000030	0	49,28	0,000672	0,000642
12	5,92	52,8	0,00	0,000000	0	48,40	0,000660	0,000660
14	5,92	52,8	2,20	0,000030	0	51,48	0,000702	0,000732
PROMEDIO	5,90						PROMEDIO	0,000707

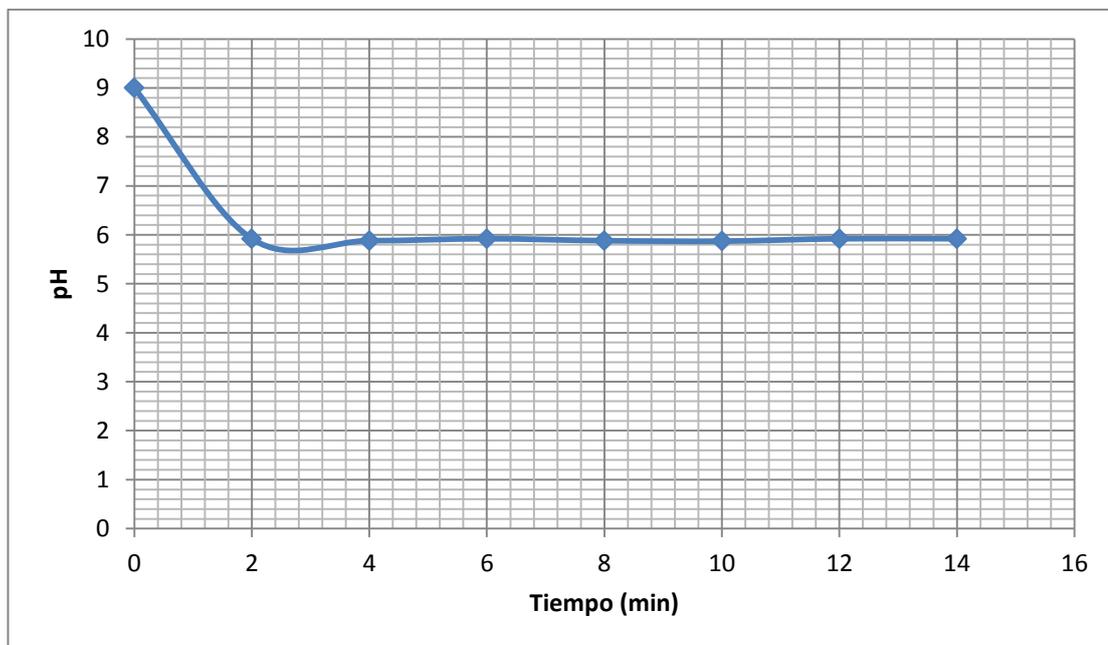


Grafico 24. Curva experimental pH vs tiempo, prueba 17.

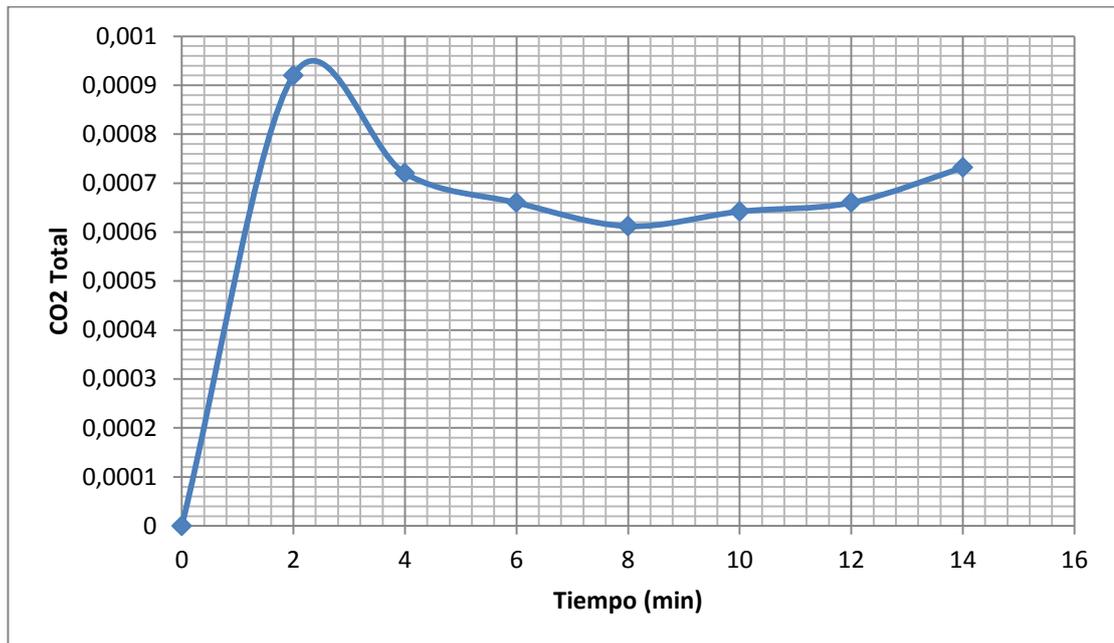


Grafico 25. Curva experimental CO₂ total absorbido (Kmol/h) vs tiempo, prueba 17.

Tabla 39. Determinación de velocidad de reacción prueba 17.

VELOCIDAD DE REACCION	
pH	5,90
pOH	8,09857143
[OH]	7,9695E-09
T (C)	27
T (K)	300,15
Volumen l/h	600
[CO2] (gmol/l)	0,00117762
kOH	9768,38097
Velocidad (gmol/l·s)	9,1676E-08
Velocidad (Kmol/m ³ ·h)	0,00033003

Resultados:

- ✓ Se observa un claro descenso del pH de 9 hasta 6,02 aproximadamente.
- ✓ Se observa una tendencia en la absorción de CO₂ en 0,0007 Kmol/h.

Prueba 18

✓ 5% de CO₂.

Tabla 40. Condiciones de operación, prueba 18.

Aire	27	l/min
CO ₂	2	l/min
NaOH (0,00001N)	17	l/min

Tabla 41. Resultados cuantitativos de prueba 18.

		Titulación con HCl 0,1N CO ₂ Combinado			Titulación con NaOH 0,02N CO ₂ libre			TOTAL
Tiempo	pH	ppm inicial CO ₂	ppm CO ₂ Abs	CO ₂ Kmol/h	ppm inicial CO ₂	ppm CO ₂ Abs	CO ₂ Kmol/h	CO ₂ absorbido Kmol/h
0	8,93	48,4	48,4	0,001122	0	0	0	0
2	5,81	48,40	7,333333	0,000170	0	50,16	0,0011628	0,0013328
4	5,75	48,40	-2,200000	-0,000051	0	63,36	0,0014688	0,0014178
6	5,71	48,40	2,200000	0,000051	0	64,24	0,0014892	0,0015402
8	5,78	48,40	-4,400000	-0,000102	0	47,52	0,0011016	0,0009996
10	5,74	48,40	4,400000	0,000102	0	49,28	0,0011424	0,0012444
PROMEDIO	5,75						PROMEDIO	0,00130696

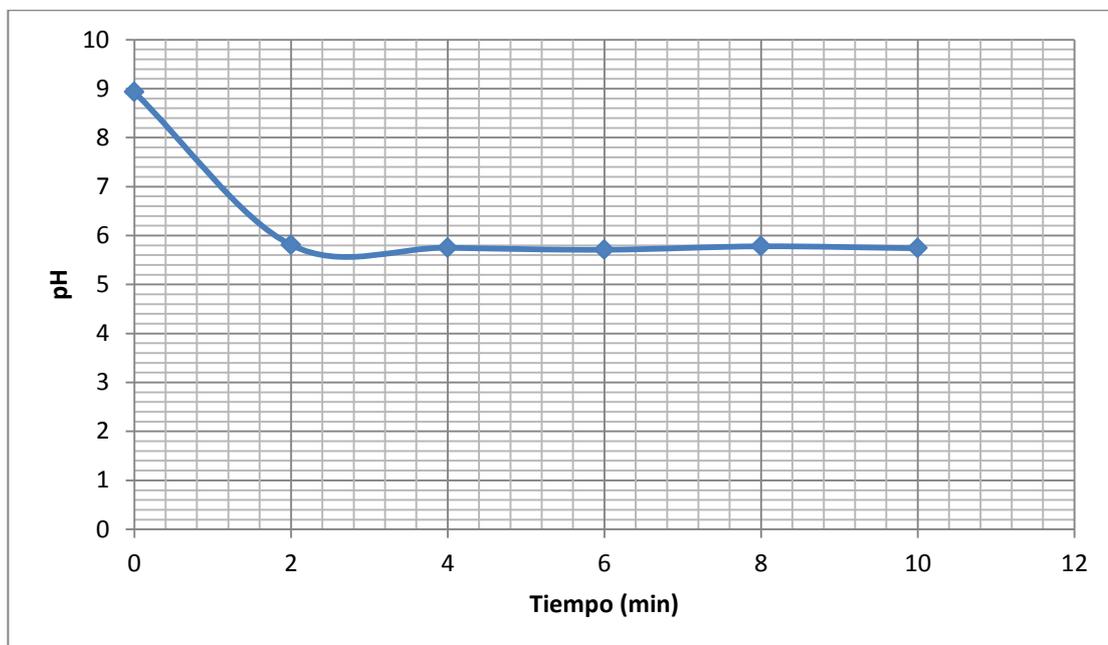


Grafico 26. Curva experimental pH vs tiempo, prueba 18.

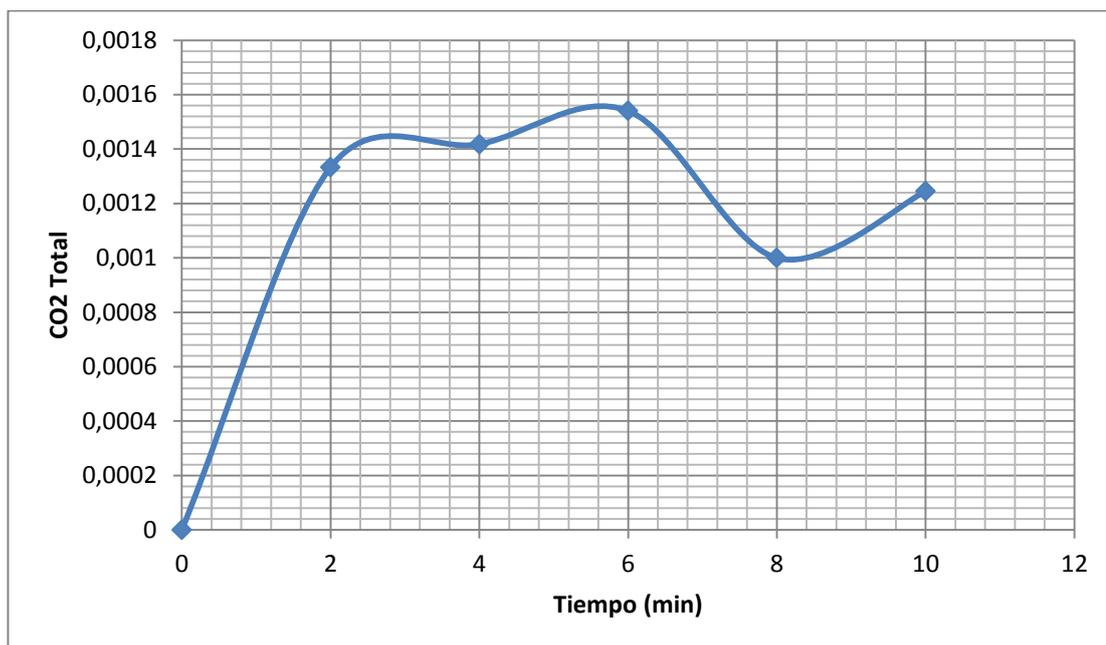


Grafico 27. Curva experimental CO₂ total absorbido (Kmol/h) vs tiempo, prueba 18.

Tabla 42. Determinación de velocidad de reacción prueba 18.

VELOCIDAD DE REACCION	
pH	5,76
pOH	8,242
[OH]	5,728E-09
T (C)	27
T (K)	300,15
Volumen l/h	1020
[CO2] (gmol/l)	0,00128133
kOH	9768,38097
Velocidad (gmol/l·s)	7,1694E-08
Velocidad (Kmol/m ³ ·h)	0,0002581

Resultados:

- ✓ Se observa un claro descenso del pH de 9 hasta 5,76 aproximadamente.
- ✓ Se observa una oscilación en el CO₂ absorbido incrementa considerando el encontrado a flujo de 10 lpm.

Prueba 19

✓ 5% de CO₂.

Tabla 43. Condiciones de operación, prueba 19.

Aire	30	l/min
CO ₂	2	l/min
NaOH (0.000001N)	10	l/min

Tabla 44. Resultados cuantitativos de prueba 19.

		Titulación con HCl 0,1N CO ₂ combinado			Titulación con NaOH 0,02N CO ₂ libre			TOTAL
Tiempo	pH	ppm inicial CO ₂	ppm CO ₂ Abs	CO ₂ Kmol/h	ppm inicial CO ₂	ppm CO ₂ Abs	CO ₂ Kmol/h	CO ₂ absorbido Kmol/h
0	7,91	33,00	33,00	0,000450	0,88	0,88	0,000012	0
2	5,65	33,00	25,67	0,000350	0,88	47,52	0,000648	0,000998
4	5,70	33,00	4,40	0,000060	0,88	33,44	0,000456	0,000516
6	5,69	33,00	6,60	0,000090	0,88	40,04	0,000546	0,000636
8	5,70	33,00	4,40	0,000060	0,88	44,44	0,000606	0,000666
10	5,73	33,00	8,80	0,000120	0,88	45,76	0,000624	0,000744
12	5,63	33,00	6,60	0,000090	0,88	40,048	0,000552	0,000642
14	5,79	33,00	11,00	0,000150	0,88	38,72	0,000528	0,000678
PROMEDIO	7,91						PROMEDIO	0,0006971

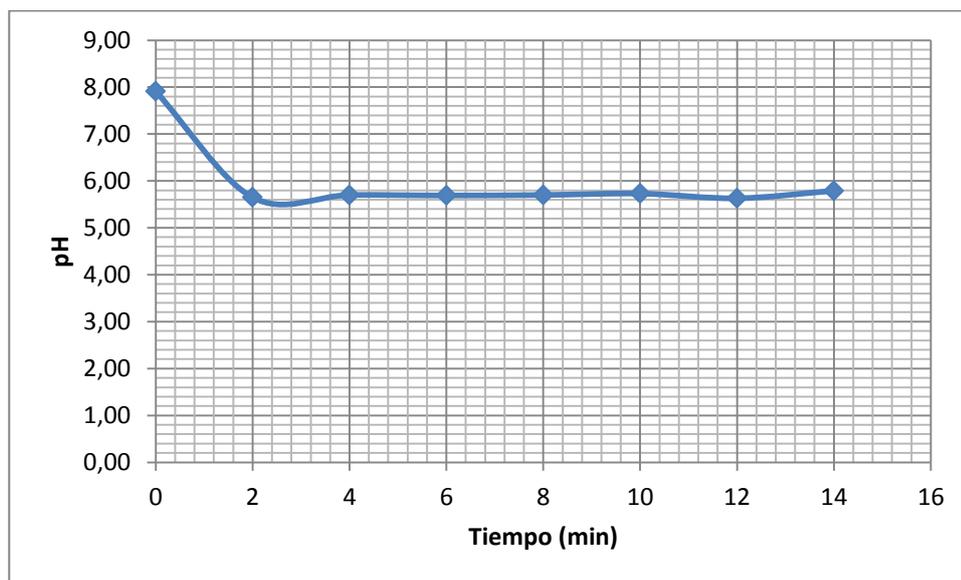


Grafico 28. Curva experimental pH vs tiempo, prueba 19.

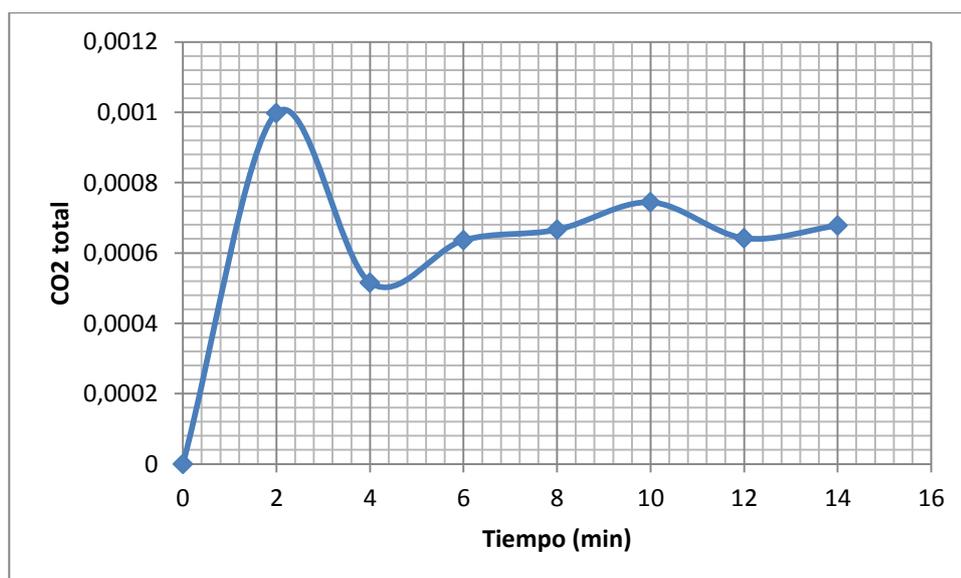


Grafico 29. Curva experimental CO₂ total absorbido (Kmol/h) vs tiempo, prueba 19.

Tabla 45. Determinación de velocidad de reacción prueba 19.

VELOCIDAD DE REACCION	
pH	5,70
pOH	8,301428571
[OH]	4,99541E-09
T (C)	27
T (K)	300,15
Volumen l/h	600
[CO ₂] (gmol/l)	0,001161905
kOH	9768,380966
Velocidad (1/(gmol/l·s))	5,66976E-08
Velocidad (Kmol/m ³ ·h)	0,000204111

Prueba 20

✓ 5% de CO₂.

Tabla 46. Condiciones de operación, prueba 20.

Aire	30	l/min
CO ₂	2	l/min
NaOH (0.000001N)	10	l/min

Tabla 47. Resultados cuantitativos prueba 20.

		Titulación con HCl 0,1N CO ₂ combinado			Titulación con NaOH 0,02N CO ₂ libre			TOTAL
Tiempo	pH	ppm inicial CO ₂	ppm CO ₂ Abs	CO ₂ Kmol/h	ppm inicial CO ₂	ppm CO ₂ Abs	CO ₂ Kmol/h	CO ₂ absorbido Kmol/h
0	8,33	33,00	33,00	0,000450	2,64	2,64	0,000036	0
2	5,71	33,00	13,93	0,000190	2,64	44,00	0,000600	0,000790
4	5,72	33,00	6,60	0,000090	2,64	53,68	0,000732	0,000822
6	5,67	33,00	11,00	0,000150	2,64	46,64	0,000636	0,000786
8	5,72	33,00	6,60	0,000090	2,64	37,84	0,000516	0,000606
10	5,73	33,00	4,40	0,000060	2,64	40,048	0,000552	0,000612
12	5,69	33,00	8,80	0,000120	2,64	39,60	0,000540	0,000660
14	5,74	33,00	11,00	0,000150	2,64	40,048	0,000552	0,000702
16	5,72	33,00	6,60	0,000090	2,64	43,12	0,000588	0,000678
PROMEDIO	5,71						PROMEDIO	0,0007070

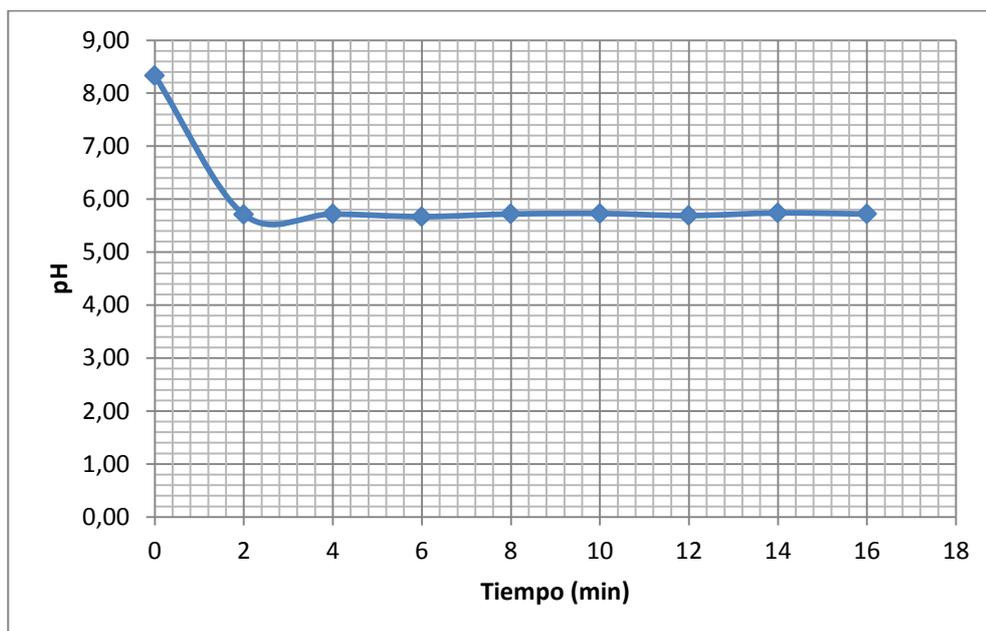


Grafico 30. Curva experimental pH vs tiempo, prueba 20.

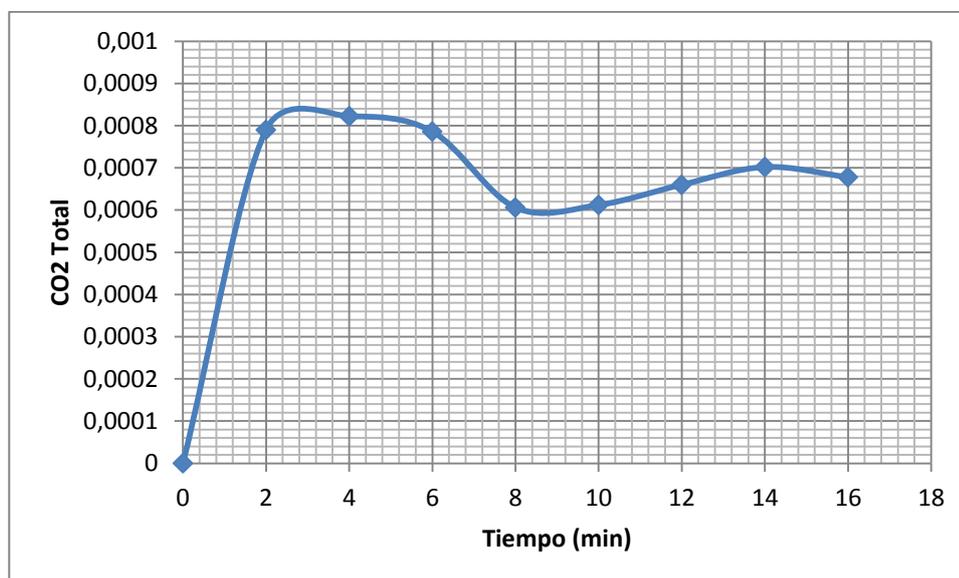


Grafico 31. Curva experimental CO₂ total absorbido (Kmol/h) vs tiempo, prueba 20.

Tabla 48. Determinación de velocidad de reacción prueba 20.

VELOCIDAD DE REACCION	
pH	5,71
pOH	8,2875
[OH]	5,15822E-09
T (C)	27
T (K)	300,15
Volumen l/h	600
[CO ₂] (gmol/l)	0,001178333
kOH	9768,380966
Velocidad (1/(gmol/l·s))	5,93732E-08
Velocidad (Kmol/m ³ ·h)	0,000213744

Resultados:

Durante las pruebas cuantitativas ilustradas se observó:

- ✓ Un rápido descenso en el pH, con estabilización casi inmediata desde 8 hasta 5,70 aproximadamente.
- ✓ La concentración de CO₂ combinado se reduce a la cuarta parte.
- ✓ La concentración de CO₂ libre presenta un agudo incremento.
- ✓ El descenso del pH va directamente en proporción con el comportamiento de las concentraciones de las especies de CO₂ absorbidas en la corriente líquida.
- ✓ En total el sistema absorbe un aproximado de 0,0007070 Kmol/h de CO₂.

Prueba 21

✓ 5% de CO₂.

Tabla 49. Condiciones de operación, prueba 21.

Aire	30	l/min
CO ₂	2	l/min
NaOH (0,000001N)	17	l/min

La operación de la columna se realizará con el flujo máximo posible, provocando un incremento en la absorción.

Tabla 50. Resultados cuantitativos prueba 21.

Tiempo	pH	Titulación con HCl 0,1N CO ₂ combinado			Titulación con NaOH 0,02N CO ₂ libre			TOTAL
		ppm inicial CO ₂	ppm CO ₂ Abs	CO ₂ Kmol/h	ppm inicial CO ₂	ppm CO ₂ Abs	CO ₂ Kmol/h	CO ₂ absorbido Kmol/h
0	8,05	46,20	46,20	0,001071	0,88	0,88	0,000020	0
2	5,76	46,20	9,53	0,000221	0,88	52,80	0,001224	0,001445
4	5,78	46,20	2,20	0,000051	0,88	47,52	0,001102	0,001153
6	5,77	46,20	-2,20	-0,000051	0,88	52,80	0,001224	0,001173
8	5,75	46,20	-2,20	-0,000051	0,88	55,44	0,001285	0,001234
PROMEDIO	5,77						PROMEDIO	0,0012512

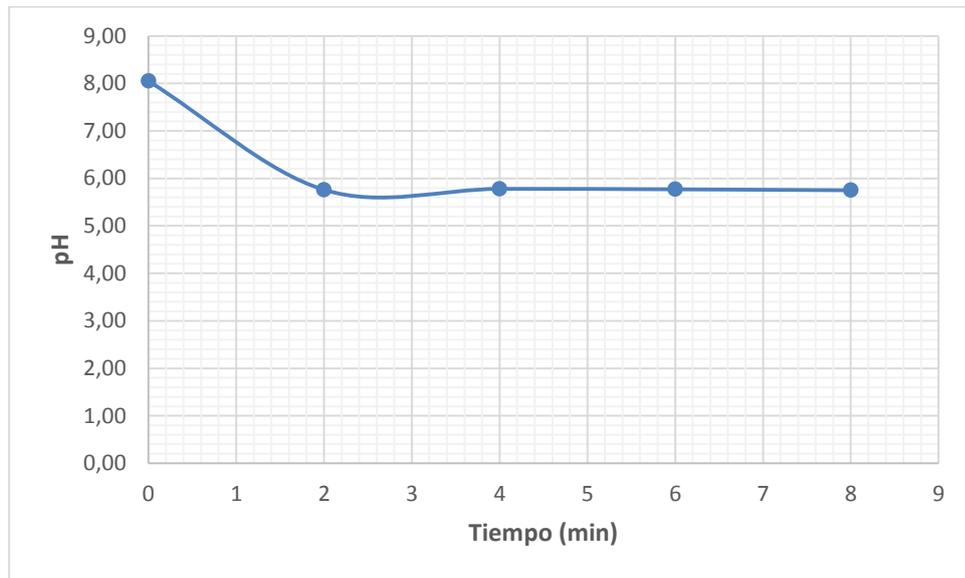


Gráfico 32. Curva experimental pH vs tiempo, prueba 21

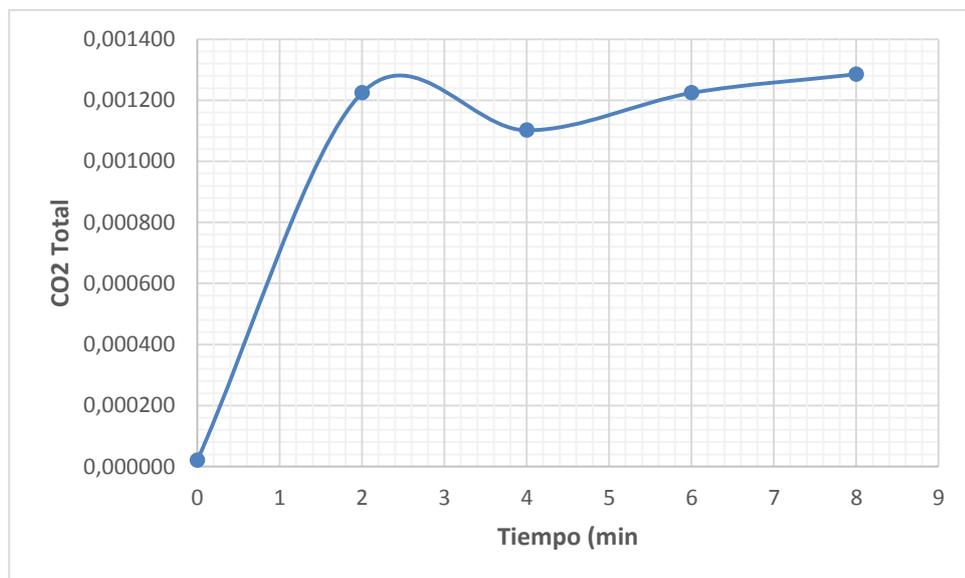


Gráfico 33. Curva experimental CO₂ total absorbido (Kmol/h) vs tiempo, prueba 21

Tabla 51. Determinación de velocidad de reacción prueba 21.

VELOCIDAD DE REACCION	
pH	5,77
pOH	8,235
[OH]	5,821E-09
T (C)	27
T (K)	300,15
Volumen l/h	1020
[CO ₂] (gmol/l)	0,00122667
kOH	9768,38097
Velocidad (gmol/l·s)	6,9751E-08
Velocidad (Kmol/m ³ ·h)	0,0002511

Resultados:

Durante las pruebas cuantitativas ilustradas se observó:

- ✓ Un rápido descenso del pH, con estabilización casi inmediata desde 8 hasta 5,77 aproximadamente.
- ✓ La concentración de CO₂ combinado se reduce notablemente.
- ✓ La concentración de CO₂ libre se incrementa rápidamente.
- ✓ El descenso del pH va directamente en proporción con el comportamiento de las concentraciones de las especies de CO₂ absorbidas en la corriente líquida.
- ✓ El total del sistema absorbe un aproximado de 0,0012512 Kmol/h de CO₂ lo que presenta un notable incremento en consideración con el flujo normalmente utilizado.

Prueba 22

✓ 5% de CO₂.

Tabla 52. Condiciones de operación, prueba 22.

Aire	27	l/min
CO ₂	2	l/min
NaOH (0,0000001N)	7	l/min

La operación de la columna se realizará con el flujo mínimo (teórico), para obtener la absorción teórica.

Tabla 53. Resultados cuantitativos prueba 22.

		Titulación con HCl 0,1N CO ₂ combinado			Titulación con NaOH 0,02N CO ₂ libre			TOTAL
Tiempo	pH	ppm inicial CO ₂	ppm CO ₂ Abs	CO ₂ Kmol/h	ppm inicial CO ₂	ppm CO ₂ Abs	CO ₂ Kmol/h	CO ₂ absorbido Kmol/h
0	8,07	39,60	39,60	0,000540	3,52	3,52	0,000048	0
2	5,74	39,60	13,20	0,000180	3,52	34,32	0,000468	0,000648
4	5,70	39,60	2,20	0,000030	3,52	29,92	0,000408	0,000438
6	5,67	39,60	2,20	0,000030	3,52	38,72	0,000528	0,000558
8	5,70	39,60	0,00	0,000000	3,52	40,48	0,000552	0,000552
10	5,71	39,60	-2,20	0,000030	3,52	44,88	0,000612	0,000582
12	5,68	39,60	2,20	0,000030	3,52	45,32	0,000618	0,000648
PROMEDIO	5,70						PROMEDIO	0,0005710

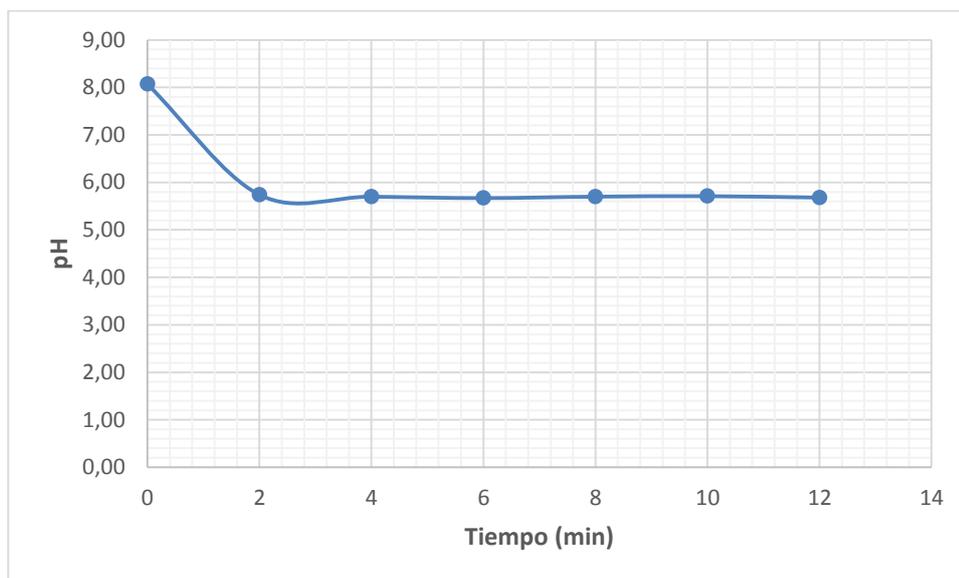


Grafico 34. Curva experimental pH vs tiempo, prueba 22

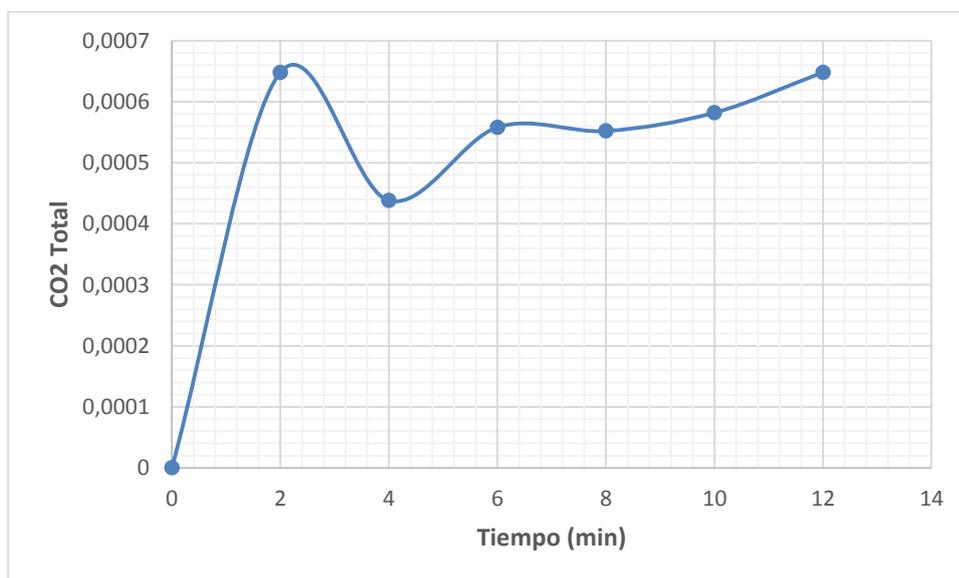


Grafico 35. Curva experimental CO₂ total absorbido (Kmol/h) vs tiempo, prueba 22

Tabla 54. Determinación de velocidad de reacción prueba 22.

VELOCIDAD DE REACCION	
pH	5,70
pOH	8,3
[OH]	5,0119E-09
T (C)	27
T (K)	300,15
Volumen l/h	600
[CO ₂] (gmol/l)	0,00095167
kOH	9768,38097
Velocidad (gmol/l·s)	4,6592E-08
Velocidad (Kmol/m ³ ·h)	0,00016773

Resultados:

Durante las pruebas cuantitativas ilustradas se observó:

- ✓ Un rápido descenso del pH, con estabilización casi inmediata desde 8 hasta 5,70 aproximadamente.
- ✓ La concentración de CO₂ combinado se reduce notablemente.
- ✓ La concentración de CO₂ libre se incrementa rápidamente.
- ✓ El descenso del pH va directamente en proporción con el comportamiento de las concentraciones de las especies de CO₂ absorbidas en la corriente líquida.
- ✓ El total del sistema absorbe un aproximado de 0,0005710 Kmol/h de CO₂ lo que presenta un valor inferior al teórico.

Prueba 23

✓ 5% de CO₂.

Tabla 55. Condiciones de operación, prueba 23.

Aire	27,362	l/min
CO ₂	2	l/min
Agua	10	l/min

Tabla 56. Resultados cuantitativos prueba 23.

		TITULACION CON HCl 0,1N CO ₂ COMBINADO			TITULACION CON NaOH 0,02N CO ₂ LIBRE			TOTAL
Tiempo	pH	ppm inicial CO ₂	ppm CO ₂ Abs	CO ₂ Kmol/h	ppm inicial CO ₂	ppm CO ₂ Abs	CO ₂ Kmol/h	CO ₂ absorbido Kmol/h
0	7,04	35,20	35,20	0,000480	10,56	10,56	0,000144	0
2	5,65	35,20	14,67	0,000200	10,56	36,08	0,000492	0,000692
4	5,67	35,20	0,00	0,000000	10,56	52,80	0,000720	0,000720
6	5,56	35,20	4,40	0,000060	10,56	44,88	0,000612	0,000672
8	5,63	35,20	2,20	0,000030	10,56	45,76	0,000624	0,000654
10	5,61	35,20	4,40	0,000060	10,56	42,24	0,000576	0,000636
12	5,59	35,20	8,80	0,000120	10,56	40,48	0,000552	0,000672
14	5,63	35,20	6,60	0,000090	10,56	46,64	0,000636	0,000726
16	5,65	35,20	4,40	0,000060	10,56	39,60	0,000540	0,000600
PROMEDIO	5,62						PROMEDIO	0,0006715

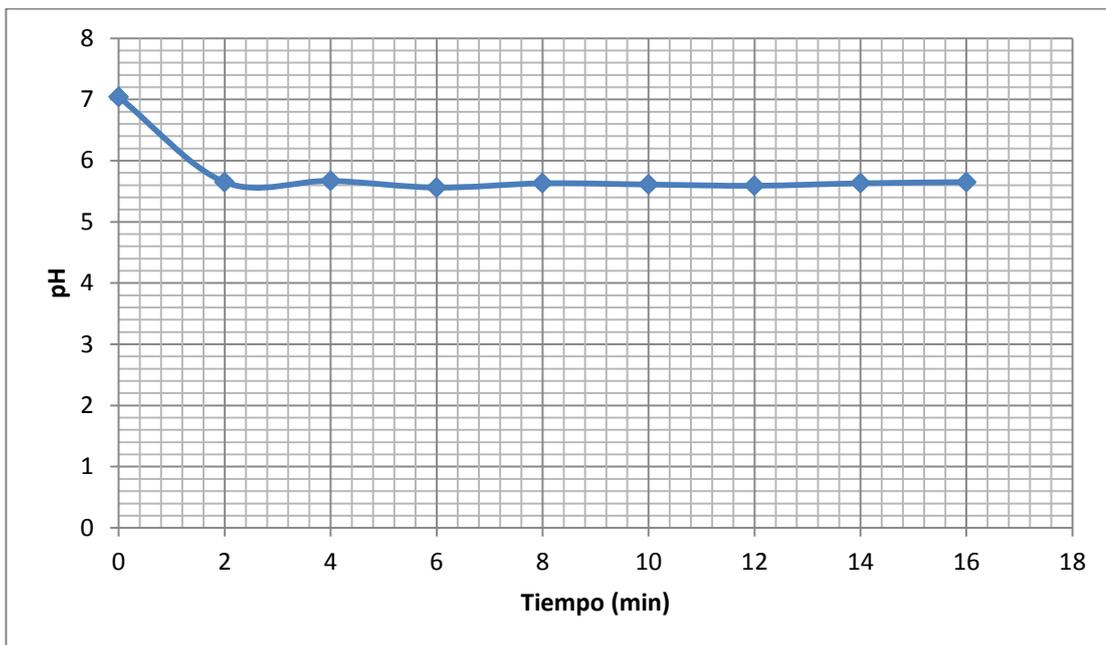


Grafico 36. Curva experimental pH vs tiempo, prueba 23

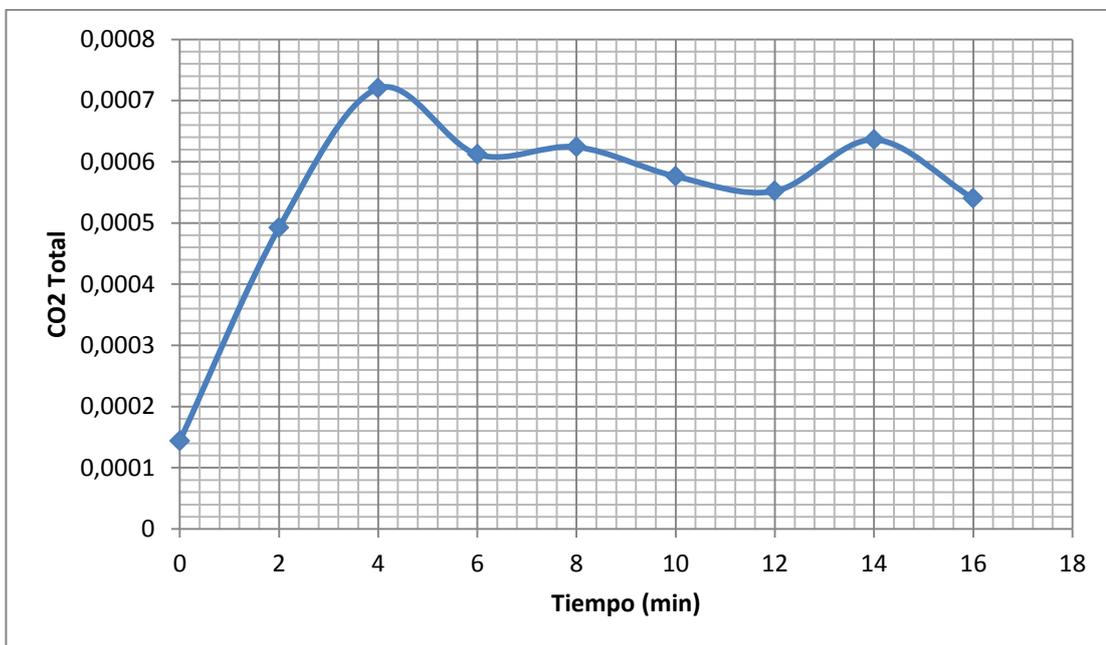


Grafico 37. Curva experimental CO₂ total absorbido (Kmol/h) vs tiempo, prueba 23

Tabla 57. Determinación de velocidad de reacción prueba 23.

VELOCIDAD DE REACCION	
pH	5,62
pOH	8,37675
[OH]	4,2E-09
T (C)	27
T (K)	300,15
Volumen l/h	600
[CO ₂] (gmol/l)	0,00111917
kOH	9768,38097
Velocidad (gmol/l·s)	4,5916E-08
Velocidad (Kmol/m ³ ·h)	0,0001653

Resultados:

Durante las pruebas cuantitativas ilustradas se observó:

- ✓ Un rápido descenso del pH, con estabilización casi inmediata desde 7 hasta 5,52 aproximadamente.
- ✓ La concentración de CO₂ total incrementa notablemente.
- ✓ El descenso del pH va directamente en proporción con el comportamiento de las concentraciones de las especies de CO₂ absorbidas en la corriente líquida.
- ✓ El total del sistema absorbe un aproximado de 0,0006 Kmol/h de CO₂ lo que presenta un valor inferior al teórico.

Prueba 24

✓ 5% de CO₂.

Tabla 58. Condiciones de operación, prueba 24.

Aire	27,362	l/min
CO ₂	2	l/min
Agua	17	l/min

Tabla 59. Resultados cuantitativos prueba 24.

		TITULACION CON HCl 0,1N CO ₂ COMBINADO			TITULACION CON NaOH 0,02N CO ₂ LIBRE			TOTAL
Tiempo	pH	ppm inicial CO ₂	ppm CO ₂ Abs	CO ₂ Kmol/h	ppm inicial CO ₂	ppm CO ₂ Abs	CO ₂ Kmol/h	CO ₂ absorbido Kmol/h
0	6,98	44,00	44,00	0,001020	6,16	6,16	0,000143	0
2	5,54	44,00	5,87	0,000136	6,16	54,56	0,001265	0,001401
4	5,51	44,00	-11,00	-0,000255	6,16	44,88	0,001040	0,000785
6	5,52	44,00	-2,20	-0,000051	6,16	47,52	0,001102	0,001051
8	5,51	44,00	-13,20	-0,000306	6,16	42,24	0,000979	0,000673
10	5,51	44,00	-11,00	-0,000255	6,16	83,60	0,001938	0,001683
PROMEDIO	5,52						PROMEDIO	0,0011186

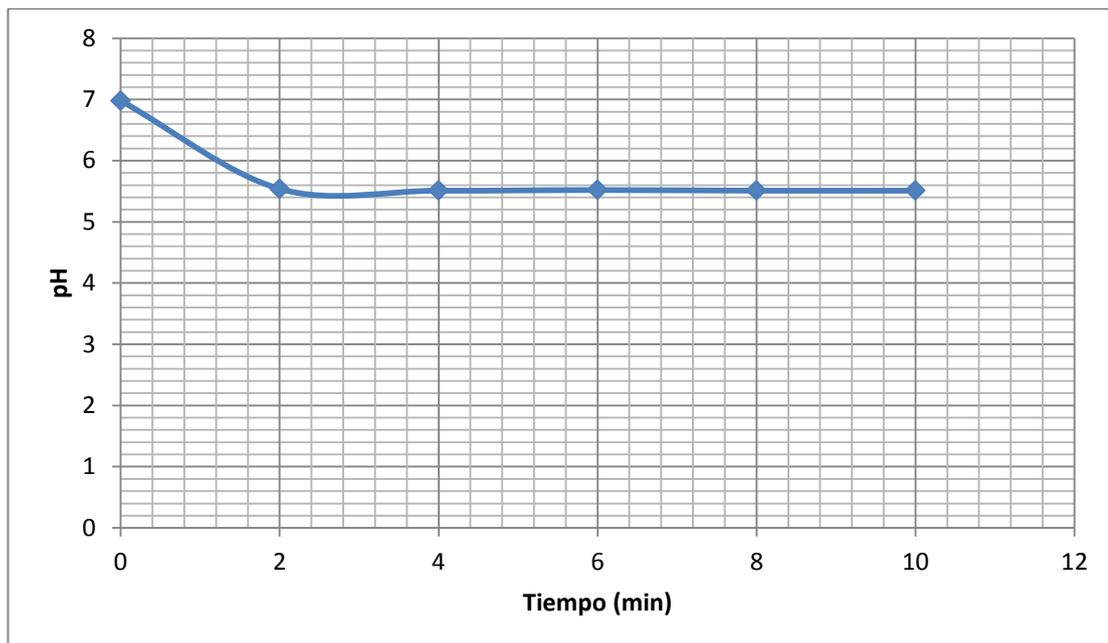


Grafico 38. Curva experimental pH vs tiempo, prueba 24

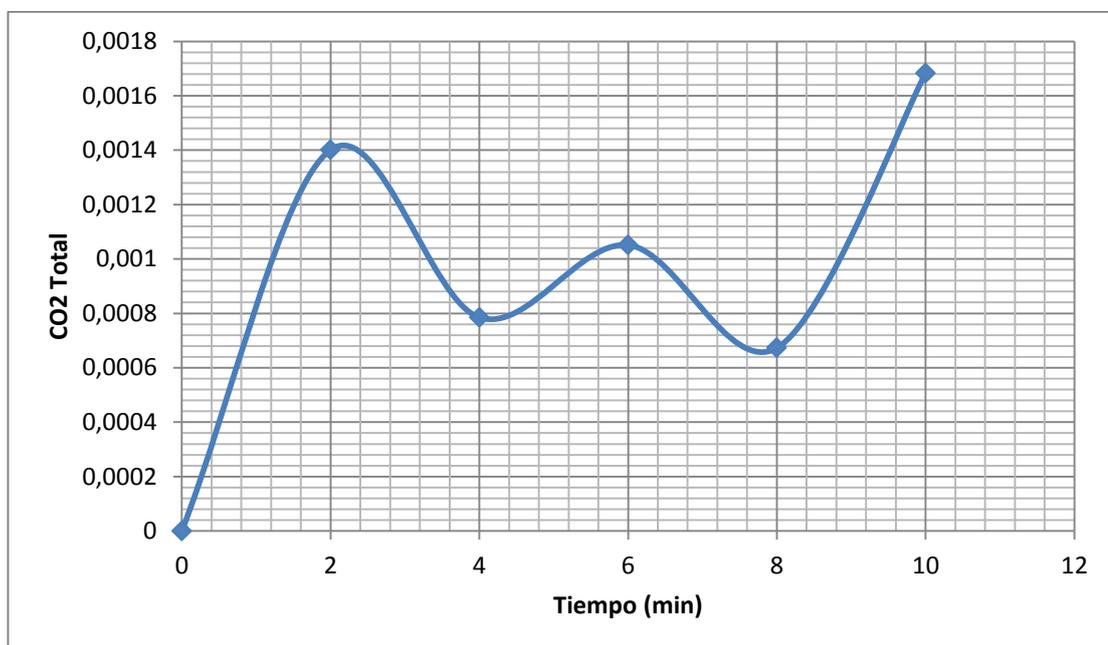


Grafico 39. Curva experimental CO₂ total absorbido (Kmol/h) vs tiempo, prueba 24

Tabla 60. Determinación de velocidad de reacción prueba 24.

VELOCIDAD DE REACCION	
pH	5,52
pOH	8,482
[OH]	3,2961E-09
T (C)	27
T (K)	300,15
Volumen l/h	1020
[CO ₂] (gmol/l)	0,00109667
kOH	9768,38097
Velocidad (gmol/l·s)	3,531E-08
Velocidad (Kmol/m ³ ·h)	0,00012712

Resultados:

Durante las pruebas cuantitativas ilustradas se observó:

- ✓ Un rápido descenso del pH, con estabilización casi inmediata desde 7 hasta 5,50 aproximadamente.
- ✓ La concentración de CO₂ total se incrementa notablemente
- ✓ El descenso del pH va directamente en proporción con el comportamiento de las concentraciones de las especies de CO₂ absorbidas en la corriente líquida.
- ✓ El total del sistema absorbe un aproximado de 0,0011 Kmol/h de CO₂ lo que presenta un valor inferior al teórico.

6.7. Eficiencia del equipo

La eficiencia del sistema se la realizó con una concentración baja a la del sistema de 0,00025N ya que se compara con el comportamiento de la solución más estable y claramente cuantificable.

Tabla 61. ANALISIS DEL SISTEMA TEÓRICO VS EXPERIMENTAL			
	Kmol/h CO2 ENTRAN	Kmol/h CO2 ABSORBIDOS	CAPACIDAD DE LA TORRE (%)
TEÓRICO	0,003	0,00070	23,33
EXPERIMENTAL	0,003	0,00057	19,00
	EFICIENCIA DEL SISTEMA	81,43%	

La absorción experimental para el cálculo de la eficiencia utiliza la teórica mínima de 7 lpm, donde se obtiene una absorción del 19% del CO₂ ingresado en la mezcla gaseosa, y siendo la capacidad máxima de absorción del 23%.

En el caso de la operación de la columna se utiliza el flujo de solución de 10 lpm para garantizar la absorción deseada.

CAPITULO VII

7. Análisis de costos para construcción del proyecto.

7.1. Costos de inversión

Tabla 62. ANALISIS DE COSTOS DE INVERSION PARA CONSTRUCCION DE COLUMNA DE ABSORCIÓN DE GASES			
Parámetro	Precio Unitario	Cantidad	Precio total
Cuerpo principal de Columna			
Columna cilíndrica en acrílico	1200,00	1	1200,00
Anillos Raschig 1/2" plástico	0,015	6000	90,00
Neopreno 1m2	30,00	1	30,00
Soporte metálico	300,00	1	300,00
Sub-total 1			1620,00
Manipulación de Fase Gaseosa			
Llenado de tanque CO2	20,00	1	20,00
Regulador de flujo CO2 con calentamiento	77,00	1	77,00
Anemómetro digital	50,00	1	50,00
Manguera recubierta para CO2 1m	1,10	2	2,20
Manómetro regulador de presión aire	12,00	1	12,00
Sub-total 2			161,20
Manipulación de Fase líquida			
Tanque de alimentación	65,00	1	65,00
Medidor de flujo de líquido	80,00	1	80,00
Bomba 0,5 HP	112,50	1	112,50
Sub-total 3			257,50
Tuberías y Accesorios en general			
Tubería PVC 1/2" 6m	5,40	2	10,80
Tubería PVC 3/4" 6m	6,80	2	13,60
Válvula cheque 1/2"	6,00	2	12,00
Válvula 1/2"	4,50	9	40,50

Válvula 3/4"	6,10	4	24,40
* Uniones			
*Codos	0,80	30	24,00
* TEEs			
Adaptador de tanque	5,00	6	30,00
Pernos, anillos planos y de presión	0,10	30	3,00
Sub-total 4			158,30
OTROS			
Señalética	10,00	3	30,00
Cadena fijación de Tk CO2	4,00	2	8,00
Artículos varios para fijación de tuberías			
* Teflón	0,50	10	5,00
* Permatex	10,00	2	20,00
* Amarras (Empaque X 100)	6,00	1	6,00
* Base adhesiva de amarras (Empaque X100)	6,00	1	6,00
Materiales de vidrio para pruebas de laboratorio	8,00	14	112,00
Indicadores de pH	9,00	2	18,00
Sub-total 5			75,00
TOTAL			2272,00

7.2. Costos de operación

Tabla 63. ESTIMACION DE COSTOS DE OPERACIÓN (CADA ENSAYO CON DURACION DE 20 MINUTOS)					
Parámetro	Cantidad requerida/Litro	Cantidad total requerida/práctica	Precio/Litro	Litros/práctica	Precio total
Alimentación de CO2	0,001464	0,366 kg	0,0014545	250	0,3636
Alimentación líquida	1	250 L	0,0002496	250	0,0624
Hidróxido de Sodio en lentejuelas solidas	0,1	25 g	0,0000063	250	0,0016
Gastos eléctricos por:					
Activación de compresor para suministro de Aire	0,00492	1,23 Kw	0,0003690	250	0,09225
Encendido de la bomba de alimentación líquida	0,000492	0,123Kw	0,0000369	250	0,00923
Encendido de regulador de CO2	0,00004	0,01 Kw	0,0000199	250	0,00499
		Total/m3: \$	2,14	Total/práctica: \$	0,53

Debido a que para la realización del ensayo, la mayoría de los parámetros son fracciones tomadas de un valor macro a pagar, se presenta la siguiente tabla que especifica el costo de este valor macro y la cantidad de ensayos que pueden ser realizados al efectuar este pago.

Tabla 64. COSTOS PARA 55 ENSAYOS (DISPONIBILIDAD EN TANQUE DE CO₂)		
Parámetro	Cantidad total requerida/practica	Precio total
Alimentación de CO ₂	0,366 kg	20,00
Alimentación líquida	250 L	3,43
Hidróxido de Sodio en lentejuelas sólidas	25 g	4,33
Gastos eléctricos por:		
Activación de compresor para suministro de Aire	1,23 Kw	5,07
Encendido de la bomba de alimentación líquida	0,123Kw	0,51
Encendido de regulador de CO ₂	0,01 Kw	0,25
	Total	33,59

Las tablas presentadas indican que para el presente proyecto de construcción de un equipo piloto, se realizó una sólida inversión inicial, con el propósito de que su durabilidad y resistencia sea la más óptima, a pesar de ello, los costos de operación, que representarían un egreso para los estudiantes que realicen prácticas en el equipo, son considerablemente bajos, puesto que los insumos son económicos, y el pago de ellos de manera inicial, permite el desarrollo una gran cantidad de prácticas como se mencionó en la Tabla 64, como lo es el llenado del tanque de CO₂ o a la compra de hidróxido de sodio.

7.3. Costo total

A continuación se resumen los costos de inversión y puesta en marcha, para la construcción de la columna de absorción gaseosa, en la siguiente tabla:

Tabla 65. COSTO TOTAL (Diseño y puesta en marcha)	
Parámetro	Precio total
COSTO TOTAL DE CONSTRUCCION	2272,00
COSTO TOTAL DE PUESTA EN MARCHA	0,53
TOTAL	2272,53

7.4. Mantenimiento del equipo.

Es indispensable que al terminar cada práctica se realice un lavado de la columna hasta que la salida del flujo líquido alcance el pH del agua pura, esto es aproximadamente 7.

La columna de absorción cuenta con tres cuerpos de empaque que pueden ser separados para reemplazarlos por material nuevo en caso de que éste se haya deteriorado o ya no ofrezca la transferencia de masa planteada al inicio.

CAPÍTULO VIII

8. Conclusiones y Recomendaciones

8.1. Conclusiones

- ✓ El desarrollo del presente proyecto envuelve conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de ingeniería química, tales como diseño de operaciones unitarias, relaciones y equilibrios estequiométricos, análisis y manejo de instrumentación de laboratorio, interpretación de resultados, estudio de química de agua y soluciones acuosa, cinética de reacciones, diseño de sistemas de bombeo y tuberías, entre otros.
- ✓ El dimensionamiento de una columna de absorción está dado principalmente por la diferencia de concentración existente entre la recta de operación y la curva de equilibrio. En la selección de tipo de columna se refleja gráficamente, en el caso de que ambas gráficas sean paralelas se deberá utilizar una columna de platos, pero en el caso del diseño planteado se observa claramente la diferencia de pendientes entre ambas gráficas por lo tanto

el uso de una columna empacada es claramente identificable.

- ✓ La transferencia de masa en la absorción gaseosa se produce por dos características: la diferencia de concentraciones entre las corrientes y el número de unidades de transferencia. Gráficamente se observa la gran diferencia entre la curva de equilibrio y la recta de operación, lo que indica que la transferencia de masa está regido por la diferencia de las concentraciones con respecto a la de equilibrio.
- ✓ La transferencia de masa en este caso se encuentra regido por la fase líquida, esto indica la selección del coeficiente global de transferencia de masa para el cálculo de la altura de una unidad de transferencia.
- ✓ La solubilidad del CO_2 en la solución está regida por la concentración del mismo además de la presión de operación, estas características en el sistema se encuentran reducidas, lo que provoca que la solubilidad se vea limitada y por este motivo la absorción y disociación sean limitadas.
- ✓ Se realizaron ensayos que incluían un exceso de corriente gaseosa y por consecuencia de CO_2 , en los cuales el

sistema no mostro un aumento en sus valores finales de moles absorbidos, puesto que se comprobó que se alcanzaba la solubilidad máxima del soluto con respecto al solvente al tener una mezcla aire- CO₂ de 30 y 2 l/min respectivamente, lo cual fue calculado de manera teórica.

- ✓ Mediante las pruebas experimentales se comprobó que la absorción gaseosa para este sistema corresponde a una reacción rápida, que se estabiliza casi inmediatamente.
- ✓ Según la ecuación de velocidad y a la constante obtenida a través de la Ecuación 51 proveniente de estudios bibliográficos previos, corresponde a una reacción de segundo orden global, como podemos ver en la Tabla 64 la constante de velocidad de reacción para el sistema corresponde a un valor muy alto, esto quiere decir y corrobora el hecho de que la reacción sea muy rápida.
- ✓ El claro descenso del pH es debido a la incorporación del CO₂ en la corriente líquida, reaccionando de manera instantánea con el agua el cual, a su vez, se disocia en sus formas iónicas y acidifica la corriente.
- ✓ Es posible determinar la cantidad de CO₂ combinado a través de la titulación con HCl puesto que al realizar el proceso de absorción con una solución acuosa diluida de

NaOH ésta reacciona con una porción de la forma iónica que ha tomado el CO_2 , estabilizándolo con la formación de Na_2CO_3 acuoso.

- ✓ Al finalizar la absorción se obtuvo como resultado que la concentración de CO_2 combinado se reduce a su cuarta parte con respecto al medido en la corriente líquida al inicio de la práctica, mientras que el CO_2 libre se incrementa drásticamente, esto es debido, como se ha mencionado, a las condiciones de pH a la que la el solvente se enfrenta como consecuencia de su interacción con el CO_2 que ingresa a la columna, el cual rige la formación de las especies de CO_2 .
- ✓ La columna se construyó de acrílico transparente para favorecer su propósito didáctico como equipo piloto de prácticas de laboratorio y asegurando a su vez la durabilidad y resistencia de este material.
- ✓ La corrosividad de los compuestos circulantes en la columna exige el uso de materiales que no se alteren por la presencia de ellos. El empaque plástico de anillos Raschig evita la corrosión por lo que la selección de este tipo de empaque es óptima.

- ✓ Los costos de inversión para la construcción del sistema de absorción gaseosa fueron cubiertos por quienes desarrollaron el presente proyecto, para luego ser donado a la institución y enriquecer sus instalaciones, mientras que para quienes utilicen el equipo posteriormente, los costos serán sumamente bajos como se muestran en la Tabla 64.
- ✓ La absorción total del gas es del 23% del total de CO₂ ingresando, debido a la restricción de la solubilidad a las condiciones esa es la máxima absorción posible, la variación de concentración en la corriente gaseosa alterará los resultados en la absorción, en caso de que se busque el incremento de este valor puede incrementarse el caudal de corriente líquida de entrada a la columna.
- ✓ La absorción teóricamente planteada se llevó a cabo como se esperaba, los valores experimentales cumplen en un 81,43% con las expectativas iniciales.
- ✓ La experimentación con una concentración de 0,1% de NaOH en solución acuosa presenta una limitación en la titulación por lo tanto no se determinó cuantitativamente los compuestos. Se observó un claro descenso del pH, pero debido al ser reactivo un ácido débil y una base

fuerte, no será posible un descenso considerablemente alto. Además en la titulación no es posible llegar a una conclusión idónea ya que en el punto de inflexión en la titulación no es posible identificar la relación cuantitativa de CO_2 .

- ✓ Se decide operar con bajas concentración de NaOH para determinar la cantidad de gas soluto absorbido, con la titulación de una muestra de solución.
- ✓ La experimentación se realizó para concentraciones de NaOH hasta 0,0025 N dando resultados positivos en la titulación y se pudo cuantificar hasta 0,0009 Kmol CO_2 /h, donde se pudo cuantificar. En el caso de la experimentación de una solución 0,025 N se realizó un observo descenso de pH, pero al realizar la cuantificación no se logró titular ya que la solución presenta una variación en los resultados con el método utilizado.
- ✓ En el desarrollo de experimentaciones se decidió cambiar las concentraciones de NaOH en la corriente líquida e incrementar la solución líquida a su máxima capacidad, logrando una variación en la absorción del soluto.
- ✓ El incremento del flujo de líquido incrementa la absorción, en la mayoría de los casos se presenta una absorción del

doble, se obtiene desde un 23.24% hasta un 44.77% en la absorción del soluto. En la variación únicamente de la concentración de solución se observa una mínima variación. Por lo contrario en el aumento del flujo de líquido para fundamentar la parte teórica se posee una mayor separación del soluto, obteniendo a la salida un gas con una menor concentración de CO₂.

- ✓ Como conclusión final, se señala que se ha cumplido con la hipótesis y objetivos planteados al inicio del presente trabajo de tesis que involucraba el correcto diseño, construcción y puesta en marcha del equipo, además de la toma de datos en campo que comprueben lo expuesto. Así pues se hace entrega del sistema de absorción gaseosa en condiciones propicias para su inmediata puesta en marcha a la orden de los estudiantes y personal docente que lo solicite.

8.2.Recomendaciones

Para el buen manejo y operación del equipo se recomienda:

- ✓ Solicitar el manual de operación al personal a cargo del laboratorio en donde se encuentra.
- ✓ Al iniciar cualquier ensayo en el equipo se recomienda verificar el estado de los equipos de medición y que estén debidamente calibrados
- ✓ Seguir las instrucciones indicadas en el manual, así como también el equipo de protección personal recomendado y las medidas de precaución.
- ✓ Prestar atención para evitar situaciones que puedan presentarse como imprevistos de operación tales como cavitación de la bomba, inundación de torre, entre otros, los cuales son mencionados en el manual en la sección de troubleshooting.
- ✓ Leer las fichas técnicas de los compuestos a utilizarse y así tener conocimiento de su manipulación y de las acciones a tomar en caso de imprevisto.

Para realizar variaciones en las corrientes y estudiar alternativas de operación se recomienda:

- ✓ Verificar los límites de operación del equipo indicados en el manual de operaciones adjunto.
- ✓ Verificar las ecuaciones de trabajo postuladas, si cumplen o no para especificaciones que desean plantearse.

Para prolongar el buen estado del equipo se recomienda:

- ✓ Realizar los lavados recomendados luego de cada práctica.
- ✓ Verificar su capacidad de absorción actual con respecto a las planteadas en el diseño.

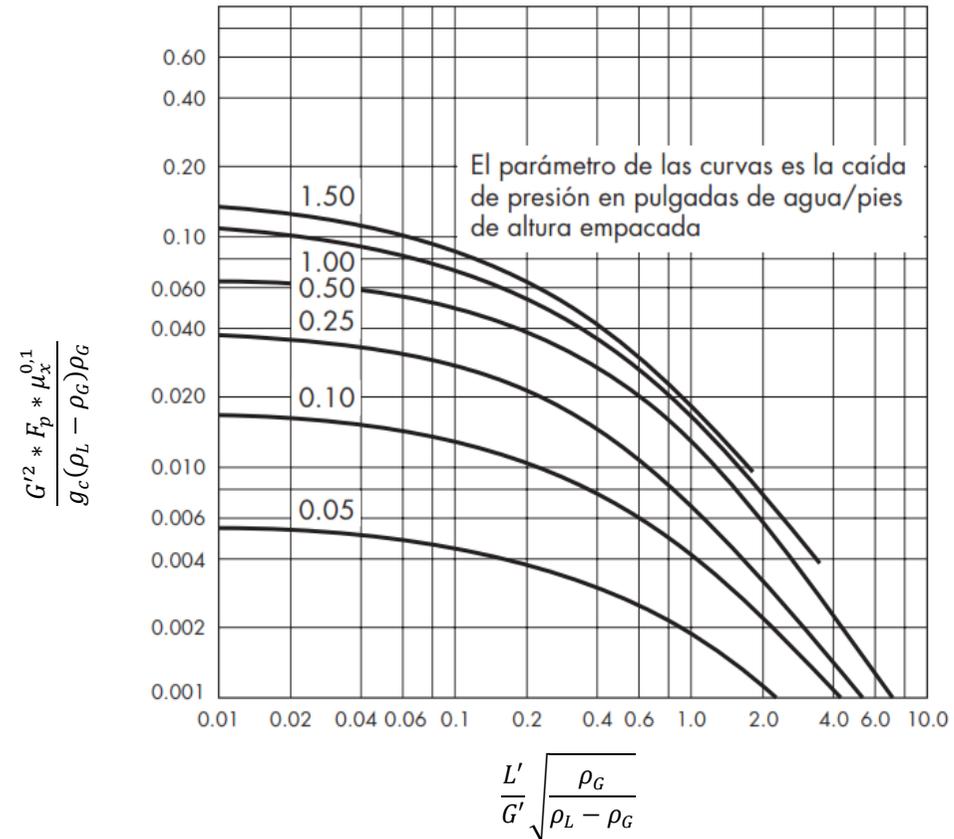
En el campo de estudio se realizaron experimentaciones con variantes de concentración, pero no se lograron resultados cuantificables, por lo que se recomienda:

- ✓ En futuras experimentaciones de cuantificación en las cuales se incremente la concentración de NaOH utilizar otro método.
- ✓ Explorar nuevas soluciones y las eficiencias que se puedan utilizar para la separación del CO₂.

- ✓ Realizar variantes en el uso de otra solución alcalina pero de base débil para observar el comportamiento del pH dentro de esta reacción.
- ✓ La absorción física es posible con el CO_2 es posible cuantificar la máxima eficiencia posible con el equipo construido.

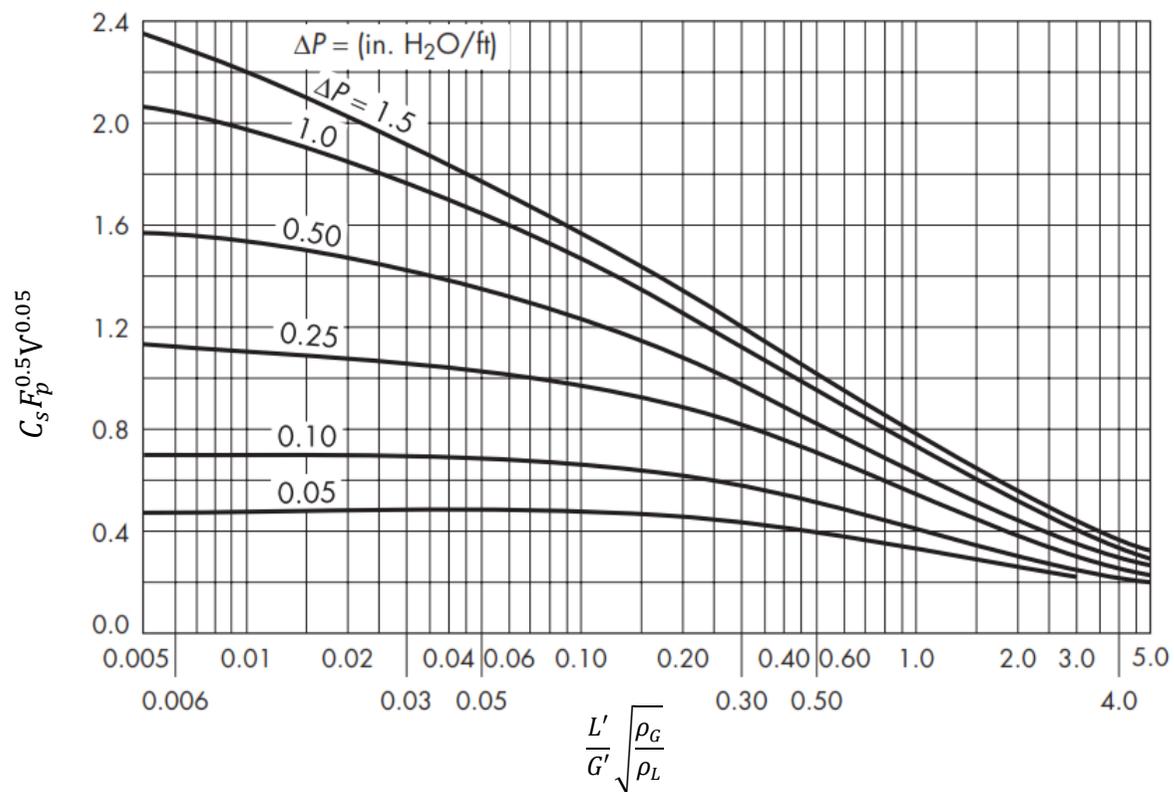
ANEXOS

ANEXO I. CORRELACIÓN GENERALIZADA PARA LA CAÍDA DE PRESIÓN



Fuente: Operaciones Unitarias en Ingeniería Química – McCabe, Smith, Harriot

ANEXO II. CORRELACIÓN GENERALIZADA ALTERNATIVA PARA LA CAÍDA DE PRESIÓN



Fuente: Operaciones Unitarias en Ingeniería Química – McCabe, Smith, Harriot

ANEXO III. CARACTERÍSTICAS DE LOS EMPAQUES ALEATORIOS

Empaque	Tamaño nominal, mm									
	Anillos Raschig									
	6	9,5	13	16	19	25	32	38	50	76
Cerámica										
Espesor de pared, mm	0.8	1.6	2.4	2.4	2.4	3	4.8	4.8	6	9.5
Porosidad ϵ (m ³ /m ³)	0.73	0.68	0.63	0.68	0.73	0.73	0.74	0.71	0.74	0.78
F _p	1600	1000	580	380	255	155	125	95	65	37
a _p (m ² /m ³)	787	508	364	328	262	190	148	125	92	62
Metal										
<i>0.8 mm pared</i>										
Porosidad ϵ (m ³ /m ³)	0.69		0.84		0.88	0.92				
F _p	700	390	300	170	155	115				
a _p (m ² /m ³)	774		420		272	206				

<i>1.6 mm pared</i>										
Porosidad ϵ (m^3/m^3)			0.73		0.78	0.85	0.87	0.90	0.92	0.95
F_p			410	290	220	137	110	83	57	32
a_p (m^2/m^3)			287		236	286	262	135	103	68
Plástico										
Espesor de pared, mm			1			1		1.4	1.5	1.5
Porosidad ϵ (m^3/m^3)			0.91			0.90		0.89	0.90	0.92
F_p			273			239		220	127	94
a_p (m^2/m^3)			188			175		115	93	73.2

Fuente: Operaciones de Transferencia de Masa – Robert Treybal; Pingxiang Chemshun Ceramics Co., Ltd.

ANEXO IV. ANEXO FOTOGRÁFICO

Cuerpo de la columna de acrílico.

Imagen 1.



Imagen 2.



Ensamblaje de la columna y montaje en soporte metálico

Imagen 3.



Imagen 4.



Corte y preparación de tuberías para alimentación y salida de la columna.

Imagen 5.



Imagen 6.



Instalación de tuberías de alimentación y salida.

Imagen 7.



Imagen 8.



<p>Instalación de tanque de recepcion.</p>	<p>Inicio de pruebas de campo</p>
<p>Imagen 9.</p>	<p>Imagen 10.</p>
 <p>A person wearing a green t-shirt is using a yellow measuring tape to measure the diameter of a blue barrel. The barrel has the brand name 'PLASTIGAMA' printed on it. The setting appears to be a laboratory or workshop with various pipes and equipment visible in the background.</p>	 <p>Two individuals are working in a laboratory. One person is holding a yellow hose that is connected to a blue barrel. Another person is using a blue tool to interact with the barrel. The background shows laboratory equipment and a sink area.</p>
<p>Instalación de señalética de seguridad.</p>	<p>Laboratorio de campo para análisis.</p>
<p>Imagen 11.</p>	<p>Imagen 12.</p>
 <p>A large, cylindrical metal pressure vessel is shown. It is equipped with various gauges, valves, and a yellow hose. A prominent yellow warning sign is attached to the vessel, which reads '¡PELIGRO! SUPERFICIE CALIENTE' (DANGER! HOT SURFACE) and features a flame icon. The vessel has the number '89087' written on it.</p>	 <p>A laboratory bench is shown with various pieces of glassware and equipment. There are several Erlenmeyer flasks, beakers, and bottles. A digital scale is visible in the foreground, along with a notebook and a pen. The background shows a typical laboratory environment with shelves and equipment.</p>

Realización de pruebas de laboratorio.

Imagen 13.



Calibración de equipos de medición.

Imagen 14.



ANEXO V. MANUAL DE OPERACIONES

Manual de Operación

Unidad de Absorción Gaseosa

Elaborado por: Karla Reyes – Félix García



Contenido

1. IDENTIFICACIÓN	1
2. EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL	3
2.1. Zonas Afectadas	3
2.1.1. Cabeza	3
2.1.2. Ojos.....	3
2.1.3. Extremidades.....	3
3. MANUAL DE OPERACIÓN	4
4. MEMORIA TÉCNICA	18
4.1. COLUMNA DE ABSORCIÓN	18
4.1.1. DIAGRAMA DE LA COLUMNA	19
4.2. REGULADOR DE FLUJO DE CO ₂	20
4.2.1. IMAGEN DE REGULADOR	20
4.3. SISTEMA DE BOMBEO DE LÍQUIDO	20
4.3.1. DIAGRAMA DE SISTEMA DE BOMBEO.....	21
4.4. DIAGRAMAS	22
4.4.1. DIAGRAMA COMPLETO DE UNIDAD DE ABSORCIÓN	22
4.4.2. DIAGRAMA PID DEL EQUIPO	23
5. TROUBLESHOOTING	24
6. GUIA OPERATIVA.....	25

1. IDENTIFICACIÓN

La siguiente tabla muestra la identificación de los principales componentes de la Unidad de Absorción Gaseosa.

	Identificación	Descripción
VALVULAS	V-101	Válvula de compuerta de control de flujo de aire.
	V-102	Válvula globo de purga de aire
	V-103	Válvula globo de acceso de aire a la columna
	V-104	Válvula de compuerta de control de flujo de líquido
	V-105	Válvula globo de reflujo de líquido al tanque de alimentación
	V-106	Válvula globo de flujo columna – tanque de alimentación
	V-107	Válvula de compuerta para flujo columna – tanque de recepción
	V-108	Válvula para cebado de bomba
	V-109	Válvula de tanque de CO ₂
	V-110	Válvula de purga de tanque de alimentación
	V-111	Válvula de acceso a bombeo de tanque de alimentación
	V-112	Válvula de purga de tanque de recepción
	V-113	Válvula de acceso a bombeo de tanque de recepción
CONTROLADORES DE FLUJO	FIC-101	Sistema de control de flujo de líquido
	FIC-102	Sistema de control de flujo de CO ₂
TANQUES DE ALMACENAMIENTO	TK-101	Tanque de alimentación de líquido
	TK-102	Cilindro de almacenamiento de CO ₂

	TK-103	Tanque de recepción de líquido
MANÓMETROS	PI-101	Manómetro de cilindro de CO ₂
	PI-102	Manómetro de línea de aire (200 psi)
	PI-103	Manómetro de línea de aire (100 psi)
	TERMÓMETRO	TI-101
BOMBA	P-101	Bomba principal de líquido
CALENTADOR	C-101	Sistema de calentamiento de CO ₂
TORRE	T-101	Columna de Absorción

2. EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL

El uso del Equipo de Protección Personal es importante e indispensable en la realización de todo tipo de actividades industriales ya que permite la prevención de cualquier incidente y/o accidente. Por este motivo se recomienda el uso de instrumentos y medidas preventivas básicas

La protección personal en la operación del equipo es muy importante, ya que aunque se realice prácticas con bajas concentraciones de NaOH, es necesario tomar las medidas preventivas en su manipulación. La exposición directa a sustancias básicas puede provocar quemaduras y graves consecuencias.

2.1. Zonas Afectadas

2.1.1. Cabeza

La cabeza puede verse afectada por caída de objetos de altura, además de en acciones de mantenimiento se deberá de trabajar en altura.

- 2.1.1.1. *Equipo de protección*
- Casco de protección

2.1.2. Ojos

Las salpicadura de soluciones, sean estas básicas o ácidas provocará afección a los ojos.

- 2.1.2.1. *Equipo de protección*
- Gafas de protección

2.1.3. Extremidades

Las extremidades pueden verse afectadas por proyección de objetos; caída de objetos hacia los pies, además de salpicaduras de soluciones en el cuerpo. En labores de mantenimiento se encontrarán en trabajos en altura que influye en un peligro.

- 2.1.3.1. *Equipo de protección*
- Pies: Botas antideslizantes
 - Cuerpo: Mandil, arnés de seguridad (trabajos en altura)
 - Manos: Guantes de protección

3. MANUAL DE OPERACIÓN

La operación de la Unidad de Absorción Gaseosa consta de 3 partes: la preparación, la operación de la torre de absorción de gases (absorción) y el apagado. El correcto funcionamiento del equipo se debe llevar a cabo siguiendo correctamente todos los pasos de este manual.

I. Preparación de equipo

Activación de sistema eléctrico

1. Encender el sistema de breaker principal ubicado en la parte posterior del Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOPU), específicamente: Compresor de aire y Columna de Absorción. Ver Figuras 1 y 2



Figura 1.



Figura 2.

Encendido del sistema de compresión de aire

2. Activar el breaker secundario junto al sistema de compresión de aire ubicado en la parte posterior de LOPU. Ver Figura 3



Figura 3.



Figura 4

3. Oprimir el pulsador ON para iniciar el equipo. Ver Figura 5.



Figura 5.

4. Abrir la válvula de salida de aire comprimido. Ver Figura 6.



Figura 6.

Preparación sistema de medición

5. Preparar correctamente el sistema de medición de pH, es decir, el equipo debe estar calibrado y correctamente instalado en un lugar fijo en un área adecuada. La verificación de calibración se lleva a cabo con el pH del agua destilada (aproximadamente 7), además la estabilidad del resultado debe ser la adecuada. Ver Figura 7.

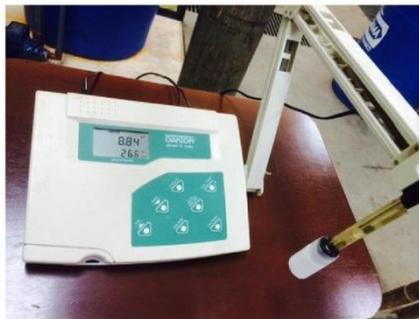


Figura 7.

6. Colocar el recipiente de toma de muestra correctamente etiquetado y la piseta con agua destilada junto al pH meter.
7. Revisar que el anemómetro se encuentre en correctas condiciones y con la batería en su lugar.

Preparación de solución y Encendido de sistema de bombeo

8. Colocar 250 litros (lt) de solución 0,0025N de NaOH en el tanque de alimentación (TK-101) del sistema. Ver Figura 8.



Figura 8.

9. Abrir completamente la válvula (V-105). Ver Figura



Figura 9.

10. Verificar que la válvula (V-111) esté completamente abierta y la válvula (V-112) esté completamente cerrada, de esta manera permite el bombeo únicamente del tanque de alimentación (TK-101). Ver Figuras 10 y 11.



Figura 10.



Figura 11.

11. Encender el breaker secundario de la bomba (P-101), esto permitirá el refluo de la alimentación sin el ingreso a la columna de absorción (T-101). Ver Figura 12.



Figura 12.

Medición de flujo de aire

12. Abrir la válvula (V-103) y verificar que la válvula (V-102) esté completamente cerrada.
13. Abrir lentamente la válvula de compuerta (V-101) y medir la velocidad de aire con el anemómetro (1,8 m/s). Ver Figura 13.



Figura 13.

14. Abrir la válvula (V-102) y cerrar la válvula (V-103) para permitir el flujo de aire a la columna de absorción (T-101).

Medición y preparación de flujo de CO₂

15. Encender el breaker secundario para el calentador de CO₂ (C-101). Ver Figura 14.



Figura 14.

16. Abrir la válvula (V-109) para permitir el paso de CO₂ de su tanque de almacenamiento (TK-102)
17. Abrir el sistema de control de flujo de CO₂ (FIC-102) (2 lpm), estos flujos previamente calculados para una mezcla de 10% CO₂ y 90% aire. Ver Figura 15.



Figura 15.

II. Absorción gaseosa

Medición de alimentación líquido

18. Abrir la válvula de salida de la columna (V-107) permitiendo el flujo al tanque receptor (TK-103) verificar que la válvula de retorno de la columna al tanque este cerrada (V-106)
19. Abrir la válvula de compuerta (V-104) para permitir el flujo hacia la columna de absorción (T-101). Ver Figura 16.



Figura 16.

20. Cerrar poco a poco la válvula de reflujo (V-105).
21. Regular el flujo de líquido (FIC-101) 10 lpm para el ingreso a la columna de absorción T-101. Ver Figura 17.



Figura 17.

22. Inicia el cronómetro para el muestreo.

23. Toma de muestra, medición de pH y titulación respectiva a la salida de la columna cada minuto. Ver Figura 18.



Figura 18.

24. Titulación de muestra (Indicador: Fenolftaleína, NaOH). Ver Figura 19.



Figura 19.

25. Titulación de muestra (Indicador: Naranja de metilo, HCl). Ver Figura 20.



Figura 20.

26. Registro de datos hasta obtener la estabilidad de la columna.

III. Reutilización de solución (OPCIONAL)

El sistema está da la opción de volver a utilizar la solución de salida, para evitar el desperdicio de la solución y volver a realizar la práctica.

27. Cerrar la válvula de compuerta (V-104) y la válvula de bombeo del tanque de alimentación (V-111).

28. Abrir completamente la válvula (V-105) y la de bombeo del tanque de recepción (V-112)

29. Encender la bomba (P-101) para el retorno de la solución al tanque de alimentación.

30. Añadir NaOH para conseguir nuevamente el pH 8 de la solución.

31. Repetir los pasos del 18 al 26.

IV. Finalización de sistema

Apagado de sistema

32. Apagar los breakers de bombeo (P-101) y calentamiento (C-101). Ver Figura 21.



Figura 21.

33. Apagar el sistema de compresión de aire. Ver Figura 22.



Figura 22.

34. Cerrar de válvula principal del compresor. Ver Figura 23.



Figura 23.

35. Cierre de mezcla gaseosa

36. Cerrar el sistema de control de flujo de CO₂ (FIC-102). Ver Figura 24.



Figura 24.

37. Cerrar válvula de ingreso de aire a la columna (V -103)

38. Cerrar válvula de compuerta de aire (V-101)

39. Abrir la llave de purga de aire (V-102) para despresurizar el sistema de aire y tuberías que puedan haber quedado empaquetadas con el mismo. Ver Figura 25.



Figura 25.

Cierre de alimentación líquida

40. Cerrar el sistema de control de flujo de solución (FIC-101) y la válvula (V-104)

Drenado de tanques

41. Drenar los tanques de solución abriendo las válvulas V-110 y V-113. Ver Figuras 26 y 27.



Figura 26.



Figura 27.

42. Desactivación de sistema eléctrico

43. Apagar los breakers principales. Ver Figura 28.



Figura 28.

Recomendaciones:

Al utilizar soluciones con pH agresivos se recomienda al finalizar la operación del equipo enviar un flujo con agua potable para la limpieza del mismo. Esto ayudará a una mejor conservación del equipo.

4. MEMORIA TÉCNICA

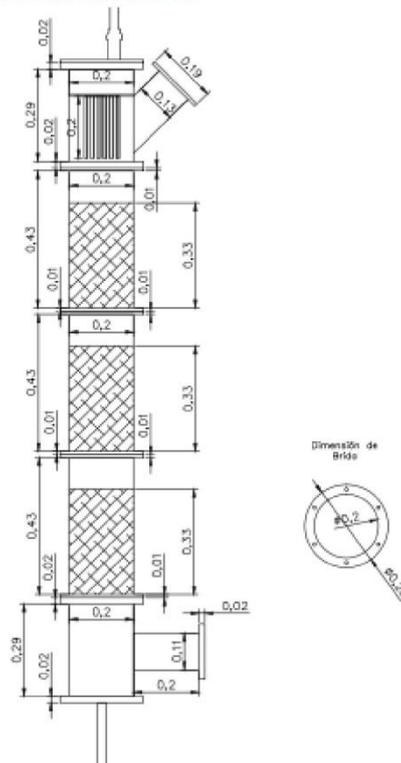
4.1. COLUMNA DE ABSORCIÓN

La columna de absorción, siendo la parte principal de la operación unitaria está constituida por un tubo de acrílico transparente de 20 cm de diámetro, con un espesor de 6 mm, la columna consta con una altura total de 192 cm, formada por 5 cuerpos (2 cámaras de alimentación 30 cm cada una y salida y 3 cámaras de rellenos 45 cm cada una), cada cuerpo cuenta con sus bridas correspondientes de un espesor de 10 mm y un diámetro de 26 cm. Entre cada cuerpo se ubica el soporte de relleno que permite mantener el peso del relleno seleccionado, además de 2 empaques de neopreno para prevenir las fugas posibles en la columna.

En la parte superior de la columna se encuentra la alimentación líquida y la salida del gas, la alimentación líquida cuenta con una cámara de dispersión que permite el descenso del líquido por debajo de la salida del gas por medio de 7 tubos de PVC de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro. En la parte inferior de la columna se ubica la salida de líquido y el ingreso de la mezcla gaseosa.

Los cuerpos de rellenos contienen 33 cm anillos Raschig de PVC de $\frac{1}{2}$ pulg de diámetro, el espaciado entre cada relleno es de 11 cm que permite la redistribución del líquido y el relleno brinda la superficie de contacto para que se permita la absorción.

4.1.1. DIAGRAMA DE LA COLUMNA



4.2. REGULADOR DE FLUJO DE CO₂

La alimentación de CO₂ cuenta con un sistema de regulación de flujo que permite controlarlo hasta 25 lpm, además posee un manómetro con una presión máxima de 3500 psi para el tanque de almacenamiento de CO₂ (TK-102) que permitirá reconocer cuando sea necesario rellenar el mismo.

El sistema de regulación posee una resistencia eléctrica de 110V para el calentamiento del gas al momento que se produzca la expansión y de esta manera no se produzca el enfriamiento que afecta las propiedades del mismo.

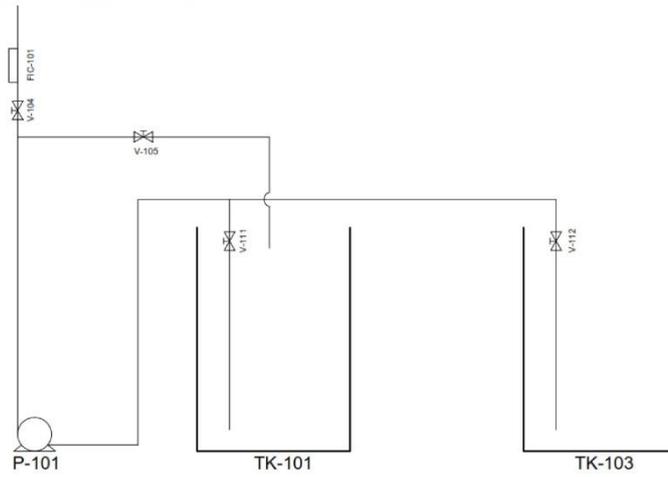
4.2.1. IMAGEN DE REGULADOR



4.3. SISTEMA DE BOMBEO DE LÍQUIDO

El movimiento del líquido hacia la columna de absorción se lo realiza por un sistema de tuberías de ½ pulgada que se encuentra conectado a una bomba PEDROLLO de 0.5 hp que permite el flujo hacia la parte superior de la columna alcanzando 3,55 m de altura. Además el sistema de bombeo permite el movimiento de la solución del tanque de salida (TK-103) al de alimentación (TK-101).

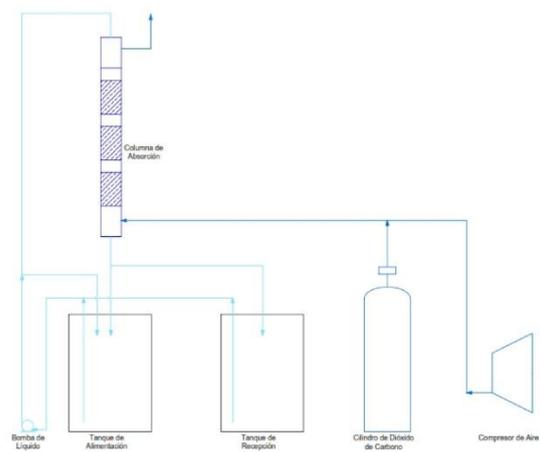
4.3.1. DIAGRAMA DE SISTEMA DE BOMBEO



21

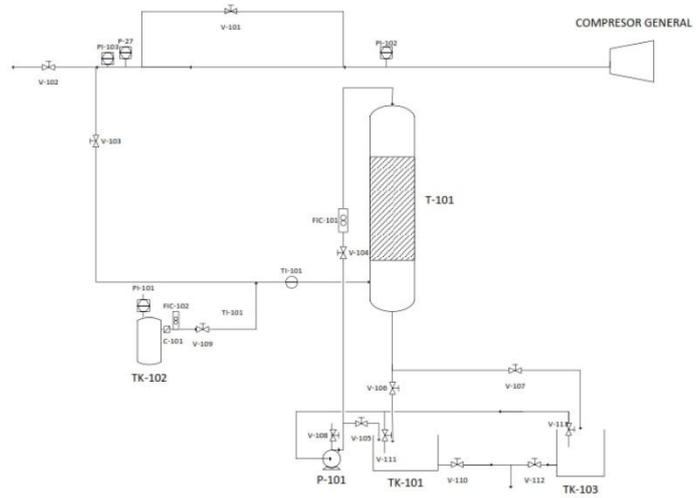
4.4. DIAGRAMAS

4.4.1. DIAGRAMA COMPLETO DE UNIDAD DE ABSORCIÓN



22

4.4.2. DIAGRAMA PID DEL EQUIPO



5. TROUBLESHOOTING

A continuación se detallarán los posibles inconvenientes que pueden ocurrir e interrumpir el correcto funcionamiento de la Columna de Absorción, además se describe las acciones a desarrollar.

Problema	Solución
Descalibración de pH meter.	Utilizar las soluciones buffer (pH: 4, 7,10) para la calibración del mismo.
Inundación de la columna	Verificar que hayan abierto la llave de salida de columna (V-106 o V-107). Regular el caudal hasta el máximo de la columna: 20 lpm.
Mal funcionamiento del anemómetro	Calibración del anemómetro en túnel de viento. Verificar las unidades del anemómetro.
Cavitación de la bomba	Verificar que este correctamente la llave de alimentación. Cebado de bomba: Abrir válvula (V-108) e ingresar la solución hasta que la tubería se encuentre llena
Falta de gas soluto	Abrir la válvula de CO ₂ (V-109) Verificar que el tanque de CO ₂ esté lleno.
Fallo eléctrico	Desactivar los breakers principales
Exceso de líquido en tanques de almacenamiento	Abrir la válvula respectiva (V-110 o V-112)
Congelamiento del regulador de flujo de CO₂	Verificar que el calentador este encendido (C-101)

6. GUIA OPERATIVA

ESPOL		OPERACIÓN DE LA UNIDAD DE ABSORCIÓN GASEOSA	
	LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS		
	ELABORADO POR:	KARLA REYES FÉLIX GARCÍA	APROBADO POR:
	OPERADOR:	ALUMNOS SUPERVISADOS POR PROFESOR O TÉCNICO DOCENTE	
1. OBJETIVO			
Guía práctica con los pasos para la correcta operación de la Unidad de Absorción Gaseosa			
2. EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL			
	Botas antideslizantes		Gafas de protección
			Guantes de protección
			Mandil de laboratorio
3. OBSERVACIONES			
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Revisar que el sistema de bombeo esté operando con la alimentación correcta ✓ Verificar la calibración del pH meter ✓ Inicialmente permitir el reflujo de solución al tanque de alimentación ✓ Rotular los materiales a utilizar en la titulación ✓ Al finalizar la operación del equipo se recomienda utilizar agua para disminuir el riesgo de desgaste del equipo ✓ Vaciar los tanques de reserva de solución al finalizar su uso ✓ Verificar la desactivación de la energía en el sistema 			

25

4. PROCEDIMIENTO			
1.		Preparación de la solución de alimentación con NaOH a pH 8 (200 lts)	
2.			Activar los breakers principales respectivos del compresor de aire y la columna de absorción
3.		Activar el breaker secundario y encendido del compresor de aire	
4.			Encender pH meter e instalar sistema de titulación para muestreo
5.		Activar los breakers secundarios del sistema de bombeo y regulador del CO ₂	
6.			Regulación de flujos de aire y líquido para iniciar operación

26

<p>7.</p> 	<p>Iniciar cronómetro para muestreo cada 2 minutos</p>	<p>8.</p> 	<p>Tomar muestra, titular cada compuesto y registro de valores</p>
<p>9.</p> 	<p>Apagado de breaker secundarios.</p>	<p>10.</p> 	<p>Cierre total de válvulas y desactivación del sistema</p>

ANEXO VI. FICHAS TÉCNICAS

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD HIDROXIDO DE SODIO

Rotulo NFPA



Rótulos UN



Fecha Revisión: 21/03/2005

SECCIÓN 1: PRODUCTO QUÍMICO E IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA

Nombre del Producto:	HIDROXIDO DE SODIO
Sinónimos:	Soda cáustica (anhídrica), Soda cáustica en escamas, Cáustico blanco, Lejía, Hidrato de sodio.
Fórmula:	NaOH
Número interno:	
Número UN:	1823 Sólido
Clase UN:	8
Compañía que desarrolló la Hoja de Seguridad:	Esta hoja de datos de seguridad es el producto de la recopilación de información de diferentes bases de datos desarrolladas por entidades internacionales relacionadas con el tema. La alimentación de la información fue realizada por el Consejo Colombiano de Seguridad, Carrera 20 No. 39 - 62. Teléfono (571) 2886355. Fax: (571) 2884367. Bogotá, D.C. - Colombia.

Teléfonos de Emergencia:

SECCIÓN 2: COMPOSICIÓN E INFORMACIÓN SOBRE INGREDIENTES

Componente	COMPONENTES			
	CAS	TWA	STEL	%
Hidróxido de sodio	1310-73-2	N.R. (ACGIH 2004)	C 2 mg/m3 (ACGIH 2004)	99-100
Uso:	Neutralización de ácidos, refinación del petróleo, producción de papel, celulosa, textiles, plásticos, explosivos, removedor de pinturas, limpiador de metales, electroplateado, limpiadores comerciales y domésticos, pelado de frutas y verduras en la industria de alimentos.			

SECCIÓN 3: IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

VISIÓN GENERAL SOBRE LAS EMERGENCIAS:

Peligro. Corrosivo. Higroscópico. Reacciona con agua ácidos y otros materiales. Causa quemaduras a piel y ojos. Puede ocasionar irritación severa de tracto respiratorio y digestivo con posibles quemaduras. En casos crónicos puede producir cáncer en el esófago y dermatitis por contacto prolongado con la piel.

EFFECTOS ADVERSOS POTENCIALES PARA LA SALUD:

Inhalación:	Irritante severo. Los efectos por la inhalación del polvo o neblina varían desde una irritación moderada hasta serios daños del tracto respiratorio superior, dependiendo de la severidad de la exposición. Los síntomas pueden ser estornudos, dolor de garganta o goteo de la nariz. Puede ocurrir neumonía severa.
Ingestión:	Corrosivo!. La ingestión puede causar quemaduras severas de la boca, garganta y estómago. Pueden ocurrir severas lesiones tisulares y muerte. Los síntomas pueden ser sangrado, vómitos, diarrea, caída de la presión sanguínea. Los daños pueden aparecer algunos días después de la exposición.
Piel:	Corrosivo! El contacto con la piel puede causar irritación o severas quemaduras y cicatrización en las exposiciones mayores.

HIDROXIDO DE SODIO

CISPROQUIM 1

Ojos:	Produce irritación con dolor, enrojecimiento y lagrimeo constante. En casos severos quemaduras de la córnea e incluso ceguera.
Efectos crónicos:	Contacto prolongado produce dermatitis, fisuras e inflamación de la piel. Puede causar cáncer al esófago.
SECCIÓN 4: PROCEDIMIENTOS DE PRIMEROS AUXILIOS	
Inhalación:	Trasladar al aire fresco. Si no respira administrar respiración artificial. Si respira con dificultad suministrar oxígeno. Mantener la víctima abrigada y en reposo.
Ingestión:	Lavar la boca con agua. Si está consciente, suministrar abundante agua. No inducir el vómito. Buscar atención médica inmediatamente.
Piel:	Retirar la ropa y calzado contaminados. Lavar la zona afectada con abundante agua y jabón, mínimo durante 15 minutos. Si la irritación persiste repetir el lavado. Buscar atención médica
Ojos:	Lavar con abundante agua, mínimo durante 15 minutos. Levantar y separar los párpados para asegurar la remoción del químico. Colocar una venda esterilizada. Buscar atención médica.
Nota para los médicos:	Después de proporcionar los primeros auxilios, es indispensable la comunicación directa con un médico especialista en toxicología, que brinde información para el manejo médico de la persona afectada, con base en su estado, los síntomas existentes y las características de la sustancia química con la cual se tuvo contacto.
SECCIÓN 5: MEDIDAS EN CASO DE INCENDIO	
Punto de inflamación (°C):	N.A.
Temperatura de autoignición (°C):	N.A.
Limites de inflamabilidad (%V/V):	N.A.
Peligros de incendio y/o explosión:	No es combustible pero en contacto con agua puede generar suficiente calor para encender combustibles. El material caliente o fundido puede reaccionar violentamente con agua. El contacto con algunos metales genera hidrógeno el cual inflamable y explosivo. Durante un incendio se forman gases tóxicos y corrosivos.
Medios de extinción:	No usar medios de extinción halogenados ni chorro de agua a presión. Utilizar un agente adecuado al fuego circundante.
Productos de la combustión:	Óxido de Sodio.
Precauciones para evitar incendio y/o explosión:	Evitar el contacto con metales, combustibles y humedad. Mantener los contenedores cerrados. Los equipos eléctricos, de iluminación y ventilación deben ser a prueba de explosiones y resistentes a la corrosión.
Instrucciones para combatir el fuego:	Evacuar o aislar el área de peligro. Eliminar todos los materiales combustibles de la zona. Restringir el acceso a personas innecesarias y sin la debida protección. Ubicarse a favor del viento. Usar equipo de protección personal. Refrigerar los contenedores con agua en forma de rocío. Si los contenedores están cerrados, retirarlos del área de peligro.
SECCIÓN 6: MEDIDAS EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL	
Evacuar o aislar el área de peligro. Restringir el acceso a personas innecesarias y sin la debida protección. Ubicarse a favor del viento. Usar equipo de protección personal. Ventilar el área. No permitir que caiga en fuentes de agua y alcantarillas. Los residuos deben recogerse con medios mecánicos no metálicos y colocados en contenedores apropiados para su posterior disposición.	
SECCIÓN 7: MANEJO Y ALMACENAMIENTO	
Manejo:	Utilizar los elementos de protección personal así sea muy corta la exposición o la actividad que realizar con la sustancia; mantener estrictas normas de higiene. No fumar ni beber en el sitio de trabajo. Usar las menores cantidades posibles. Conocer en dónde está el equipo para la atención de emergencias. Leer las instrucciones de la etiqueta antes de usar.

Almacenamiento: Lugares ventilados, frescos y secos. Lejos de fuentes de calor e ignición. Separado de materiales incompatibles. En recipientes no metálicos, preferiblemente a nivel del piso. Señalizar adecuadamente. Rotular los recipientes adecuadamente.

SECCIÓN 8: CONTROLES DE EXPOSICIÓN Y PROTECCIÓN PERSONAL

Controles de ingeniería: Ventilación local para mantener la concentración por debajo de los límites de salud ocupacional. Debe disponerse de duchas y estaciones lavaojos.

EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL

Protección de los ojos y rostro: Gafas de seguridad con protector lateral.

Protección de piel: Careta, guantes, overol de PVC y botas de caucho.

Protección respiratoria: Respirador con filtro.

Protección en caso de emergencia: Equipo de respiración autocontenido (S.C.B.A) y ropa de protección TOTAL resistente a la corrosión.

SECCIÓN 9: PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Apariencia, olor y estado físico: Sólido blanco inodoro en forma de escamas.

Gravedad específica (Agua=1): 2.13 / 25°C

Punto de ebullición (°C): 1390

Punto de fusión (°C): 318

Densidad relativa del vapor (Aire=1): N.R.

Presión de vapor (mm Hg): 42.0 / 999°C

Viscosidad (cp): 4 a 350 °C.

pH: 14 (solución 5%)

Solubilidad: Soluble en agua, alcohol y glicerol.

SECCIÓN 10: ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Estabilidad química: Estable bajo condiciones normales de almacenamiento y manipulación. No se polimeriza. Es sensible a la humedad o exposición excesiva al aire.

Condiciones a evitar: Calor, llamas, humedad e incompatibles.

Incompatibilidad con otros materiales: El contacto con ácidos y compuestos halogenados orgánicos, especialmente tricloroetileno, puede causar reacciones violentas. El contacto con nitrometano u otros compuestos nitro similares produce sales sensibles al impacto. El contacto con metales tales como aluminio, magnesio, estaño o cinc puede liberar gas hidrógeno (inflamable). Reacciona rápidamente con varios azúcares para producir monóxido de carbono. Reacciona con materiales inflamables.

Productos de descomposición peligrosos: Cuando este material se calienta hasta la descomposición puede liberar óxido de sodio.

Polimerización peligrosa: No ocurrirá.

SECCIÓN 11: INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

Quemaduras severas por ingestión y contacto. Puede provocar desprendimiento del epitelio conjuntival y corneal.

LDLo oral conejo= 0.5 g/kg (en solución al 10%).

Irritación de los ojos y la piel: el hidróxido de sodio ha sido extensivamente estudiado en animales porque este tiene la habilidad de causar severos daños a la piel y a los ojos.

Los factores que determinan la extensión y reversibilidad de el daño incluye el estado físico, la concentración, la cantidad involucrada y la duración del contacto. Los efectos pueden variar de una irritación mediana a severa corrosión con destrucción del tejido, incluyendo la ceguera y la muerte.

Toxicidad inhalación: Exposición de ratas a aerosoles formados a partir del hidróxido de sodio en solución (5 a 40%) resulta en irritación significativa del tracto respiratorio.

Es considerado como no carcinógeno por ACGIH, NIOSH; NTP, OSHA e IARC.

No existe información disponible relacionada con efectos de tipo teratogénico, mutagénico o neurotóxico.

SECCIÓN 12: INFORMACIÓN ECOLÓGICA

HIDROXIDO DE SODIO

CISPROQUIM 3

Peligroso para la vida acuática aún en bajas concentraciones. Mortal para peces a partir de 20 mg/L. Toxicidad peces: LC10 = 25 ppm/24H/Trucha de arroyo/Agua fresca. DBO= ninguno. No biodegradable.

SECCIÓN 13: CONSIDERACIONES DE DISPOSICIÓN

Debe tenerse presente la legislación ambiental local vigente relacionada con la disposición de residuos para su adecuada eliminación.

Los residuos de este material pueden ser llevados a un relleno sanitario legalmente autorizado para residuos químicos, previa neutralización.

SECCIÓN 14: INFORMACIÓN SOBRE TRANSPORTE

Etiqueta blanca-negra de sustancia corrosiva. No transportar con sustancias explosivas, sustancias que en contacto con agua puedan desprender gases inflamables, sustancias comburentes, peróxidos orgánicos, materiales radiactivos, sustancias incompatibles ni alimentos.

SECCIÓN 15: INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

1. Ley 769/2002. Código Nacional de Tránsito Terrestre. Artículo 32: La carga de un vehículo debe estar debidamente empacada, rotulada, embalada y cubierta conforme a la normatividad técnica nacional.

2. Decreto 1609 del 31 de Julio de 2002, Por el cual se reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera.

3. Ministerio de Transporte. Resolución número 3800 del 11 de diciembre de 1998. Por el cual se adopta el diseño y se establecen los mecanismos de distribución del formato único del manifiesto de carga.

4. Los residuos de esta sustancia están considerados en: Ministerio de Salud. Resolución 2309 de 1986, por la cual se hace necesario dictar normas especiales complementarias para la cumplida ejecución de las leyes que regulan los residuos sólidos y concretamente lo referente a residuos especiales.

SECCIÓN 16: OTRAS INFORMACIONES

La información relacionada con este producto puede no ser válida si éste es usado en combinación con otros materiales o en otros procesos. Es responsabilidad del usuario la interpretación y aplicación de esta información para su uso particular.

Bibliografía

HOJA DE SEGURIDAD DEL MATERIAL (MSDS)

DIÓXIDO DE CARBONO COMPRIMIDO

Nota : Las especificaciones contenidas en esta hoja de seguridad aplican también para el dióxido de carbono anaeróbico y el dióxido de carbono seco.

<p>1. PRODUCTO QUÍMICO E IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA</p> <p>Nombre del producto : Dióxido de carbono Familia química : Ácido anhídrido Nombre químico : Dióxido de carbono Fórmula : CO₂ Sinónimos : Anhídrido carbónico, gas ácido carbónico, carbono anhídrido, bióxido de carbono. Usos : Como inertizante en la conserva de alimentos; industria de la bebida, como carbonatante; soldadura por proceso MIG como gas protector; extintores de incendio; materia prima para procesos químicos; propelente en aerosoles, como presurizante.</p> <p>Fabricante : AGA S.A. Quito: Av. Pedro Vicente Maldonado 10499 Tel.: 1 800 242 427; 02 2673 011; 04 2101 060 las 24 horas los 365 días del año.</p>											
<p>2. COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMPONENTE</th> <th>% MOLAR</th> <th>NUMERO CAS</th> <th>LIMITES DE EXPOSICIÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Dióxido de carbono</td> <td>99.8-99.996%</td> <td>124-38-9</td> <td>TLV : 5000 ppm (ACGIH)</td> </tr> </tbody> </table>				COMPONENTE	% MOLAR	NUMERO CAS	LIMITES DE EXPOSICIÓN	Dióxido de carbono	99.8-99.996%	124-38-9	TLV : 5000 ppm (ACGIH)
COMPONENTE	% MOLAR	NUMERO CAS	LIMITES DE EXPOSICIÓN								
Dióxido de carbono	99.8-99.996%	124-38-9	TLV : 5000 ppm (ACGIH)								
<p>3. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS</p> <p>Resumen de emergencia Gas ligeramente tóxico, inoloro e incoloro con sabor suavemente ácido. El peligro primordial a la salud asociado con escapes de este gas es asfixia por desplazamiento del oxígeno. Este gas no se quema y no alimenta la llama. El gas carbónico es 1.5 veces más pesado que el aire. Es un gas condensable. Debido a su baja presión de vapor a temperatura ambiente, este es acondicionado en los cilindros de forma líquida en equilibrio con una fase gaseosa.</p> <p>Efectos potenciales para la salud</p> <p>Inhalación : Asfixiante y un poderoso vasodilatador cerebral. Si la concentración de dióxido de carbono alcanza el 10% o mas, causa sofocación en minutos. A concentraciones más bajas dióxido de carbono puede causar náusea, mareo, sudor, dolor de cabeza, confusión mental, aumento de la presión sanguínea, respiración agitada, palpitaciones al corazón, respiración dificultosa, disturbios visuales y temblores. Las concentraciones altas resultan en narcosis y muerte.</p> <p>Carcinogenicidad : El dióxido de carbono no está listado por la NTP, OSHA, o IARC</p>											
<p>4. MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS</p> <p>Inhalación: Remueva la víctima al aire fresco, lo más pronto posible. Solo personal</p>											

profesionalmente entrenado debe suministrar ayuda médica como la resucitación cardiopulmonar y/o oxígeno suplemental, si es necesario.

5. MEDIDAS CONTRA INCENDIO

Punto de inflamación : No aplica.

Temperatura de auto ignición : No aplica.

Limites de Inflamabilidad :

Inferior (LEL): No aplica. **Superior (UEL):** No aplica.

Sensibilidad de explosión a un impacto mecánico: No aplica.

Sensibilidad de explosión a una descarga eléctrica: No aplica.

Riesgo general

Gas no inflamable. Cuando los cilindros se exponen a intenso calor o llamas, se pueden romper violentamente.

Medios de extinción

Dióxido de Carbono es comúnmente usado como un agente extinguidor de fuegos clase B y clase C.

Instrucciones para combatir incendios

Evacuar al personal de la zona de peligro. Si es posible y no hay riesgo, remover los cilindros de dióxido de carbono del incendio o enfriarlos con agua. No rociar agua directamente en el orificio del cilindro. Aparatos autónomos de respiración pueden ser requeridos para el personal de rescate.

Si un camión que transporta cilindros está involucrado en un incendio, AISLE un área de 800 metros (1/2 milla) a la redonda.

Equipo contra incendios

Los socorristas o personal de rescate deben contar como mínimo con un aparato de respiración autosuficiente y protección personal completa, a prueba de fuego.

6. MEDIDAS CONTRA ESCAPE ACCIDENTAL

En caso de escape evacuar a todo el personal de la zona afectada (hacia un lugar contrario a la dirección del viento). Aísle un área de 25 a 50 metros a la redonda. Localizar y sellar la fuente de escape del gas. Dejar que el gas se disipe. Monitorear el área para determinar los niveles de oxígeno. La atmósfera debe tener un mínimo de 19.5% de oxígeno antes de permitir el acceso de personal y si esta por debajo del límite de exposición ingresar al área con aparatos de respiración autosuficiente. Eliminar posibles fuentes de ignición. Ventilar el área o mover el cilindro con fuga a un área ventilada. Escapes sin control deben ser respondidos por personal profesionalmente entrenado usando un procedimiento establecido previamente.

7. MANEJO Y ALMACENAMIENTO

Precauciones que deben tomarse durante el manejo de cilindros

Antes de uso: Mueva los cilindros utilizando carro portacilindros o montacargas. No los haga rodar, ni los arrastre en posición horizontal. Evite que se caigan o golpeen violentamente uno contra otro, o contra otras superficies. No se deben transportar en espacios cerrados, como por ejemplo el baúl de un carro, camioneta o van. Para descargarlos del camión use rodillo de caucho.

Durante su uso: No use adaptadores, herramientas que generen chispas, ni caliente el cilindro para aumentar el grado de descarga del producto. Use válvula de contención o de retroceso de llama para prevenir contraflujo peligroso al sistema. Usar un regulador para reducir la presión, al

conectar el cilindro a tuberías o sistemas de presión baja (<200 bar - 3000 psig). Jamás descargue el contenido del cilindro hacia ninguna persona, equipo, fuente de ignición, material incompatible, o a la atmósfera. No use aceites o grasas en los ajustadores o en el equipo de manejo de gas. Inspeccione el sistema para escapes usando agua y jabón. No intente encajar objetos como alicates, destornilladores, palancas, etc, en la válvula, ya que puede dañarla, causando un escape. Si el usuario experimenta alguna dificultad en el funcionamiento de la válvula del cilindro discontinuar el uso y llamar al fabricante. No ponga el cilindro como parte de un circuito eléctrico.

Después de uso: Cierre la válvula principal del cilindro. Cierre firmemente las válvulas. Marque los cilindros vacíos con una etiqueta que diga "VACIO". Los cilindros deben ser devueltos al proveedor con el protector de válvula. No deben ser reutilizados cilindros que presenten fugas, daños por corrosión o que hayan sido expuestos al fuego. En estos casos notifique al proveedor, para recibir instrucciones.

Precauciones que deben tomarse para el almacenamiento de los cilindros

Almacene los cilindros en posición vertical. Separe los cilindros vacíos de los llenos. Para esto use el sistema de inventario que "el primero en llegar, primero en salir", para prevenir que los cilindros llenos sean almacenados por un largo periodo. Use solo envases y equipo (tubería, válvulas, conectores, etc.) diseñado para almacenar dióxido de carbono. Los cilindros pueden ser almacenados al descubierto, pero en tal caso, deben ser protegidos contra la intemperie y humedad para prevenir moho.

El área de almacenamiento debe encontrarse delimitada, con el fin de evitar el paso de personal no autorizado, que puedan manipular de forma incorrecta el producto. Almacene lejos de áreas con mucho tráfico; de salidas de emergencia; áreas de procesamiento y producción; alejado de ascensores, salidas de edificio, cuartos, y de pasillos principales que lleven a salidas. El área debe ser protegida, con el fin de prevenir ataques químicos o daños mecánicos, como corte o abrasión sobre la superficie del cilindro. No permita que la temperatura en el área de almacenamiento exceda los 54 °C (130 °F), ni tampoco que entre en contacto con un sistema energizado eléctricamente. Señalice el área con letreros que indiquen "PROHIBIDO EL PASO A PERSONAL NO AUTORIZADO", "NO FUMAR". y con avisos donde se muestre el tipo de peligro representado por el producto. El almacén debe contar con un extinguidor de fuego apropiado (por ejemplo, sistema de riego, extinguidores portátiles). Los cilindros no deben colocarse en sitios donde hagan parte de un circuito eléctrico. Cuando los cilindros de gas se utilicen en conjunto con soldadura eléctrica, no deben estar puestos a tierra ni tampoco se deben utilizar para conexiones a tierra; esto evita que el cilindro sea quemado por un arco eléctrico, afectando sus propiedades físicas o mecánicas.

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN PERSONAL

Controles de ingeniería

Proporcionar ventilación natural o mecánica, para asegurarse de prevenir atmósferas deficientes en oxígeno abajo del 19.5%. Los niveles de dióxido de carbono deben ser monitoreados para asegurarse que el nivel se mantenga por debajo del TLV.

Protección respiratoria

Usar equipo autónomo de respiración (SCBA) o máscaras con mangueras de aire, de presión directa si el nivel de oxígeno está por debajo del 19.5%. Los purificadores de aire no proveen

suficiente protección.

Vestuario protector

Para el manejo de cilindros es recomendable usar guantes industriales, verificando que estos estén libres de aceite y grasa; gafas ajustables de seguridad y botas con puntera de acero.

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Densidad de gas a 21.1°C (70°F), 1 atm: 1.833 kg/m³ (0.1144 lbs/ pies³)
Punto de congelación / fusión a 1 atm: (Temperatura de sublimación) -78.5°C (-109.3°F)
pH: 3.7 a 1atm (forma ácido carbónico)
Peso específico (aire = 1) a 21.1°C (70°F): 1.522
Peso molecular: 44.01
Solubilidad en agua vol/vol a 20°C (68°F) y 1 atm: 0.90
Grado de expansión: No aplica.
Olor umbral: No aplica.
Volumen específico del gas (ft³/lb) : 8.76
Presión de vapor a 21.1°C (70°F): 838 psig (5778 kPa)
Coeficiente de distribución agua / aceite: No aplica.
Apariencia y color: Dióxido de Carbono es un gas incoloro que no tiene olor. Como este gas es ligeramente ácido, algunos individuos pueden notar un leve olor y sabor punzante.

10. REACTIVIDAD Y ESTABILIDAD**Estabilidad**

El dióxido de carbono es un gas estable.

Incompatibilidad

Dióxido de carbono arde y explota cuando se calienta con aluminio en polvo, berilio, mezclas de cerio, cromo, mezclas de magnesio-aluminio, manganeso, torio, titanio y zirconio. En la presencia de humedad, dióxido de carbono se enciende con cesio óxido. Acetiluros metálicos también arden y explotan en contacto con dióxido de carbono. Dióxido de carbono reacciona con materiales alcalinos para formar carbonatos y bicarbonatos.

Condiciones a evitar

Evite exponer cilindros a temperaturas altas o llamas directas porque pueden romperse o estallar.

Reactividad

- a) Productos de descomposición : El dióxido de carbono producirá monóxido de carbono y oxígeno cuando se expone a temperaturas más altas de 1648°C (3000°F).
 b) Polimerización peligrosa : Ninguna

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA**Datos de toxicidad:**

El dióxido de carbono es un gas asfixiante, el cual tiene efectos fisiológicos en humanos a concentraciones altas. También puede causar narcosis. Los siguientes datos toxicológicos están disponibles para dióxido de carbono.

LCLo (inhalación, humano) = 9 pph/5 minutos

LCLo (inhalación, mamífero) = 90000 ppm/5 minutos

TCLo (inhalación, rata) = 6 pph/24 horas; efectos reproductivos y teratogénicos.

En humanos se presentan los siguientes síntomas :

Concentración**Síntomas de exposición**

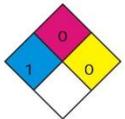
1% Dióxido de carbono:

Aumenta ligeramente la respiración.

2% Dióxido de carbono:

El ritmo respiratorio aumenta el 50%. Exposición por largo

	tiempo puede causar dolor de cabeza, cansancio.
3% Dióxido de carbono:	La respiración se aumenta dos veces más del ritmo normal y se vuelve trabajosa. Leves efectos narcóticos. Deteriora el oído, dolor de cabeza, aumenta la presión sanguínea y el ritmo del pulso.
4 - 5% Dióxido de carbono:	La respiración se aumenta cuatro veces más del ritmo normal, se presentan evidentes síntomas de intoxicación y se puede sentir una ligera sensación de ahogo.
5-10% Dióxido de carbono:	Notable y fuerte olor característico, respiración muy trabajosa, dolor de cabeza, disturbio visual y zumbido en los oídos. Afecta el sentido común, seguido en pocos minutos con la pérdida del conocimiento.
50-100% Dióxido de carbono:	Arriba del nivel de 10%, pérdida del conocimiento ocurre rápidamente. Exposición a altas concentraciones por largo tiempo, resultará en muerte por asfixia.
Capacidad irritante del material: Producto no irritante	
Sensitización a materiales: El producto no causa sensitización en humanos	
Efectos al sistema reproductivo	
Habilidad mutable: No aplicable	
Mutagenicidad: Ningún efecto mutagénico ha sido descrito para dióxido de carbono.	
Embriotoxicidad: Ningún efecto embriotóxico ha sido descrito para dióxido de carbono.	
Teratogenicidad: Ningún efecto teratogénico ha sido descrito para dióxido de carbono en Estudios clínicos en animales pruebas expuestos a concentraciones altas de dióxido de carbono indican efectos teratogénico.	
Toxicidad Reproductiva: Ningún efecto de toxicidad reproductiva ha sido descrito para dióxido de carbono en humanos. Estudios clínicos en animales pruebas expuesto a altas concentraciones de dióxido de carbono indican efectos reproductivos.	
12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA	
El dióxido de carbono (CO ₂) es un gas incoloro de olor penetrante y sabor ácido. Es un componente minoritario de la atmósfera (aproximadamente 3 partes por 10.000). Proviene de la combustión de hidrocarburos, de la fermentación y de la respiración animal.	
El dióxido de carbono no puede considerarse como contaminante en sentido estricto, ya que no es tóxico, y se halla en atmósferas puras de modo natural y es imprescindible para el desarrollo de la vida en el planeta, ya que posibilita la existencia de la fotosíntesis de las plantas y el clima actual. No obstante, se incluye dentro de las sustancias contaminantes ya que, impide que una parte de la energía radiante que recibe la Tierra vuelva al espacio, produciendo el llamado efecto invernadero. En la actualidad su concentración ha llegado a 359 ppmv (partes por millón volumen), producto de quema de combustibles fósiles, cambios en uso de suelos (principalmente deforestación), quema de biomasa, manufactura de cemento. El aumento de dióxido de carbono en la atmósfera es el responsable del calentamiento global en la baja atmósfera. Este calentamiento produce aridez en la tierra afectando a las actividades agropecuarias y según los investigadores en un futuro no muy lejano se fundirán las enormes masas de hielo de los polos, provocando una elevación de los niveles del mar, peligrando seriamente la posibilidad de vida en las costas.	
13. CONSIDERACIONES DE DISPOSICIÓN	
Regrese los cilindros vacíos al fabricante, para que este se encargue de su disposición final de	

acuerdo a lo establecido por la normatividad ambiental.	
<p>14. INFORMACIÓN SOBRE TRANSPORTE</p> <p>Número de Naciones Unidas : UN 1013 Clase de peligro D.O.T : 2.2 Rotulo y etiqueta D.O.T : GAS NO INFLAMABLE NO TOXICO Contaminante marino : El producto no está identificado como un contaminante marino por el D.O.T</p> <p>Información especial de embarque: Los cilindros se deben transportar en una posición segura, en un vehículo bien ventilado. El transporte de cilindros de gas comprimido en automóviles o en vehículos cerrados presenta serios riesgos de seguridad y deben ser descartados.</p>	
<p>15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA</p> <p>Para el transporte, almacenamiento y manejo de productos químicos peligrosos se deben tener en cuenta los requerimientos establecidos en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2-266:2000.</p> <p>La identificación de cilindros que contienen gases industriales, se encuentra reseñada en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE-INEN 0441:84.</p>	
<p>16. INFORMACIÓN ADICIONAL</p> <p>En las zonas de almacenamiento de cilindros se debe contar con la siguiente información de riesgos :</p> <p>Código NFPA Salud : 1 "Ligeramente peligroso" Inflamabilidad : 0 "No arde" Reactividad : 0 "Estable"</p> <p>Salida de válvula : CGA 320</p> <p>Recomendaciones de material : Se puede usar la mayoría de los materiales más comunes.</p>	

Esta hoja de seguridad es propiedad exclusiva de AGA S.A.
 Prohibida su reproducción total o parcial, con fines comerciales
 por parte de personas ajenas a esta compañía.

GAREN

PLÁSTICOS ESPECIALES "GAREN", S.A. DE C.V.

Ficha técnica acrílico GAREN®
Propiedades Mecánicas y físicas

PROPIEDAD	VALOR	METODO DE PRUEBA (ASTM)
ÓPTICAS		
Índice de refracción	1.49	ASTM 542
Transmisión de luz (%)		ASTM 1003
<4.5 mm.	92	
>4.5 mm.	90	
Haze(%)	2.0	ASTM 1003
MECANICAS		
Peso específico	1.18	ASTMD 792
Resistencia a la tensión	10,400	ASTMD 638
Elongación a la ruptura(%)	4.85	ASTMD 638
Modulo de Tensión(lbf./plg.)	452000	ASTMD 638
Resistencia a la flexión(lbf./plg.)	18,000-19,000	ASTMD 790
Resistencia al impacto Izod(ft.lb./plg.)	0.3-0.4	ASTMD 256
Dureza Rockwell	M 90 - 100	ASTMD 785
Dureza Barcol	50	ASTMD 2583
TERMICAS		
Temperatura de formado(°C)	140	
Temperatura máxima de servicio(°C)	80	
Temperatura de deflexión bajo carga	101.5	ASTMD 648
VARIAS		
Absorción de agua(24 hrs., 23°C)(%)	0.3	ASTMD 570

MEDIDA (ESPESORES)	120X180	120X240	180X180	180X240
2 mm.	•	•		
3 mm.	•	•	•	•
4 mm.	•	•	•	•
5 mm.	•	•	•	•
6 mm.	•	•	•	•
9 mm.	•	•	•	•
12 mm.	•	•	•	•
15 mm.	•	•	•	•
18 mm.	•	•	•	•
21 mm.	•	•	•	•
24 mm.	•	•	•	•



PLÁSTICOS ESPECIALES "GAREN", S.A. DE C.V.

ESPEORES (mm)	TAMAÑOS m x m			
	1.20 x 1.80	1.20 x 2.40	1.80 x 2.40	1.80 x 1.80
2.0	1.29 - 2.55		-	
2.5	1.76 - 3.03		1.50 - 3.03	
3.0	2.24 - 3.50		1.98 - 3.50	
3.2	2.42 - 3.68		2.16 - 3.94	
4.0	2.87 - 4.34		2.51 - 4.52	
5.0	3.78 - 5.35		3.65 - 5.45	
6.0	4.46 - 6.24		4.43 - 6.34	
9.0	7.48 - 9.76		7.35 - 9.89	
12.0	10.22 - 12.76		10.09 - 12.88	
15.0	13.15 - 15.90		13.00 - 16.05	
18.0	15.97 - 18.76		15.72 - 19.02	
21.0	19.05 - 21.84		18.42 - 22.48	
24.0	21.79 - 24.58		21.16 - 25.22	

COLORES	ACRÍLICO	ACRÍLICO TRANSPARENTE	ACRÍLICO OPACO	ACRÍLICO LUMINISCENTE	ACRÍLICO FLUORESCENTE
CRISTAL	•				
HUMO	•				
HUMO OSCURO		•			
OPALINO	•				
VERDE VIDRIO	•				
BLANCO	•				
BLANCO OPACO	•				
ROJO		•	•	•	•
AZUL		•	•	•	
AMBAR		•	•	•	
VERDE		•	•	•	•
AMARILLO		•	•	•	•
NARANJA		•	•	•	
NEGRO			•		

GAREN

PLÁSTICOS ESPECIALES "GAREN", S.A. DE C.V.

RESISTENCIA QUÍMICA DE LA LAMINA ACRILICA GAREN	
R E S I S T E 2 0 °C	
ACEITE DE OLIVA	CLORURO DE SODIO
ACIDO ACETICO (CONCENTRACIÓN 10%)	CLORURO FERRICO (CONCENTRACION 10%)
ACIDO CEBASICO	DICROMATO DE POTASIO
ACIDO CÍTRICO (SOLUCION SATURADA)	DIESEL
ACIDO CLORHÍDRICO	ETER DE PETROLEO
ACIDO FORMICA (CONCENTRACION 10%)	ETIL DE GLICOL
ACIDO FOSFORICO	FORMALDEHÍDO
ACIDO LACTICO	FTALATO DE DIBUTILO (DBP)
ACIDO NITRICO (CONCENTRACION 10%)	GLICERINA
ACIDO OXALICO	HEXANO
ACIDO TARTARICO	HIDROXIDO DE POTASIO
AGUA AUN CON TRATAMIENTO TIPICO PARA ALBERCAS	HIDROXIDO DE SODIO (SOSA CAUSTICA)
AMONIACO	HIPOCLORITO DE SODIO (10% CLORO)
CARBONATO DE SODIO	LANOLINA
CLORATO DE POTASIO	MERCURIO
CLORATO DE SODIO	METIL QUINONA
CLORURO DE AMONIO (SOLUCION SATURADA)	METILAMINA
CLORURO DE CALCIO (SOLUCION SATURADA)	PERMANGANATO DE POTASIO (SOLUCION AL 10%)
CLORURO DE MAGNESIO	PEROXIDO DE HIDRÓGENO (CONCENTRACION 10%)
CLORURO DE POTASIO	SULFATO DE POTASIO
N O R E S I S T E	
ACETALDEHÍDO	CLORURO DE METILENO
ACETATO DE AMILO	DIBROMUO DE ETILENO
ACETATO DE BUTILO	DICLORURO DE ETILENO
ACETATO DE ETILO	DICLORURO DE METILENO
ACETOFENONA	DISULFURO DE CARBONATO
ACIDO BUTIROCO (CONCENTRADO)	EPICLORHIDRINA
ACIDO CIANHIDRICO	ETER DIETILICO
ACIDO FLUORHIDRICO	FENOL
ALCOHOL AMILICO	METIL CICLOHEXANOL
ALCOHOL ETÍLICO (CONCENTRACION 100%)	METIL ETIL CETONA
ALCOHOL METILICO (CONCENTRACION 100%)	NITRO BENCENO
ANILINA	PERCLORETILENO
BENCENO	PROPILCETONA
BENZALDEHIDO	SALICILATO DE METILO
BENZOATO DE METILO	TETRACLORURO DE CARBONO
BUTIRALDEHIDO	TETRAHIDROFURANO
CETONA	THINNER
CICLOHEXANO	TOLUENO
CICLOHEXANOL	TOLUENO
CICLOHEXANONA	TRICLORETILENO
CLOROFORMO	TRICLOROETANO
CLORURO DE BUTILO	XILOL

ANEXO VII. RANGOS DE FUNCIONAMIENTO

Rango de Flujos			CO2	1,00%	2,00%	3,00%	4,00%	5,00%	6,00%	7,00%	8,00%	9,00%	10,00%
			[CO2] (Kmol/m3)	0,000339	0,000678	0,001017	0,001355	0,001694	0,002033	0,002372	0,002711	0,003050	0,003388
Flujo Líquido (lpm)	7	Moles gas	CO2 absorbido (Kmol/h)	0,000142	0,000285	0,000427	0,000569	0,000712	0,000854	0,000996	0,001139	0,001281	0,001423
			CO2 ingresando (Kmol/h)	0,000619	0,001238	0,001856	0,002475	0,003094	0,003713	0,004331	0,004950	0,005569	0,006188
			Aire ingresando (Kmol/h)	0,012375	0,024750	0,037126	0,049501	0,061876	0,074251	0,086626	0,099001	0,111377	0,123752
			Total mezcla (Kmol/h)	0,012994	0,025988	0,038982	0,051976	0,064970	0,077964	0,090958	0,103951	0,116945	0,129939
			CO2 absorbido (Kmol/h)	0,000203	0,000407	0,000610	0,000813	0,001017	0,001220	0,001423	0,001626	0,001830	0,002033
	17	Moles gas	CO2 ingresando (Kmol/h)	0,000884	0,001768	0,002652	0,003536	0,004420	0,005304	0,006188	0,007072	0,007955	0,008839
			Aire ingresando (Kmol/h)	0,008839	0,017679	0,026518	0,035358	0,044197	0,053036	0,061876	0,070715	0,079555	0,088394
			Total mezcla (Kmol/h)	0,009723	0,019447	0,029170	0,038893	0,048617	0,058340	0,068063	0,077787	0,087510	0,097234

ANEXO VIII. RESUMEN ENSAYOS EXPERIMENTALES

Solvente	Flujo			pH		Kmol/h Aire	Kmol/h CO ₂		Porcentaje		Velocidad de Reacción (Kmol/m ³)/h
	Concentración NaOH	(l/min)	Max.	Min.	pH de entrada		pH de salida	Aire	CO ₂ ingreso	CO ₂ absorbido	
0	10		x	7	5,62	0,057	0,003	0,0006715000	3,92%	22,38%	0,0001653
	17	x			5,52	0,057	0,003	0,0011186000	3,20%	37,29%	0,0001271
0,000001N	10		x	8	5,70	0,057	0,003	0,0006971429	3,88%	23,24%	0,0002511
	17	x			5,77	0,057	0,003	0,0012512000	2,98%	41,71%	0,0002041
0,00001N	10		x	9	5,90	0,057	0,003	0,0007065714	3,87%	23,55%	0,0003300
	17	x			5,76	0,057	0,003	0,0013069600	2,88%	43,57%	0,0002581
0,0001N	10		x	10	5,97	0,057	0,003	0,0007215000	3,84%	24,05%	0,0003924
	17	x			6,02	0,057	0,003	0,0013175000	2,87%	43,92%	0,0004791
0,0025N	10		x	10,8	6,32	0,057	0,003	0,0009470000	3,48%	31,57%	0,0012673
	17	x			6,49	0,057	0,003	0,0018105000	2,04%	60,35%	0,0019068

BIBLIOGRAFIA

1. **Perry, John H.** *Chemical Engineers' Handbook*. s.l. : Fourth, 1963.
2. **Marcilla Gomis, A.** *INTRODUCCION A LAS OPERACIONES DE SEPARACIÓN Contacto continuo*. [En línea] 1999.
<http://publicaciones.ua.es/filespubli/pdf/LD8479087129881225.pdf>.
3. **McCabe, Warren L., Smith, Julian C. y Harriot, Peter.** *Operaciones Unitarias en ingeniería química*. México : McGraw Hill, 2007.
4. **Universidad Politécnica de Cataluña.** *Planta Piloto de Absorción de Gases*. [En línea] 2009.
http://epsem.upc.edu/~plantapilot/castella/model%20matematic_2.3.html.
5. **United States Environmental Protection Agency.** *Controles para SO₂ y gas ácido*. [En línea] Diciembre de 1995.
<http://www.epa.gov/ttn/catc1/dir2/cs5-2ch1-s.pdf>.
6. **Universidad Nacional de la Plata.** *Comparación entre columnas de platos y columnas de relleno*. [En línea] 2010.
http://www.ing.unlp.edu.ar/dquimica/paginas/catedras/iofq813/archivos/Comparacion_Platos_Rellenos_101108_V0.pdf.
7. **Treybal, Robert E.** *Operaciones de Transferencia de Masa*. México : McGraw Hill.
8. **Gisele.** NEETESCUELA. [En línea] 18 de Noviembre de 2013.
<http://neetescuela.com/absorción-de-gases-caracteristicas-del-solvente/>.

9. **Milan Guitierrez, Demis, y otros, y otros.** *Columnas de Absorción.* [En línea] 2007. <http://www.jackzavaleta.galeon.com/balw4.pdf>.
10. **American Institute of Chemical Engineers.** *Processes Controlled by Liquid-Film Resistance.*
11. **Romero Rojas, Jairo Alberto.** *Calidad del Agua.* Bogotá : Escuela Colombiana de Ingeniería, 2002.
12. **Blanco, A.** *Absorción de CO₂ en una columna de burbujeo.* [En línea] 2009. www.raco.cat/index.php/afinidad/article/download/279565/367280.
13. **Wikipedia.** *Hidróxido de Sodio.* [En línea] 2015.
14. **CISPROQUIM.** *Hoja de Datos de Seguridad Hidroxido de Sodio.*
15. **Linde Gas.** *Dióxido de Carbono comprimido CO₂ - MSDS.*
16. **Bósquez Yáñez, Dany Patricio y Yumi Escobar, Carolina Mariela.** *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA COLUMNA DE ABSORCIÓN PARA EL ANÁLISIS DE SO₂ EN GASES DE COMBUSTIÓN.* [En línea] 2011. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/1655/1/96T00126.pdf>.
17. **Cengel, Yunus A. y Boles, Michael A.** *Termodinámica.* México : McGraw Hill, 2009.
18. **Sánchez San Román, Francisco Javier.** Universidad de Salamanca. *Especies Carbonatadas.* [En línea] 2011. <http://hidrologia.usal.es>.
19. **Miller, John D. y Rehm, Thomas R.** *PACKED COLUMN MASS TRANSFER COEFFICIENTS FOR CONCURRENT AND*

COUNTERCURRENT FLOW: AN ANALYSIS OF RECENT WORK. Tucson : s.n., 1976.

20. **Masari Cuestas, Marlon y Orihuela Solier, Elena.** Universidad Nacional del Centro de Perú. *EVALUACIÓN DEL TIPO DE RELLENO (ANILLO RASCHIG Y MONTURA BERL DE CERÁMICO) SOBRE EL FACTOR DE REACCIÓN EN LA ABSORCIÓN QUÍMICA DEL DIÓXIDO DE CARBONO PURO CON EL HIDRÓXIDO DE SODIO EN LA COLUMNA DE ABSORCIÓN DE LOPU-FIQ-UNCP.* [En línea] 2011. <http://cip.org.pe/imagenes/temp/tesis/42960616.pdf>.

21. **Blanco, Antonio, y otros, y otros.** *Absorción de CO₂ en una columna de burbujeo por reacción con álcalis.* Santiago de Compostela : s.n., 2009.

22. **National Oceanic and Atmospheric Administration.** *Sodium Hydroxide, solid.* [En línea] 2010. <http://cameochemicals.noaa.gov/chemical/9073>.

23. **Moreno Mendoza, Leticia Judith.** *Columnas o Torres de Absorción.* [En línea] 2013. https://quimicaitatljmm.files.wordpress.com/2013/11/psiii-absorción-ago_dic-2013.pdf.

24. **Pingxiang Chemshun Ceramics Co., Ltd.** *Anillo plástico de Raschig.* [En línea] 2014. http://es.made-in-china.com/co_chemshun/product_Plastic-Raschig-Ring_hoiruiyiy.html.