

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TORRE DE
ABSORCIÓN/DESORCIÓN RELLENA**

Por:

SANTIAGO ALEJANDRO FLORES SÁNCHEZ

**Proyecto de Grado presentado a consideración de la “UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el grado
académico de Licenciatura en Ingeniería Química.**

Junio de 2024

TARIJA-BOLIVIA

V°B°

Ing. Marcelo Segovia

DECANO

Ing. Gustavo Succi

VICEDECANO

APROBADA POR:

TRIBUNAL:

Ing. David Balderrama Paredes

Ing. Juan Pablo Herbas Barrancos

Ing. Fabricio Campero Verdún

Advertencia

El tribunal calificador del presente proyecto, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo ellos únicamente responsabilidad del autor.

Dedicatoria

A mis padres Roger y Karina, a mi hermana Mikaela y a mis abuelos Eduardo y Freddy por su apoyo y consejos en el desarrollo del proyecto; a mi amada Camila por mantener en alto mi motivación en los momentos difíciles; a mis maestros Claudia, Myrian y Juan Carlos, quienes me tomaron como pupilo y se introdujeron en esta hermosa carrera. A mis amigos Gustavo, Camila, Alejandro, Carlos y Alberto por su apoyo.

Agradecimientos

Agradezco a mi amada familia, quienes son mi pilar de fortaleza en momentos de tempestad; a mis amigos con quienes comparto tan hermosos momentos; a mis maestros, quienes me guiaron en el sendero del conocimiento.

Pensamiento

“La felicidad del ambicioso depende de la acción ajena; la del voluptuoso, de sus pasiones; la del prudente, de sus propios actos”

-Marco Aurelio

CONTENIDO

Advertencia	i
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Pensamiento	iv
Resumen	v

INTRODUCCIÓN

Antecedentes	1
Justificación.....	2
Justificación Económica.....	2
Justificación Académica.....	2
Justificación Técnica.....	2
Justificación Ambiental.....	2
Justificación Personal.....	3
Objetivos	3
Objetivo General	3
Objetivos Específicos.....	3

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Absorción	4
1.2. Desorción	4
1.3. Difusión molecular.....	5
1.4. Teorías de transferencia de masa	5
1.5. Torres empacadas.....	8

1.6. Características del relleno de la torre	9
1.7. Elección de la corriente gaseosa	9
1.8. Características de compuestos presentes en la operación de desorción	9
1.8.1. Alcohol etílico 96 % (CH ₃ CH ₂ OH)	9
1.8.2. Amoníaco en solución estándar 4N.....	10
1.8.3. Ácido sulfhídrico.....	11
1.8.4. Acetona	11
1.8.5. Aire comprimido	12
1.8.6. Agua (H ₂ O).....	12
1.9. Condiciones óptimas de operación	13
1.10. Caída de presión y velocidad de inundación.....	14
1.11. Curva de equilibrio.....	14
1.12. Curva de operación	15
1.12.1. Balance de materia en una torre con flujo a contracorriente.....	16
1.13. Relación L _s /G _s	18
1.14. Dimensionamiento de la torre	18
1.14.1. Área transversal.....	18
1.14.2. Coeficiente de resistencia para desorción	19
1.14.3. Cálculo de la altura de la torre	19
1.15. Simulación de equilibrio líquido-vapor mediante simulación en el programa Aspen Hysys V10.....	20
1.16. Medición de variables mediante Arduino	22

CAPÍTULO II: PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Selección de soluto sometido a desorción.....	24
2.1.1. Accesibilidad.....	24
2.1.2. Medición	24
2.1.3. Relevancia industrial.....	25
2.1.4. Solubilidad de soluto en los solventes líquido y gaseoso y volatilidad	26
2.1.5. Compatibilidad química y corrosividad de los solutos con tuberías comerciales y costos.....	27
2.2. Matriz comparativa	27
2.3. Caracterización de la materia prima.....	28
2.3.1. Caracterización de la solución alcohólica de alimentación.....	28
2.3.2. Caracterización de la corriente de aire	30
2.4. Descripción del proceso de investigación	32
2.5. Descripción del proceso de diseño y construcción del prototipo.....	32
2.5.1. Construcción de estructura de soporte y elementos de seguridad.....	34
2.6. Descripción del funcionamiento y puesta en marcha de la torre piloto	36
2.6.1. Sistema de válvulas	36
2.6.2. Sistema de control de la torre.....	37
2.6.3. Puesta en marcha.....	38
2.7. Descripción del plan de muestreo	40
2.8. Diseño factorial	43
2.8.1. Variables independientes	43
2.8.2. Variables dependientes.....	43
2.8.3. Tabla de tratamientos del diseño factorial	44

CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados obtenidos en el diseño factorial	46
3.1.1. Resultados cualitativos.....	46
3.1.2. Mediciones de caudal de corriente líquida.....	46
3.1.3. Mediciones de corriente molar gaseosa	49
3.1.4. Mediciones de la corriente molar líquida.....	51
3.1.5. Relación L/G y gradiente de temperaturas obtenidos en el diseño factorial.....	54
3.1.6. Variable respuesta observada.....	55
3.2. Análisis estadístico.....	56
3.2.1. Efectos principales y efecto de interacción.....	56
3.2.2. Análisis de varianza	58
3.2.3. Análisis del modelo.....	59
3.2.4. Análisis de residuos	61
3.3. Diseño de la torre de desorción rellena	62
3.3.1. Construcción de la curva de operación	62
3.3.2. Construcción de la curva de equilibrio.....	63
3.3.3. Determinación de los coeficientes de transferencia de masa	64
3.3.3.1. Coeficiente global de transferencia de masa referido al líquido	64
3.3.3.2. Coeficiente global de transferencia de masa referido al gas	65
3.3.3.3. Coeficientes individuales y resistencias a la transferencia de masa	66
3.3.5. Velocidad de inundación.....	67
3.3.6. Cálculo de altura de torre real	68
3.4. Resultados observados en la torre de tamaño final	70

3.5. Cálculo de error en el diseño y correcciones del modelo.....	72
3.6. Análisis económico	74
3.6.1. Presupuesto de costos de mantenimiento de la torre.....	80
3.6.2. Comparación de precios con trabajos similares	82

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones	83
4.2. Recomendaciones.....	85

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía	86
--------------------	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Matriz comparativa de solutos de desorción	28
Tabla 2-2. Dimensiones y especificaciones de la torre piloto.....	35
Tabla 2-3. Tratamiento del diseño factorial	44
Tabla 2-4. Valores promedio de cada nivel en el diseño factorial	44
Tabla 3-1. Historial de mediciones de caudal de la corriente líquida en el diseño factorial 1	47
Tabla 3-2. Historial de mediciones de caudal de la corriente líquida en el diseño factorial 2	48
Tabla 3-3. Flujo molar de aire en el diseño factorial	51
Tabla 3-4. Resultados de ensayos de alcoholimetría y densimetría 1	52
Tabla 3-5. Resultados de ensayos de alcoholimetría y densimetría 2.....	53
Tabla 3-6. Flujo molar de solución alcohólica en el diseño factorial	54
TABLA 3-7. Relación L/G y gradiente de temperaturas en el diseño factorial.....	55
Tabla 3-8. Variable respuesta observada	55
Tabla 3-9. Resultados del análisis de varianza.....	58
Tabla 3-10. Coeficientes del modelo lineal.....	59
Tabla 3-11. Calidad del ajuste en regresión	60
Tabla 3-12. Condiciones promedio del punto óptimo de operación	63
Tabla 3-13. Puntos para la curva de equilibrio	63
Tabla 3-14. Coeficientes individuales de transferencia y resistencias a la transferencia de masa.....	66
Tabla 3-15. Caudal promedio de la corriente gaseosa	68
Tabla 3-16. Historial de caudal de la corriente líquida en ensayos finales	70

Tabla 3-17. Resultados de ensayos de alcoholimetría y densimetría finales	71
Tabla 3-18. Variables observadas en los ensayos finales	71
Tabla 3-19. Valores x vs. y para las curvas de operación y de equilibrio reales	72
Tabla 3-20. Servicios solicitados	74
Tabla 3-21. Ítems para el sistema de control, sensores e instrumentos.....	75
Tabla 3-22. Insumos para la construcción y operación de la torre.....	76
Tabla 3-23. Ítems que forman el cuerpo y relleno de la torre	77
Tabla 3.24. Ítems que forman la estructura de soporte	78
Tabla 3-25. Ítems para la construcción de los sistemas de alimentación y de salida 1	78
Tabla 3-26. Ítems para la construcción de los sistemas de alimentación y de salida 2	79
Tabla 3-27. Presupuesto global	80
Tabla 3-28. Costos estimados de mantenimiento.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Gradiente de concentraciones cerca de la superficie de contacto	7
Figura 1-2. Pictograma del etanol	10
Figura 1- 3. Pictograma de solución de amoniaco 4N	10
Figura 1-4. Pictograma de ácido sulfhídrico	11
Figura 1-5. Pictograma de acetona.....	12
Figura 1-6. Pictograma del aire.....	12
Figura 1-7. Pictograma del agua destilada	13
Figura 1-8. Solubilidad de amoniaco en agua según la temperatura	13
Figura 1-9. Curva de operación y de equilibrio en una torre de desorción.....	16
Figura 1-10. Diagrama de una torre de absorción/desorción	17
Figura 1-11. “Equilibrium Unit” disponible en Aspen Hysys V10	21
Figura 1-12. Ejemplo de gráficas obtenidas por simulación en Aspen Hysys V10....	22
Figura 2-1. Curvas de equilibrio de solutos propuestos.....	26
Figura 2-2. Esquema de Tubo Pitot.....	31
Figura 2-3. Algoritmo de operación y puesta en marcha de la torre para desorción ..	39
Figura 2-4. Algoritmo para el plan de muestreo	42
Figura 3-1. Altura sobre el nivel del mar a la que se realizaron los ensayos	50
Figura 3-2. Gráfica de efectos principales	56
Figura 3-3. Gráfica de interacción	57
Figura 3-4. Gráfica de Pareto de efectos principales y de interacción.....	58
Figura 3-5. Gráfica de superficie del modelo de desorción	60
Figura 3-6. Gráfica de contorno del modelo de desorción.....	61

Figura 3-7. Gráfica normal de residuos para %Desorción	61
Figura 3-8. Histograma de residuos	62
Figura 3-9. Curva de operación y curva de equilibrio	64
Figura 3-10. Curvas de operación y de equilibrio en ensayos finales.....	72

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1-1. Sensores Arduino FS300A (izquierda) Y DHT11 (derecha)	23
Fotografía 2-1. Puesta en marcha de la torre de desorción	38
Fotografía 2-2. Recolección de muestras y ensayo de alcoholimetría	41
Fotografía 2-3. Construcción de módulo con relleno de esferas de vidrio	45

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1

Proceso de construcción de la torre de absorción/desorción rellena

Anexo 2

Operación de la torre y ensayos realizados

Preparación de materia prima

Anexo 3

Trabajo de gabinete

Selección de modelo termodinámico en aspen hysys v10

Especificaciones para la simulación de la curva de equilibrio

NOMENCLATURA, ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA UTILIZADA

A	Área transversal de tuberías (m^2)
A_t	Área transversal de la torre (m^2)
a	Área de la superficie de contacto por unidad de volumen de la torre rellena (m^2/m^3)
b	Distancia en dirección de la difusión (m)
CEANID	Centro de Análisis de Investigación y Desarrollo
c_A	Concentración del componente A ($kg\ mol/m^3$)
D	Diámetro (m)
D_v	Difusividad volumétrica (m^2/h)
ρ_{Agua}	Densidad del agua (kg/m^3)
ρ_{Aire}	Densidad del aire (kg/m^3)
ρ_{Etanol}	Densidad del etanol (kg/m^3)
ρ_{total}	Densidad total de una muestra (kg/m^3)
G	Flujo molar de la corriente gaseosa (mol/s)
G_s	Flujo molar por unidad de área de solvente gaseoso ($mol/(s * m^2)$)
g	Aceleración gravitacional (m/s^2)
h	Altura (m)

Δh	Diferencia entre dos alturas (m)
J_A	Flux molar del componente A ($\text{kg mol}/(\text{m}^2 * \text{h})$)
K_x	Coefficiente global de transferencia de masa referida a la fase líquida ($\text{kg mol}/(\text{m}^2 * \text{h})$)
K_y	Coefficiente global de transferencia de masa referida a la fase gaseosa ($\text{kg mol}/(\text{m}^2 * \text{h})$)
k_x	Coefficiente de transferencia de masa en fase líquida ($\text{kg mol}/(\text{m}^2 * \text{h})$)
k_y	Coefficiente de transferencia de masa en fase gaseosa ($\text{kg mol}/(\text{m}^2 * \text{h})$)
L	Flujo molar de la corriente líquida (mol/s)
L_s	Flujo molar por unidad de área de solvente líquido ($\text{mol}/(\text{s} * \text{m}^2)$)
L/G	Relación entre el flujo molar líquido y el gaseoso
L_s/G_s	Relación entre el flujo molar por unidad de área de solvente en el líquido y en el gaseoso
LE	Línea de Equilibrio
LO	Línea de Operación
LOU	Laboratorio de Operaciones Unitarias
M	Masa o peso molecular (kg/mol)

m	Constante de la ley de Henry o pendiente de la curva de equilibrio
m_{Agua}	Masa de agua (kg)
m_{Etanol}	Masa de etanol (kg)
m_{total}	Masa total de una muestra (kg)
MP	Materia Prima
N_A	Moles de soluto A transferidos por unidad de tiempo (mol/s)
P	Presión (Pa)
P_A	Presión de vapor de una solución con soluto A (Pa)
P_{abs}	Presión absoluta (Pa)
P_{bar}	Presión barométrica (Pa)
P_{man}	Presión manométrica (Pa)
P_o	Presión barométrica medida al nivel del mar (Pa)
$P_{\text{disolvente}}^{\circ}$	Presión de vapor del disolvente puro (Pa)
PVC	Policloruro de vinilo
Q_G	Caudal de corriente gaseosa (m^3/s)
$\overline{Q_G}$	Caudal promedio de corriente gaseosa (m^3/s)
Q_L	Caudal de corriente líquida (m^3/s)

\overline{Q}_L	Caudal promedio de corriente líquida (m^3/s)
R	Constante de los gases ideales ($\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$)
r	Velocidad de transferencia ($\text{kg mol}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)
S	Área transversal interna de la torre (m^2)
T_G	Temperatura de la corriente gaseosa ($^\circ\text{C}$)
T_L	Temperatura de la corriente líquida ($^\circ\text{C}$)
UAJMS	Universidad Autónoma Juan Misael Saracho
UDELAR	Universidad de la República
V_{Etanol}	Volumen de etanol en una muestra (m^3)
V_{total}	Volumen total de una muestra (m^3)
% V/V	Concentración en porcentaje Volumen/Volumen (%)
v	Velocidad (m/s)
$V_{\text{inundación}}$	Velocidad de inundación (m/s)
$V_{\text{operación}}$	Velocidad de operación (m/s)
% v	Porcentaje de aproximación a la velocidad de inundación (%)
X_A	Relación entre la fracción molar de soluto y la fracción molar de solvente líquido
x_A	Fracción molar de la fase líquida

x_A^*	Fracción molar en fase líquida que estaría en equilibrio con la fase gaseosa a una concentración y_A
x_{Ai}	Fracción molar en la interfase de la fase líquida
x_f	Fracción molar de alcohol en la corriente líquida en el fondo de la torre
x_o	Fracción molar de alcohol en la corriente líquida en el tope de la torre
Δx_{ML}	Diferencia de fracción molar media logarítmica en la fase líquida
Y_A	Relación entre la fracción molar de soluto y la fracción molar de solvente gaseoso
y_A	Fracción molar de la fase gaseosa
y_A^*	Fracción molar en fase gaseosa que estaría en equilibrio con la fase líquida a una concentración x_A
y_{Ai}	Fracción molar en la interfase de la fase gaseosa
y_E	Valor de la fracción molar gaseosa en la curva de equilibrio dado un valor x_A
Z	Altura total de la torre (m)
z	Altura sobre el nivel del mar (m)
Σ	Operador de sumatoria