

“EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DESORCIÓN - ABSORCIÓN PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN EL PROCESO DE NITRURACIÓN DE
LA EMPRESA ALUICA S.A.S”.

SEBASTIAN QUIÑONES BOHORQUEZ
LAURA SOFÍA ROMERO SÁNCHEZ

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2020

“EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DESORCIÓN - ABSORCIÓN PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN EL PROCESO DE NITRURACIÓN DE
LA EMPRESA ALUICA S.A.S”.

SEBASTIÁN QUIÑONES BOHORQUEZ
LAURA SOFÍA ROMERO SÁNCHEZ

PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE:
INGENIERO QUÍMICO

DIRECTOR:
JUAN SEBASTIÁN FERNÁNDEZ MURILLO
INGENIERO QUÍMICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2020

Nota de aceptación:

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina.

Ing. Juan Camilo Cely Garzón.

Bogotá D. C., Febrero de 2020.

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente institucional y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA PEÑA.

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA.

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS.

Secretaria general

Dra. ALEXANDRA MEJIA GUZMAN.

Decano Facultad de Ingenierías

Dr. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI.

Director Programa de Ingeniería Química

Dr. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ.

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

DEDICATORIA

“El experimentador que no sabe lo que está buscando, no comprenderá lo que encuentra” – Claude Bernard.

A mi madre, por ser guía y ayudarme a nunca perder el rumbo, a mi hermana, padre, novia y todos aquellos que estuvieron presentes y ayudaron de alguna forma a este proyecto.

Sebastián Quiñones Bohórquez.

A mi familia por haber sido mi guía y apoyo a lo largo de este proceso, y a todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación personal y profesional.

Laura Sofía Romero Sánchez.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

En primer lugar, agradecer a la empresa Aluica S.A.S. y sus directivos por darnos la oportunidad de trabajar con ellos continuamente; por la ardua labor como colaboradores para desarrollar este proyecto; a la Universidad y a Dios, porque son base de la formación espiritual y profesional.

Al ingeniero Juan Sebastián Fernández, por su paciencia y amistad, fue un gran proceso en donde se aprendió, conoció y se disfrutó; además de permitirnos entrar a la compañía.

A todas aquellas personas que fueron pilares en la construcción de este proyecto y documento, familiares, amigos, profesores y conocidos que hicieron su aporte a la elaboración de este proceso. A ellos mil gracias.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	23
1. GENERALIDADES	26
1.1 MARCO DE REFERENCIA	26
1.1.1 Descripción de la empresa Aluica S.A.S	26
1.1.2 La nitruración	27
1.1.3 El amoniaco	29
1.1.4 Límites permisibles para amoniaco	29
1.1.5 Graficas de control de Shewhart	30
1.1.6 Sistema desorción – absorción	32
1.1.7 Absorción	34
1.2 MARCO LEGAL	34
1.2.1 Decreto 3930 de 2010	35
1.2.2 Resolución 631 de 2015	35
1.2.3 Resolución 1207 de 2014	36
1.2.4 Resolución 601 de 2006	37
2. SISTEMA DE DESORCIÓN	38
2.1 ANTECEDENTES DE DESORCIÓN	39
2.1.1 Nitruración en la empresa ALUICA S.A.S	39
2.1.2 Historia de la nitruración en la empresa ALUICA S.A.S	41
2.1.3 Estudios previos	41
2.1.4 Simulación con las condiciones planteadas en estudios previos	47
2.2 ALTERNATIVAS DE MEJORA PARA LA TORRE DE DESORCIÓN	51
2.2.1 Aspersion de líquido	51
2.2.2 Relación diámetro de columna – diámetro del empaque	52
2.2.3 Difusor de aire	53
2.2.4 Mejora en la medición de flujos de aire y agua	54
2.2.5 Variación de los flujos aire – agua para la torre empacada	54
2.2.6 Generación de burbujas	55
2.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL	56
2.3.1 Descripción del prototipo de torre de desorción	56
2.3.2 Protocolo de experimentación	59
2.4 EJECUCIÓN EXPERIMENTAL	60
2.4.1 Resultados de experimentación	61
3. SISTEMA DE ABSORCIÓN	64
3.1 SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA	64
3.1.1 Selección del absorbente	65
3.1.2 Selección del equipo de absorción	71
3.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL	75

3.2.1	Descripción del prototipo de torre de absorción	75
3.2.2	Protocolo de experimentación	76
3.2.3	Ejecución experimental	82
3.2.4	Resultados procedimiento experimental	83
4.	CONDICIONES TÉCNICAS DEL SISTEMA	85
4.1	BALANCE DE MASA PROCESO DE DESORCIÓN	85
4.2	BALANCE DE MATERIA DEL PROCESO DE ABSORCIÓN	89
4.3	BALANCE DE ENERGÍA DEL SISTEMA	92
4.4	DIMENSIONAMIENTO BÁSICO DEL SISTEMA	92
4.4.1	Dimensionamiento básico del sistema de desorción	92
4.4.2	Platos teóricos	95
4.4.3	Determinación de platos con base en la experimentación	96
4.4.4	Altura de la columna y eficiencia de plato	96
5.	COSTOS DE OPERACIÓN Y FABRICACIÓN DEL SISTEMA	99
5.1	COSTOS DE OPERACIÓN	99
5.1.1	Costos energéticos	99
5.1.2	Costos por compuestos	100
5.1.3	Costos por operarios	101
5.2.	COSTOS DEL SISTEMA DESORCIÓN-ABSORCIÓN	102
5.2.1	Costos columna desorción	102
5.2.2	Costos columna de absorción	104
5.3	Costos totales de operación y fabricación	105
6.	CONCLUSIONES	107
7.	RECOMENDACIONES	109
	BIBLIOGRAFÍA	110
	ANEXOS	115

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Niosh pocket guide to chemical hazards	116
Anexo B. Cálculos para la realización de la gráfica de control de shewhart	117
Anexo C. Procedimiento para la realización de la simulación en Aspen V9	119
Anexo D. Descripción técnica de Arduino	121
Anexo E. Ficha técnica sensor ys-201	124
Anexo F. Calibración y códigos de programación de los sensores	129
Anexo G. Ficha técnica anemómetro	135
Anexo H. Paso a paso para la toma de muestras	137
Anexo I. Resultados obtenidos en mejores muestras	139
Anexo J. Resultados obtenidos agua amoniaca, dato más alto	140
Anexo K. Resultados obtenidos agua amoniaca, dato más bajo	141
Anexo L. Modelamiento de condiciones de operación de compuestos absorbentes	142
Anexo M. Matriz de selección paso a paso	153
Anexo N. Cálculo ácido sulfúrico teórico adecuado para el plato teórico	157
Anexo O. Ficha de seguridad ácido sulfúrico	160
Anexo P. Ficha de seguridad sulfato de amonio	162
Anexo Q. Resultados estudios previos	168
Anexo R. Uso de las eficiencias de Murphree para un absorbedor	169

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Balance global de materia	86
Ecuación 2. Balance de masa por componente	86
Ecuación 3. Caracterización de la corriente L_{n+1} desorción	87
Ecuación 4. Caracterización de la corriente V_{n-1} desorción	87
Ecuación 5. Caracterización de la corriente L_n desorción	87
Ecuación 6. Balance global de materia para V_n desorción	88
Ecuación 7. Balance de masa por componente de amoniaco para desorción	88
Ecuación 8. Flujo masico a molar	90
Ecuación 9. Relación de flujos de amoniaco y ácido sulfúrico	90
Ecuación 10. Tasa mínima de humectación	93
Ecuación 11. Relación H_{tu} y H_{tp}	94
Ecuación 12. Velocidad de la masa de aire	94
Ecuación 13. Relación de la columna	94
Ecuación 14. Sección transversal	94
Ecuación 15. Área del circulo	95
Ecuación 16. Eficiencia de platos	97
Ecuación 17. Cálculo de la altura de la torre	97
Ecuación 18. Costos generados por bomba	99
Ecuación 19. Costos generados por maquinarias para lavado	100
Ecuación 20. Costos de ácido sulfúrico	101
Ecuación 21. Cálculo de costo hora del operario	101
Ecuación 22. Total, de reactivos, operario y energía	102

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema demostrativo del control de Shewhart	32
Figura 2. Esquema de proceso en el capítulo 2	39
Figura 3. Diagrama de cuerpo de horno	40
Figura 4. Balance global para el proceso de remoción por arrastre de aire	44
Figura 5. Flujos utilizados en la experimentación	55
Figura 6. Esquema ilustrativo para el prototipo de la torre de desorción	57
Figura 7. Esquema ilustrativo de nitruración junto con la desorción y absorción	59
Figura 8. Flujos de aire utilizados en la experimentación	60
Figura 9. Esquema de proceso en el capítulo 3	64
Figura 10. Eficiencia global de diferentes platos, función de densidad y vapor	73
Figura 11. Protocolo de experimentación por cada muestra	77
Figura 12. Flujos de aire para las concentraciones con repetibilidad	78
Figura 13. Diagrama de flujo de titulación	79
Figura 14. Determinación de la concentración de sulfato de amonio	80
Figura 15. Corrientes involucradas en el proceso de absorción	82
Figura 16. Esquema balance global	85

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Grafica 1. Grafica de control de Shewhart para los años 2018 – 2019	47
Grafica 2. Fracción de NH_3 en aire comparada con altura	50
Grafica 3. Recuperación de NH_3 comparada con altura	51
Grafica 4. Temperatura comparado con la Energía libre de Gibbs	68
Grafica 5. Calor de formación para cada una de las reacciones	69
Grafica 6. Diagrama de equilibrio, sistema NH_3 -agua	91
Grafica 7. Platos teóricos	96

LISTA DE REACCIONES

	pág.
Reacción 1. Amoniaco libre	28
Reacción 2. Amoniaco adherido a la aleación	28
Reacción 3. Nitrógeno libre	29
Reacción 4. Reacción para producir sulfato de amonio	65
Reacción 5. Reacción para producir cloruro de amonio	67
Reacción 6. Reacción para producir Nitrato de amonio	67

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Sustancias generadoras de olores ofensivos con sus umbrales	30
Tabla 2. Resultados de análisis químico de muestra de agua residual	42
Tabla 3. Resultados de estudios previos, torre empacada vs micro burbujeo	42
Tabla 4. Resultados físicos para la torre de desorción	45
Tabla 5. Parámetros en normas	45
Tabla 6. Resultados de estudios previos 1100 mg/L en Aspen	49
Tabla 7. Resultados de estudios previos 1129 mg/L en Aspen	49
Tabla 8. pH vs muestra	61
Tabla 9. Resultados proceso de desorción	62
Tabla 10. Energía libre de Gibbs para sulfato de amonio	66
Tabla 11. Resultados a diferentes temperaturas sulfato de amonio	66
Tabla 12. Resultados a diferentes temperaturas cloruro de amonio	67
Tabla 13. Resultados a diferentes temperaturas nitrato de amonio	68
Tabla 14. Evaluación de las alternativas consideradas	71
Tabla 15. Valores razonables de pérdida de presión	74
Tabla 16. Resultados experimentales	84
Tabla 17. Valores obtenidos en V_n por compuesto desorción	88
Tabla 18. Flujos estequiométricos	89
Tabla 19. Valores obtenidos para V_n por compuesto absorción	90
Tabla 20. Valores iniciales para el diseño	93
Tabla 21. Resumen de las dimensiones de la torre	98
Tabla 22. Costo generado por bombas y equipos	99
Tabla 23. Costos generados por los equipos	100
Tabla 24. Salario del operario	101
Tabla 25. Costos generados por la columna de desorción	102
Tabla 26. Costos generados por la columna de absorción	104
Tabla 27. Costos de operación y fabricación	105

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Aluica S.A.S. ubicación geográfica	27
Imagen 2. Esquema ilustrativo del sistema desorción – absorción	32
Imagen 3. Esquema del proceso desarrollado en Aspen Plus	48
Imagen 4. Comparación, aspersion de líquido actual vs anterior	52
Imagen 5. Esquema relación diámetro altura actual vs anterior	53
Imagen 6. Sistema de aspersion de aire actual	53
Imagen 7. Generación de burbujas	56
Imagen 8. Prototipo a escala laboratorio columna de desorción	58
Imagen 9. Prototipo de columna de absorción	76
Imagen 10. Conexión del sistema desorción – absorción parte frontal	81
Imagen 11. Conexión del sistema desorción – absorción parte posterior	81

LISTA DE SIGLAS

L_{n+1} , Flujo volumétrico de la corriente líquida de entrada.

V_{n-1} , Flujo volumétrico de la corriente gaseosa de entrada.

L_n , Flujo volumétrico de la corriente líquida de salida.

V_n , Flujo volumétrico de la corriente gaseosa de salida.

X_{n+1} , Fracción molar de la corriente líquida de entrada

X_n , Fracción molar de la corriente líquida de salida.

Y_{n-1} , Fracción molar de la corriente gaseosa de entrada

Y_n , Fracción molar de la corriente gaseosa de salida.

ΔH , Cambio de entalpía.

n_i , Número de moles.

H_i , Entalpía de formación.

L , Velocidad másica del aire.

a , Superficie específica del empaque.

d , Diámetro.

HTU , Altura de la unidad de transferencia.

$HETP$, Altura equivalente a un plato teórico.

ST , Sección transversal.

r , Radio.

E , Eficiencia de plato.

T° , Temperatura.

GLOSARIO

ABSORCIÓN: operación unitaria de transferencia de materia que consiste en poner en contacto un gas con un líquido, para que este se disuelva determinados componentes del gas, dejándolo libre de los mismos.¹

DESORCIÓN: operación unitaria donde un gas disuelto en un líquido es arrastrado por un gas inerte, siendo eliminado del líquido.²

ELECTRE: permite evaluar las ventajas y desventajas relativas entre las alternativas en cada criterio y jerarquizarlas en un orden de preferencias, de la mejor a la peor.³

EXPERIMENTO: procedimiento mediante el cual se trata de comprobar (confirmar o verificar) una o varias hipótesis relacionadas con un determinado fenómeno, mediante la manipulación y el estudio de las correlaciones de las variables que presumiblemente son su causa.⁴

HEURÍSTICA: conjunto de técnicas, procedimientos o métodos para el desarrollo de una problemática, entre las cuales se encuentran principios, reglas y estrategias; todas para la solución de problemas a partir de la experiencia.

ION: es considerada una partícula cargada eléctricamente constituida por un átomo o molécula que no es eléctricamente neutro. Se entiende que, a partir de un estado neutro de un átomo o molécula, se han ganado o perdido electrones.⁵

MATRIZ: es considerado, para las matemáticas, un arreglo bidimensional de números. Este puede llegar a ser definido para la suma como el producto de matrices. Una matriz se representa por medio de una letra mayúscula (A, B, ...) y

¹ FERNANDEZ, German. Operación unitaria de absorción y desorción. Disponible en: <http://www.industriaquimica.net/absorcion-y-desorcion.html>.

² FERNANDEZ, German. Operación unitaria de absorción y desorción. Disponible en: <http://www.industriaquimica.net/absorcion-y-desorcion.html>.

³ ARCE MEDINA, Enrique. Diseño de Procesos - Unidad 2a El método ELECTRE. [1]. [Consultado el Apr 15, 2019]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/procesosesiqie/modulos-del-curso/modulos-del-curso-2/unidad-2a-el-metodo-electre>

⁴ Griffith, W. Thomas (2001). The physics of everyday phenomena : a conceptual introduction to physics (3rd edición). Boston: McGraw-Hill. pp. 3-4. ISBN 0-07-232837-1.

⁵ Atkins, Peter; de Paula, Julio (2009). Elements of Physical Chemistry (en inglés) (quinta edición). Nueva York: Oxford University Press. ISBN 978-0-19-922672-6.

sus elementos con la misma letra en minúscula (a, b, ...), con un doble subíndice donde el primero indica la fila y el segundo la columna a la que pertenece.⁶

MÉTODO KEPNER-TREGOE: trabaja como una metodología de estructura para obtener, priorizar y evaluar información, su principal objetivo no es encontrar una solución perfecta, sino la mejor opción posible, logrando el resultado con las mínimas consecuencias negativas.

MEZCLA: es un tipo de material formado por dos o más componentes unidos, pero no combinados químicamente. En una mezcla no ocurre una reacción química y cada uno de sus componentes mantiene su identidad y propiedades químicas; algunas mezclas pueden ser reactivas, es decir, que sus componentes pueden reaccionar entre sí en determinadas condiciones ambientales, como una mezcla aire-combustible en un motor de combustión interna.⁷

MICROBURBUJA: burbuja fina definida como una cavidad llena de gas suspendida en un medio líquido que tiene un diámetro entre 10 a 50 μm , tamaño menor a las burbujas convencionales.⁸

NITRURACIÓN: tratamiento termoquímico que se le da al acero. El proceso modifica su composición añadiendo nitrógeno mientras es calentado. El resultado es un incremento de la dureza superficial de las piezas.⁹

NORMATIVIDAD: la normatividad es un conjunto de leyes o reglamentos que rigen conductas y procedimientos según los criterios y lineamientos de una institución u organización privada o estatal.¹⁰

PH: medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones de hidrógeno presentes en determinadas disoluciones. La sigla significa potencial de hidrógeno o potencial de hidrogeniones. El significado exacto de la p

⁶ Tony Crilly (2011). 50 cosas que hay que saber sobre matemáticas. Ed. Ariel. ISBN 978-987-1496-09-9.

⁷ Saldaña, Juan Gabriel Barbosa; Torres, Claudia del Carmen Gutiérrez; Bernal, José Alfredo Jiménez (8 de octubre de 2015). Termodinámica para Ingenieros. Grupo Editorial Patria. ISBN 9786077442707.

⁸ BERKUM, Erik. Diferentes tamaños de burbujas y por qué es importante para las propiedades. [0]. Disponible en: <https://www.acniti.com/es/tecnolog%C3%ADa/que-son-burbujas/>

⁹ Millán Gómez, Simón (2006). Procedimientos de Mecanizado. Madrid: Editorial Paraninfo. ISBN 84-9732-428-5.

¹⁰ Normatividad, [consultado el 19/6/19] Disponible en: <https://www.significados.com/normatividad/>

en «pH» no está claro, pero, de acuerdo con la Fundación Carlsberg, significa «poder de hidrógeno».¹¹

REACCIÓN: todo proceso termodinámico en el cual dos o más sustancias (llamadas reactantes o reactivos), se transforman, cambiando su estructura molecular y sus enlaces, en otras sustancias llamadas productos. Los reactantes pueden ser elementos o compuestos.¹²

REPETIBILIDAD: referida como la variación del equipo, corresponde a la variación de los resultados de varias mediciones obtenidas con un sistema de medición cuando se usa varias veces por un usuario, midiendo la misma característica y sobre la misma pieza.¹³

REPRODUCIBILIDAD: variación en el promedio de las mediciones hechas por diferentes evaluadores usando el mismo sistema de medición cuando se mide la misma característica y sobre la misma pieza.¹⁴

TITULACIÓN: procedimiento analítico, que tiene como objetivo determinar la concentración de un compuesto añadiendo contenido de un líquido con compuesto conocido, esto con el fin de saturar o cambiar su composición.

TOCHES: resultado obtenido después de realizar la respectiva fundición de un metal no ferroso después de ser colocado en un molde para la obtención de una figura específica, también llamados lingotes.

¹¹ López, Raymond Chang, Kenneth A. Goldsby ; revisión técnica, Rodolfo Álvarez Manzo, Silvia Ponce (2013). Química (11a. ed. edición). México; Madrid [etc.]: MacGraw-Hill. ISBN 978-607-15-0928-4.

¹² Regalado, Víctor Manuel Ramírez (2016). Química 1. Grupo Editorial Patria. ISBN 9786077444640.

¹³ Infas Control. Repetibilidad y reproducibilidad. [0]:2018.

¹⁴ Infas Control. Repetibilidad y reproducibilidad. [0]:2018.

RESUMEN

La empresa Aluica S.A.S., ubicada en Mosquera Cundinamarca, elabora y comercializa productos extruidos en aluminio para el área industrial y arquitectónica. El proceso de producción central es la extrusión, donde una barra cilíndrica de aluminio es convertida en un producto extruido al hacerla pasar por una matriz o molde que contiene la geometría del perfil. Un proceso complementario es la nitruración, la cual permite aumentar la dureza superficial y mejorar las propiedades mecánicas como la resistencia al desgaste, fricción, abrasión, agarrotamiento y fatiga de las matrices¹⁵. Este es un procedimiento termoquímico desarrollado mediante el calentamiento de las matrices en una atmósfera de amoníaco¹⁶.

Dentro del proceso de nitruración el uso de agua es indispensable para mantener las condiciones de operación ideales y uniformes internamente en el equipo; a la salida del proceso se obtiene agua residual que es vertida directamente al alcantarillado, este residuo al estar contaminada con amoníaco puede generar un problema ambiental. Además, la empresa al no poder desarrollar el proceso de nitruración internamente genera un problema económico.

La empresa realizó en el año 2018 un estudio previo donde se diagnosticó el proceso de nitruración y la caracterización fisicoquímica del agua residual, determinando que el agua se encontraba con pH de 10.62 y temperatura de salida de 40.4°C fuera de los rangos permisibles establecidos por las entidades ambientales, y además contenía una concentración de amoníaco de 1330 mg/L , valor superior al establecido al promedio mundial¹⁷. Con estos resultados se consideraron diferentes métodos de tratamiento de agua mediante una matriz de selección donde se evaluaron diferentes criterios técnicos, económicos y ambientales determinando que la opción apropiada para Aluica S.A.S. corresponde a la “Remoción de amoníaco por arrastre de aire” y experimentalmente determinando que el diseño conveniente corresponde a una Torre empacada con anillos Pall y micro burbujeo”.

¹⁵ Bilbaina de tratamientos. Nitruración: Antidesgaste y anticorrosión sin deformación; [0]. [Consultado el 21/10/2017]. Disponible en: <http://biltra.es/>

¹⁶ VTN. Vacío y Termoquímica Navarra (VTN). [0]. [Consultado el 07/10/2017]. Disponible en: <http://www.vtn.es/tratamientos-termoquimicos/>

¹⁷ Universidad de los andes. Concentraciones de referencia para los vertimientos industriales realizados a la red de alcantarillado y de los vertimientos industriales y domesticos efectuados a cuerpos de agua de la ciudad de bogota. [0]:2019. 442-443 ISBN 1515-1786.

De esta manera, este proyecto tiene como fin evaluar un sistema desorción – absorción para el tratamiento del agua residual en el proceso de nitruración, donde se establecerán las condiciones y parámetros de operación cumpliendo normativas, así como sus costos de fabricación y costos operacionales, pasando de un escalado de laboratorio a escala planta mediante métodos numéricos y programación acompañado con experimentación directa, con su respectiva repetibilidad, en el proceso de nitruración. El método consiste en una torre de desorción empacada para un sistema aire – agua amoniacal, acompañado con una torre de absorción empacada para un sistema aire amoniacal - ácido sulfúrico, con el fin de generar sulfato de amonio como subproducto para su venta, acompañado con el tratamiento de agua residual, incurriendo en ahorros económicos, reforzar la responsabilidad ambiental y beneficio en seguridad industrial; realizados los protocolos adecuados y los electre de las mejoras previstas, se obtuvo como rendimiento un 56.07% de remoción de amoniaco para desorción, y unos resultados de reacción por absorción completa del gas residual con el absorbente seleccionado, en este caso ácido sulfúrico; como dimensionamiento básico, a partir de heurísticas y resultados de los experimentos, se obtuvo una altura de 1.995 metros y un diámetro de 0.333 metros para la torre de desorción, además unos valores de 1.75 metros de altura con 7 platos y un diámetro de 0.33 metros para el sistema de absorción.

Palabras clave: Absorción, Desorción, Remoción, Tratamiento de agua, Amoniaco, Aluica S.A.S.

INTRODUCCIÓN

La empresa Aluica S.A.S., anteriormente conocida como Aceros y Aluminios Cía. S.A.S., actualmente ubicada en el municipio de Mosquera - Cundinamarca, fabrica y comercializa productos en aluminio para la industria y arquitectura. El proceso principal es la extrusión, donde una barra cilíndrica es convertida en un producto extruido al pasar por una matriz o molde, que contiene la geometría del perfil¹⁸.

Uno de los procesos complementarios a la extrusión es la nitruración; este es un método termoquímico encargado del endurecimiento de las matrices o moldes de acero tipo H13, además permite aumentar la resistencia y disminuir el desgaste al momento de realizar esfuerzo en el proceso de extrusión; este proceso se realiza incorporando nitrógeno a la superficie¹⁹, obtenido mediante el calentamiento de una atmósfera de amoníaco; el amoníaco es un gran contaminante y más si es vertido al acueducto, este es capaz de afectar acuíferos y seres vivientes en ella como peces, musgos, crustáceos, aves, entre otros²⁰; además puede afectar el aire si no se controlan las emisiones a la atmósfera.

De un estudio previo realizado en la empresa ALUICA S.A.S sobre el tema, se concluyó que el agua residual del proceso de nitruración reporta un contenido de Nitrógeno Amoniacal de hasta 1330 mg/L el cual es elevado, por ello puede generar corrosión en diferentes puntos del proceso; así mismo cuenta con un pH promedio de 10.2 el cual es fuertemente alcalino y una temperatura promedio de 40.2°C lo cual incumple con los estándares planteados en el Resolución 631 de 2015. Debido a las condiciones del agua residual del proceso interno; en el año 2017 fue necesario desarrollar la nitruración en una empresa externa enviando 6709 kilogramos a nitrurar a la empresa Ferrotermicos, este proceso generó un costo anual de \$65´748.866 (COP), obteniendo un valor de \$ 9800 pesos (COP) por kilogramo de matriz nitrurada, sin embargo desde el 19 de Enero de 2018 se reanudó el proceso de nitruración dentro de la empresa, lo que arrojó un balance de

¹⁸ACEROS Y ALUMINIOS CIA., [en línea]. Febrero - diciembre, 2014 [Consultado 20 de febrero de 2019]. Disponible en Internet: <https://aluica.com.co/nosotros/>

¹⁹ Federación de enseñanza de CC. OO de Andalucía et al. Tratamientos termoquímicos [en línea]. En: Temas para la Educación. 14 de mayo 2011, no. 45, p 6. [Consultado 15 de marzo de 2019]. Disponible en Internet: <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8426.pdf>

²⁰Folleto informativo [en línea]. En: Waterboards. [Consultado 14 de mayo de 2019]. Disponible en Internet:

https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3310sp.pdf

3322,7 kilogramos nitrurados por un costo de \$9'760.350 (COP), obteniendo un valor de \$ 2937 pesos (COP) por kilogramo de matriz nitrurada, generando una disminución del costo de hasta un 70% comparado con el año 2017. En ese estudio, se planteó una propuesta para la solución del problema la cual consiste en una torre de desorción empacada, donde por arrastre se retira el amoniaco del agua que pasa a una fase gaseosa (aire), así mismo con el fin de darle disposición a este gas se recomendó el desarrollo de una torre de absorción para la obtención de un subproducto seguro y de fácil manejo.

Con una sección de cinco capítulos, el proyecto definirá paso a paso el desarrollo de una evaluación de un sistema de desorción – absorción y el posible recirculamiento del agua obtenida del proceso de desorción al proceso de nitruración. El primer capítulo, muestra los conceptos generales que le permitirá al lector obtener información básica y relevante para la correcta interpretación del proyecto de investigación así como la contextualización del proceso para la comprensión de los detalles de producción y el proyecto, como su finalidad y lo que se desea obtener con el proyecto, el segundo capítulo se determinarán las condiciones y parámetros de operación de la torre de desorción adecuados para las exigencias de la empresa, en el tercer capítulo, se determinarán los parámetros y condiciones de operación de la torre de absorción, la evaluación de esta torre se realiza con el fin de darle una correcta disposición a las emisiones de la torre de desorción; el cuarto capítulo estará basado en los capítulos anteriores en este se realizará un dimensionamiento básico de todo el sistema desorción - absorción incluyendo la recirculación de agua al proceso de nitruración y se establecerá la ficha de seguridad para el producto de la salida de la torre de absorción, como quinto capítulo se hará una comparación financiera entre la realización del proyecto interna y externamente.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar un sistema de desorción/absorción para el tratamiento de agua residual en el proceso de nitruración en la empresa Aluica S.A.S.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar una mejora del sistema de desorción planteado en estudios previos realizados por la empresa Aluica S.A.S.
- Determinar los parámetros y condiciones de operación adecuados de la torre de absorción a escala laboratorio dando disposición a los residuos de la torre de desorción.
- Establecer las condiciones técnicas del sistema desorción-absorción para el tratamiento de agua residual en el proceso de nitruración.
- Estimar los costos de operación y costos de fabricación del sistema desorción-absorción.

1. GENERALIDADES

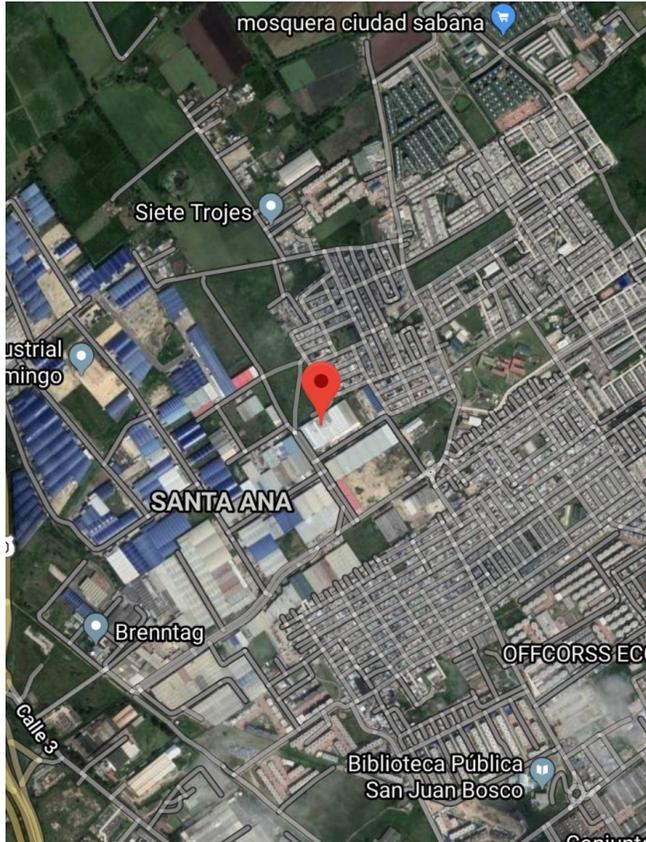
1.1 MARCO DE REFERENCIA.

Este capítulo tiene como fin dar un contexto al lector y crear un panorama para el correcto entendimiento del proyecto; la empresa Aluica S.A.S. cuenta con una problemática, la cual consiste en el vertimiento de agua amoniacal como sustancias químicas de forma incontrolada, es por esto que es considerado un desarrollo de sistema de tratamiento de aguas residuales, como complemento a procesos de producción, para esto se evaluarán y buscarán posibles soluciones, esta búsqueda facilitará el planteamiento y solución del proyecto, lo anterior se verá reflejado mediante el control de los parámetros de la Resolución 631 de 2015.

1.1.1 Descripción de la empresa Aluica S.A.S. La empresa Aluica S.A.S. elabora y comercializa productos extruidos en aluminio, actualmente se encuentra ubicada en el municipio de Mosquera, más específicamente en el Parque Industrial Montana, esta empresa cuenta con una experiencia de 30 años en la venta de materiales estructurales, industriales y arquitectónico, además de esto llevan 9 años en la producción de estos y posee entre su amplio portafolio los servicios de extrusión de aluminio como soluciones industriales.

Además de brindar un excelente servicio a la hora de satisfacer las necesidades del cliente, se preocupa por ser una empresa sostenible desde todos los puntos de vista, por esta razón se preocupa por mantener su impacto ambiental al mínimo y apoyar a los jóvenes estudiantes permitiendo el desarrollo de proyectos dentro de la empresa; en Aluica S.A.S. se desarrollan procesos de extrusión, proceso que utiliza moldes para elaboración de perfiles, actualmente el proceso de nitruración tiene deficiencias de operación y vertimiento de residuos, es por esto que se entra a examinar su vertimiento y cumplimiento con la normatividad legal vigente.

Imagen 1. Aluica S.A.S. ubicación geográfica.



Fuente. Google. (s.f.). [Mapa de Mosquera, Colombia en Google maps]. Recuperado el 31 de Enero, 2020, disponible en: <https://goo.gl/maps/mTWpSJoW7uaWjuB8>

1.1.2 La nitruración. Se trata de un tratamiento térmico que aumenta la dureza superficial²¹, en este caso se desea aumentar la dureza superficial de los tochos, matrices o moldes; este proceso utiliza la incorporación de nitrógeno en la composición de la superficie de la pieza. Se logra calentando la matriz o molde a temperaturas comprendidas entre 400°C y 525°C aproximadamente, dentro de una corriente de gas de amoníaco, más nitrógeno.²² La nitruración se aplica principalmente a piezas que son sometidas regularmente a grandes fuerzas de rozamiento y de carga, tales como pistas de rodamientos, camisas de cilindros, etc. Estas aplicaciones requieren que las piezas tengan un núcleo con cierta plasticidad, que absorba golpes y vibraciones; una superficie de gran dureza que resista la

²¹ federación de enseñanza. TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS. En: REVISTA DIGITAL PARA PROFESIONALES DE LA ENSEÑANZA. Mayo 14, 2017.

²² federación de enseñanza. TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS. En: REVISTA DIGITAL PARA PROFESIONALES DE LA ENSEÑANZA. Mayo 14, 2017.

fricción y el desgaste. Las piezas que se hayan pasado por un proceso de nitruración se pueden usar en trabajos con temperaturas de hasta 500°C (temperatura de nitruración), temperatura a la cual el nitrógeno comienza a escaparse de la pieza, eliminando los efectos de la nitruración y disminuyendo la dureza de la pieza²³.

Los métodos más comunes para desarrollar la nitruración son la nitruración en baños de sales, la nitruración gaseosa y la nitruración por plasma.²⁴ Se estudiará el método gaseoso debido a que este es el utilizado en la empresa. La nitruración se lleva a cabo a temperatura de 500 – 570 °C y a presión atmosférica mediante nitrógeno amoniacal procedente de la descomposición de combinaciones nitrogenadas. La nitruración por amoniaco se produce en tres etapas²⁵:

La primera etapa consiste en la disociación térmica de amoniaco.

Reacción 1. Amoniaco libre.



La segunda etapa constituida por la absorción del nitrógeno (encontrado en la reacción como “N”) por el Fe_x para formar primeramente solución sólida y después nitruro de hierro (Fe₄N); paso seguido se realiza la difusión del nitrógeno hacia el interior del acero. La reacción se interpreta como:

Reacción 2. Amoniaco adherido a la aleación.



Como último paso, tenemos el nitrógeno no absorbido, este inmediatamente pasa a molecular y pasa a ser absorbido en este caso por la corriente líquida de agua, en este punto ya no actúa como nitrurante²⁶.

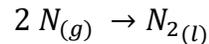
²³ federación de enseñanza. TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS. En: REVISTA DIGITAL PARA PROFESIONALES DE LA ENSEÑANZA. Mayo 14, 2017.

²⁴ GROOVER, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna. McGraw-Hill España, 2007. ISBN 9789701062401

²⁵ Universidad Tecnológica Nacional. Cátedra: Metalografía y Tratamientos Térmicos: Material didáctico. Argentina: Capítulo 13 Nitruración.

²⁶ Universidad Tecnológica Nacional. Cátedra: Metalografía y Tratamientos Térmicos: Material didáctico. Argentina: Capítulo 13 Nitruración

Reacción 3. Nitrógeno libre.



1.1.3 El amoniaco. La materia prima utilizada en el proceso de nitruración es el amoniaco, amonio o azano. En condiciones de temperatura y presión ambiente es un gas incoloro, sofocante, irritante y tóxico categorizado con clase de peligro 2.3 (gases tóxicos)²⁷ que pueden producir efectos críticos en medio cutáneo, ocular o de tracto respiratorio de manera aguda, crónica, o incluso hasta la muerte²⁸. El amoniaco es más liviano que el aire, higroscópico (capaz de absorber humedad del medio) y se disuelve fácilmente en agua.²⁹

Encontramos que el amoniaco se produce naturalmente por descomposición de la materia orgánica y también se fabrica industrialmente; es posible detectar corrientes de amoniaco a partir de tan solo 5ppm por olor, además es importante para este proyecto conocer que la solubilidad del amoniaco en agua incrementa con la disminución del pH y los productos de combustión son principalmente nitrógeno y agua.³⁰

El amoniaco reacciona violentamente con oxidante fuertes (peróxido de hidrógeno, ácido nítrico, bromato y clorato de potasio), ácidos, halógenos, sales de plata, zinc, oro, cobre y otros metales pesados y metales alcalinos. La adición de amoniaco al agua genera gran desprendimiento de calor.

Nota: en este trabajo no se tendrán en cuenta las características toxicológicas del amoniaco para cálculos, únicamente se considerarán sus características físicas y químicas.

1.1.4 Límites permisibles para amoniaco. El amoniaco se encuentra como una de las sustancias más controladas para su utilización, no solo por su peligrosidad, sino por el daño o reacciones que pueda generar en su entorno, es por eso que actualmente en Colombia existe una resolución, que habla sobre el tema; la resolución 601 de 2006, donde trata los niveles máximos permisibles para

²⁷ ICONTEC. Norma Técnica Colombiana NTC 1692: Transporte de mercancías peligrosas. Bogotá: 2005.

²⁸ Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades. Resumen de salud pública: Amoniaco. 2004.

²⁹ Instituto Nacional de seguridad e higiene en el trabajo. Amoniaco. 2011.

³⁰ IDEAM. AMONIACO p. 98-112

contaminantes no convencionales y umbrales para las principales sustancias generadoras de olores ofensivos; en la cual se encuentran las principales sustancias generadoras de olores ofensivos con sus respectivos umbrales.³¹

Tabla 1. Sustancias generadoras de olores ofensivos con sus umbrales.

Contaminante	Umbral	
	ppm(volumen)	µg/m ³
Acetaldehído (C ₂ H ₄ O)	0.21	380
Ácido Butírico (C ₄ H ₈ O ₂)	0.001	3.6
Amoniac (NH ₃)	0.05	14.5
Cloro fenol (C ₂ H ₅ ClO)	0.00003	0.1
Dicloruro de azufre (S ₂ Cl ₂)	0.001	5.5

Fuente. República de Colombia, Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial, Resolución 601 de 2006, por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia.

Adicionalmente, se encuentra que la NIOSH (Agencia responsable de recomendar normas de salud y seguridad ocupacional) posee una guía para sustancias químicas, llamada “NIOSH POCKET GUIDE TO CHEMICAL HAZARDS” poseedora de información de máximos permisibles para la salud sobre concentraciones de diferentes compuestos; en la NIOSH se recomienda para el amoniac un límite de exposición recomendado TWA (valor límite de umbral) de 25 ppm (18 mg/m³); adicional nos indica una concentración por promedio ponderado de tiempo de hasta 10 horas de una jornada de trabajo durante una semana laboral de 40 horas de TWA de 50 ppm (35 mg/m³); además un límite para un periodo de 15 minutos TWA de 35 ppm (27 mg/m³).³² En el Anexo A se encuentran dichos valores.

1.1.5 Graficas de control de Shewhart. Los gráficos para el control de productos industriales fueron desarrollados inicialmente por W. Shewhart en 1931, con el principal objetivo de investigar si un proceso se encuentra bajo control estadístico. El elemento clave en los gráficos de control es la muestra de control, que nos servirá para construir el gráfico y monitorizar el estado del procedimiento analítico.³³

³¹ Decreto 601 de 2006, calidad del aire o nivel de inmisión, para todo territorio nacional en condición de referencia

³² DHHS (NIOSH) Publication No. 2005-149, NIOSH POCKET GUIDE TO CHEMICAL HAZARDS, Third Printing – September 2007, with minor technical changes

³³ RIU, Jordi. Gráficos de control de Shewhart, Universitat Rovira i Virgili:

El Dr. Shewart define el control de procesos en dos fases. Fase de desarrollo, que ayuda a conocer el comportamiento estadístico del proceso, y permite determinar los límites de control para el estimador del parámetro analizado para esto se tiene que eliminar causas asignables si existiesen. fase de madurez, en la cual se mide la capacidad del proceso para cumplir con los estándares de calidad inicialmente propuestos, en general ayuda a reducir el tiempo o el número de muestras necesarias para detectar pequeños cambios en el proceso.³⁴

Un gráfico de control de Shewhart muestra La Línea Central la cual representa el valor medio de la característica bajo estudio. Las Líneas Superior e Inferior de Control son unos límites que, si son sobrepasados, indican que el proceso probablemente ha perdido su estabilidad estadística y está por tanto probablemente fuera de control. La consecuencia de esto es que es preciso llevar a cabo una investigación para descubrir la causa de esta perturbación y llevar a cabo acciones correctivas para eliminarla. Mientras estos límites no sean traspasados, se asume que el proceso está en control estadístico y no es preciso desarrollar acción correctiva alguna³⁵. También es utilizada para la obtención de información para la mejora del proceso y la estimación de parámetros del proceso de producción³⁶

Para detectar que una condición de un proceso está fuera de control estadístico, un procedimiento empírico es identificar en la gráfica si un punto cae fuera de los límites de control en 3 – sigma, dos de tres puntos consecutivos caen fuera de los límites en 2 – sigma, cuatro de cinco puntos consecutivos caen fuera de los límites en 1 – sigma si ocho puntos consecutivos de la gráfica están en el mismo lado de la línea central, estos aspectos generan la comprobación al proceso y muestran que se encuentra fuera de control³⁷.

A continuación, se muestra una figura de un gráfico de control de Shewhart³⁸, donde el cuadrado rojo muestra un solo punto fuera de los límites de control, el cuadrado verde muestra dos o tres puntos del límite dos sigmas, el morado cuatro o cinco puntos fuera del límite uno sigma y el cuadrado naranja seis seguidos en el mismo lado de la línea central.

³⁴ Kailean consultores. Los gráficos de control de Shewhart: principios básicos. [0]:2017

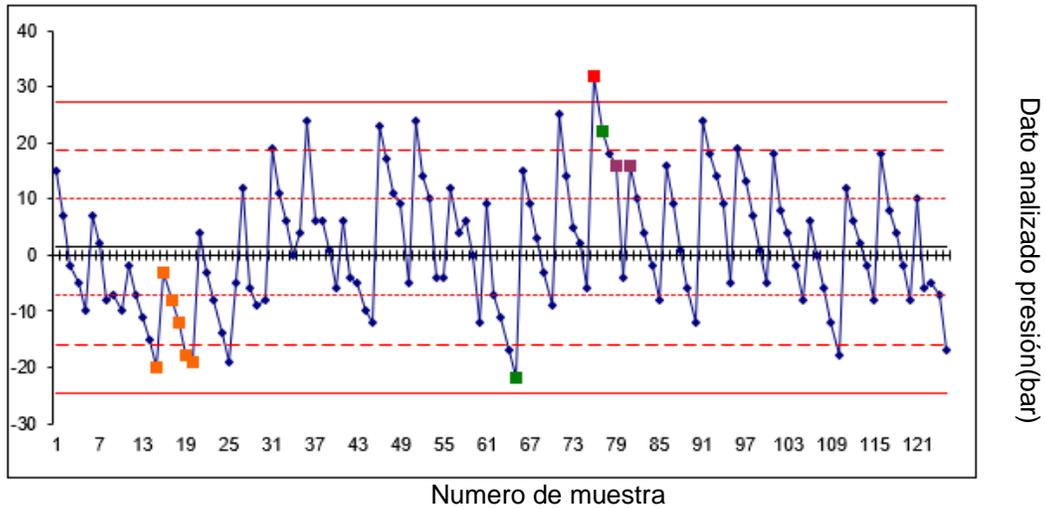
³⁵ Kailean consultores. Los gráficos de control de Shewhart: principios básicos. [0]:2017.

³⁶ HUERGA, Carmen; BLANCO, Pilar and GONZALEZ, Julio. Aplicación de los gráficos de control en el análisis de la calidad textil p. 125-148

³⁷ EPIFANIO, Irene. Tema 3: Control de calidad. [0]: España: 2018. 73-84

³⁸ SHERMAN, Peter. Quality progress [0]. [Consultado en agosto 23,2019]. Disponible en: <http://asq.org/quality-progress/2012/07/back-to-basics/volviendo-a-los-fundamentos-grficos-inteligentes.html>

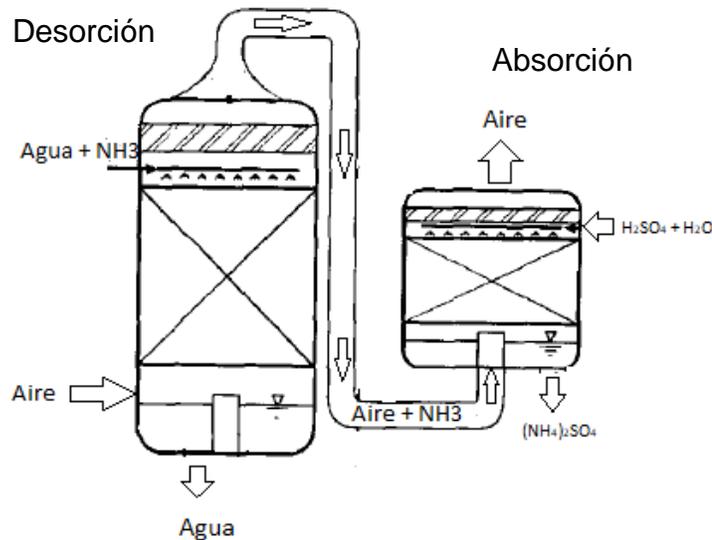
Figura 1. Esquema demostrativo del control de Shewhart.



Fuente. Recuperado el 10 de septiembre de 2019, Asq, excellence Through quality, Ilustración de un gráfico de control de proceso estadístico. En: <https://asq.org/quality-resources/control-chart> .

1.1.6 Sistema desorción – absorción. Con el fin de darle solución a la problemática de la empresa Aluica S.A.S. se plantea un sistema de remoción por arrastre de aire desorción y un sistema de captación de gas residual por absorción como se muestra a continuación:

Imagen 2. Esquema ilustrativo del sistema desorción – absorción.



Fuente: elaboración propia, con base en. SARACCO,G. and GENON,G. High temperatura armonía stripping and recovery from process liquid wastes. En: JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS. vol. 37, no. 1, p. 191-206

En la primera columna se puede evidenciar que se realizará el proceso de desorción, con el fin de arrastrar el amoníaco disuelto en el agua al aire, mientras que en la segunda torre se le dará correcta disposición al aire con contenido de amoníaco resultando de la primera torre. En los siguientes apartes se explicará en detalle el proceso de desorción y absorción.

1.1.6.1 Remoción de amoníaco por arrastre de aire. Es un proceso de desorción que se utiliza para reducir el contenido de amoníaco en una corriente de agua residual.³⁹ La torre de remoción se rige bajo un fenómeno de transferencia de masa donde el amoníaco es arrastrado del agua a una corriente de aire y liberado a la atmósfera, es decir, permite mover el contaminante de un medio a otro, pero no hay destrucción de contaminante, por ello, se debe evaluar el riesgo de emitir el contaminante al aire.⁴⁰

Basados en el estudio anterior se hará referencia a los dos sistemas más prometedores los cuales fueron torres empacadas y el sistema de aireación de burbuja.

1.1.6.2 Sistema de aireación mediante torres empacadas. Un sistema de aireada mediante columnas empacadas consiste en una columna cilíndrica, o torre, equipada con una entrada de gas y un espacio de distribución en la parte inferior; una entrada de líquido y un distribuidor en la parte superior; salidas para el gas y el líquido por la parte superior e inferior, respectivamente; además de una masa soportada de cuerpos sólidos inertes llamados empaques⁴¹, todo este sistema recibe el nombre de torre empacada, de esta forma es realizado el contacto con el líquido descendente y el aire ascendente que fluye a través de las mismas aberturas; la importancia del empaque radica en que proporciona una extensa área de contacto íntimo entre el gas y el líquido. Las torres empacadas pueden ser torres con rellenos aleatorios, rellenos que se introducen a la torre sin ningún orden; o torres con rellenos estructurados, rellenos que se apila en un arreglo ordenado.⁴²

³⁹ DE SILVA, Frank. Folletos Informativos de Tecnología de Aguas Residuales de la EPA: Extracción de Amoníaco por Arrastre de Aire. [Consultado abril 19 de 2019]. Disponible en: <https://www.estrucplan.com.ar/Producciones/imprimir.asp?IdEntrega=1875>

⁴⁰ BASAKCILARDAN, Sibel; IPEKOGLU, Nursen and TALINLI, Ilhan. Recovery of Ammonia from Human Urine by Stripping and Absorption. En: ENVIRONMENTAL ENGINEERING SCIENCE. p. 615-624

⁴¹ Operaciones Unitarias En Ingeniería Química, séptima edición, Warren L. McCabe, Julian C. Smith, Peter Harriot, McGraw Hill 2007

⁴² MOGOLLON, Bruno Alexis and DELGADO, Sergio Gonzalo. Estudio comparativo entre empaques aleatorios y estructurados en la operación unitaria de destilación. Universidad Nacional de Ingeniería, 2011.

1.1.6.3 Sistema de flotación por aire inducido. Son equipos que inyectan aire en forma de microburbujas a la entrada del proceso. Estas burbujas son generadas por un sistema doble de bombas de chorro y disco difusor-impulsor único. Este último tiene una serie de orificios finos en todo su perímetro para lograr una difusión de burbujas de aire ultrafinas, en tamaños entre 10 y 100 μm de diámetro. Tanto las bombas de chorro como el sistema de disco difusor-impulsor disponen de una facilidad que permite ajustar el volumen de aire y seleccionar el tamaño de las burbujas según las necesidades del proceso.⁴³

1.1.7 Absorción. La absorción puede considerarse como un proceso químico o físico. Una forma de absorción física implica transferir un componente de una corriente de gas a un líquido, utilizando un solvente⁴⁴. La absorción se utiliza para eliminar uno o varios componentes de una corriente gaseosa utilizando un disolvente. La absorción puede perseguir diversos objetivos; recuperar un componente gaseoso deseado y eliminar un componente gaseoso no deseado. Se puede tratar, por ejemplo, de la eliminación de una sustancia nociva de una corriente de gases residuales. Obtención de un líquido; un ejemplo sería la producción de ácido clorhídrico por absorción de HCl gaseoso en agua.

En la absorción participan por lo menos tres sustancias: el componente gaseoso a separar (absorbato), el gas portador y el disolvente (absorbente).⁴⁵

1.2 MARCO LEGAL

Con el fin de cumplir al máximo las expectativas que tiene la empresa, en términos de tesis, es necesario cumplir con las normas, leyes y diferentes resoluciones; estas determinan los parámetros correctos en Colombia para, en este caso, vertimiento de aguas residuales.

⁴³ Tecniaguas. Sistemas de flotación. [0]. [Consultado el agosto 25 de 2019]. Disponible en: <http://www.tecniaguas.com/index.php/es/productos-tecniaguas/item/sistemas-de-flotacion>

⁴⁴ Noyes, Robert. (1994). Unit Operations in Environmental Engineering - 6.1.1 Gas Stream Absorption. (pp. 265). William Andrew Publishing/Noyes. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt003V3U33/unit-operations-in-environmental/gas-stream-absorption>

⁴⁵Zúñiga Liliana, Valero Fernando, Maciel Diego, (2014) Química aplicada Absorción de gases. [Consultado agosto 19 de 2019] Disponible en: <https://es.slideshare.net/lilyzzz/absorcion-de-gases-1>

1.2.1 Decreto 3930 de 2010. “Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo 11 del Título VI-Parte 111 - Libro 11 del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones”.

Capítulo 6. De los vertimientos. Artículo 28. Fijación de la norma de vertimiento. El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial fijará los parámetros y los límites máximos permisibles de los vertimientos a las aguas superficiales, marinas, a los sistemas de alcantarillado público y al suelo. Artículo 33. Reubicación de instalaciones. Los usuarios que no dispongan de área apropiada para la construcción de sistemas de control de contaminación y/o que no cumplan con las normas de vertimiento, deberán reubicar sus instalaciones, cuando quiera que no puedan por otro medio garantizar la adecuada disposición de sus vertimientos.

Capítulo 9. Reglamentación de vertimientos. Artículo 65. Procedencia de la reglamentación de vertimientos. La autoridad ambiental competente con el fin de obtener un mejor control de la calidad de los cuerpos de agua, este se podrá reglamentar de oficio o a petición de parte, los vertimientos que se realicen en éstos, de acuerdo con los resultados obtenidos en el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico.⁴⁶

1.2.2 Resolución 631 de 2015. “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.”

Capítulo 7. Actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a las contempladas en los capítulos v y vi con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales. Artículo 15. Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas para las actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a las contempladas en los capítulos v y vi con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales.

Capítulo 8. Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas al alcantarillado

⁴⁶ Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, República de Colombia, Decreto N° 3930. 25 de octubre de 2010; [Consultado agosto 19 de 2019] disponible en: http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2010/dec_3930_2010.pdf

público. Artículo 16. Vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas al alcantarillado público. Capítulo 9. Disposiciones finales. Artículo 17. De la exclusión de parámetros de la caracterización.⁴⁷

1.2.3 Resolución 1207 de 2014. “Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas”.

Artículo 3°. Del reúso. Cuando el Usuario Receptor es el mismo Usuario Generador, se requerirá efectuar la modificación de la Concesión de Aguas, de la Licencia Ambiental o del Plan de Manejo Ambiental cuando estos instrumentos incluyan la Concesión de Aguas.

Artículo 5°. Del balance de materia o de masa. Tanto el Usuario Generador como el Usuario Receptor deberán entregar a la Autoridad Ambiental competente los respectivos balances de materia o de masa en términos de las cantidades de agua en su sistema, en el marco del trámite de la Concesión de Aguas y/o del Permiso de Vertimientos.

Artículo 9°. De las obras. La construcción, operación, mantenimiento y protección de las obras que se requieran para el desarrollo de las actividades de reúso desde el punto de entrega de las aguas residuales tratadas cumpliendo con el criterio de calidad, son responsabilidad del Usuario Receptor y deberán contar con los permisos y autorizaciones a que haya lugar.

Todo esto con el fin de fijar los criterios básicos y requisitos mínimos que deben reunir los diferentes procesos involucrados en la conceptualización, el proceso, la construcción, la supervisión técnica, la puesta en marcha, la operación y el mantenimiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales que se desarrollen en la República de Colombia, con el fin de garantizar su seguridad, durabilidad, funcionalidad, calidad, eficiencia, sostenibilidad y redundancia dentro de un nivel de complejidad determinado.⁴⁸

⁴⁷ Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible República de Colombia, Decreto N° 631. 18 de abril de 2.015; [Consultado agosto 19 de 2019] disponible en: https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R_MADS_0631_2015.pdf

⁴⁸ Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible República de Colombia, Decreto N° 1207. 13 de agosto de 2.014; [Consultado agosto 19 de 2019] disponible en: http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_1207_2014.pdf

1.2.4 Resolución 601 de 2006. “Por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia.”⁴⁹

Artículo 5. Niveles Máximos Permisibles para Contaminantes No Convencionales y Umbrales para las Principales Sustancias Generadoras de Olores Ofensivos: establecen los niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos carcinogénicos, y los umbrales para las principales sustancias generadoras de olores ofensivos.⁵⁰

⁴⁹ URIBE BOTERO, Beatriz. Intervención Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. En: REVISTA DE INGENIERÍA. Dec 1, no. 35, p. 52-54

⁵⁰ URIBE BOTERO, Beatriz. Intervención Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. En: REVISTA DE INGENIERÍA. Dec 1, no. 35, p. 52-54

2. SISTEMA DE DESORCIÓN

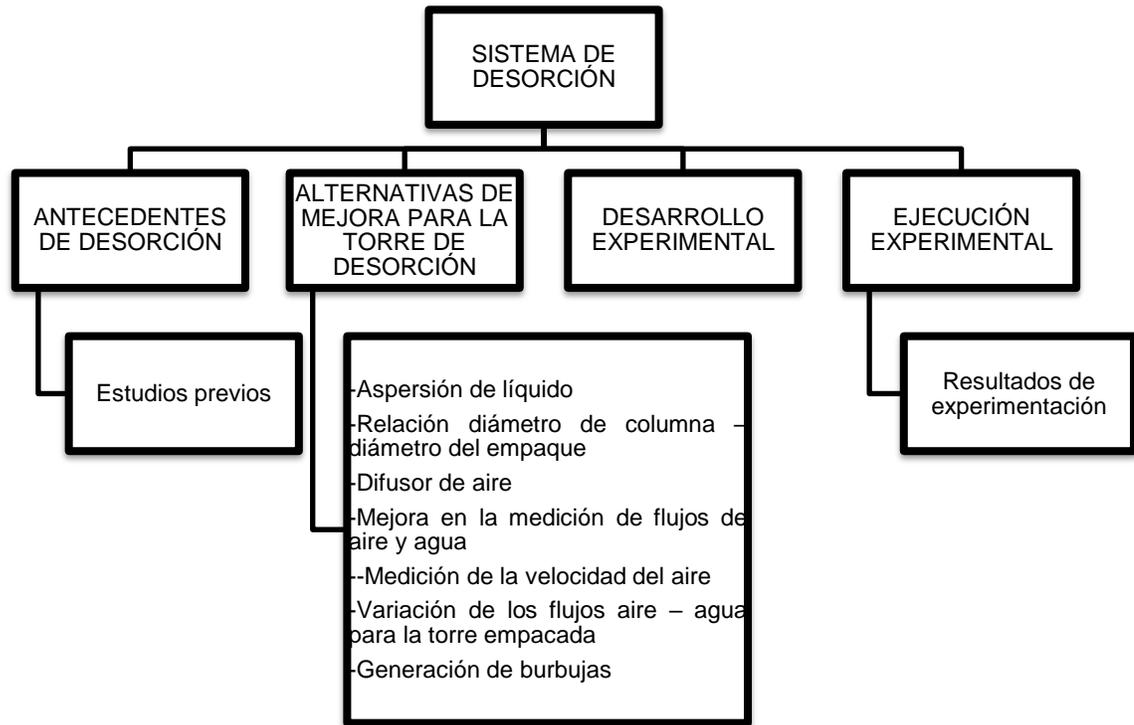
Se plantea un sistema de desorción cumpliendo la correcta disposición al agua residual del proceso de nitruración de la empresa Aluica S.A.S., la desorción es un proceso de transferencia de masa en el que un soluto en agua se transfiere a la solución en un gas, generalmente aire. La remoción por arrastre de aire es una tecnología de tratamiento rentable común para eliminar o reducir la concentración de productos químicos orgánicos en el agua subterránea⁵¹, especialmente los compuestos orgánicos volátiles. El agua se mezcla con aire en una cámara o torre llena de material de embalaje que dispersa el agua para mejorar el contacto con el aire.⁵² Para el sistema de desorción planteado en este proyecto se utilizará una torre empacada con anillos Pall de 1 ½ in esto debido a que este tipo de empaque fue el más apropiado en un estudio previo realizado por la empresa, en esta torre se hará fluir el agua residual del proceso de nitruración por una ducha la cual dispersara el líquido en la torre desde la parte superior hasta la parte inferior, mientras que el aire se hará pasar por una cámara de acrílico con varios orificios de un diámetro de 1/16" desde el fondo de la torre hasta la cima. En el fondo y en la cima se encuentran orificios donde el agua y el aire serán evacuados respectivamente.

En la siguiente figura se muestra un resumen del procedimiento que se realizara en este capítulo.

⁵¹ Garcia sarmiento, Choque Ismodes, Curiñaupa cruz, Quispe Delgado, Muñoz flores. Desorcion, [consultado agosto 27, 2019] Disponible en:<https://es.scribd.com/document/356325280/Desorcion>

⁵² Poehls, D.J. Smith, Gregory J.. (2009). Encyclopedic Dictionary of Hydrogeology - Air stripping. Elsevier. [Consultado agosto 27 de 2019] Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00CCP1P5/encyclopedic-dictionary/air-stripping>

Figura 2. Esquema de proceso en el capítulo 2.



Fuente: elaboración propia.

2.1 ANTECEDENTES DE DESORCIÓN

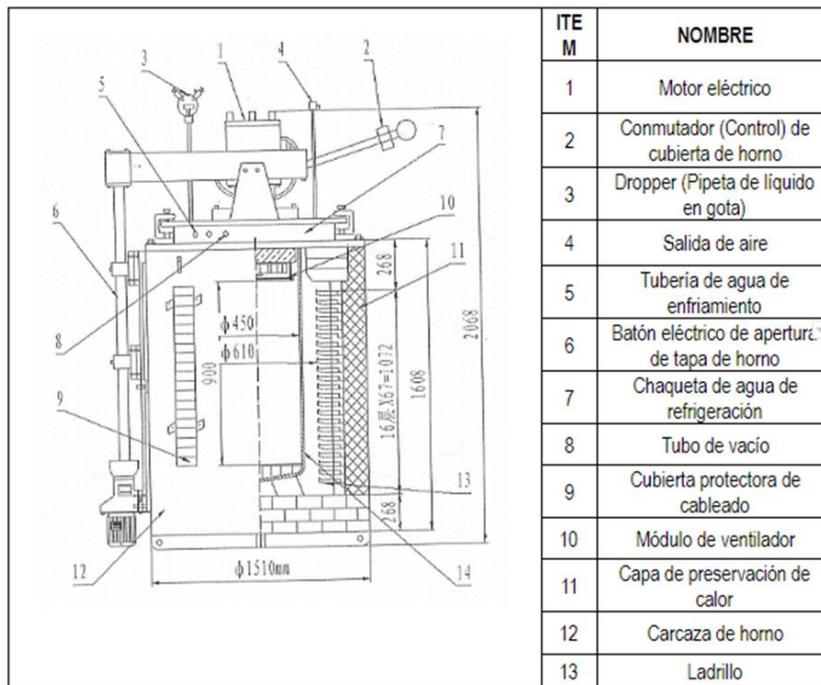
En Aluica S.A.S. están interesados en solucionar la problemática existente, es por esto que fueron realizados estudios previos; con el fin de demostrar su veracidad se decide por la comprobación a partir de simuladores de estos mismos estudios, además se muestran antecedentes de producción los cuales se explicarán en los siguientes subtítulos.

2.1.1 Nitruración en la empresa ALUICA S.A.S. El proceso de nitruración en la empresa Aluica S.A.S. se lleva a cabo en un Horno de retorta al vacío de acero inoxidable. El horno tiene como componentes principales una caja como horno, tapa de horno, elementos de calefacción, sistema de vacío, sistema de admisión de aire, sistema de control de temperatura, sistema de refrigeración, en la figura 2 se muestra el diagrama de cuerpo de horno y sus partes.⁵³

⁵³ Fernández Juan, et al. Propuesta para el sistema de tratamiento de agua residual del proceso de nitruración en la empresa Aluica [en línea]. En: Fundación Universidad de América. Diciembre, 2018, [Consultado 20 de diciembre de 2018]

Las dimensiones de este horno consisten en 2m de largo, 1.95m de ancho y 2.25m de alto, donde el tamaño de trabajo presenta una forma cilíndrica con un diámetro (ϕ) de 0.5m y una altura de 0.8m. Su potencia nominal es de 40kW, mientras que el voltaje nominal es de 220V/60Hz. El horno permite obtener hasta un vacío de -0.08 MPa y además cuenta con 2 zonas de control de temperatura ofreciendo una uniformidad de $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Actualmente el efluente o salida del proceso de nitruración es constituido por un contenido de nitrógeno amoniacal elevado, este contenido es capaz de afectar la vida acuífera y los operarios o seres que tengan una exposición prolongada al mismo, de acuerdo con las normas mencionadas anteriormente; por tal razón no es conveniente verterlo al alcantarillado, ni emitirlo a la atmosfera.

Figura 3. Diagrama de cuerpo de horno.



Fuente. Datos suministrados por la empresa Aluica S.A.S.

Como paso previo a la nitruración se debe hacer una limpieza a cada una de las matrices, eliminando manchas de óxido, eliminación de restos de aluminio, aceite y cualquier tipo de suciedad, este proceso se hace para alrededor de 9 matrices o 78 kilogramos por lote nitrurado como promedio, después de esto se comienza el proceso de nitruración, con la acomodación de las matrices en una canasta vertical, la cual se ingresa al horno. Allí se inicia el proceso de encendido de la fuente de energía, calentamiento de horno, generación de vacío, ingreso de amoníaco y refrigeración de agua, seguido de esto ocurre la nitruración, pasado el tiempo

correspondiente, se apagan las fuentes de energía, ventilación, refrigeración y demás, dejando que las matrices se enfríen hasta la temperatura ambiente.

2.1.2 Historia de la nitruración en la empresa ALUICA S.A.S. En el año 2014 se adquiere el horno de retorta al vacío de acero inoxidable de segunda con el fin de realizar la nitruración en la empresa y aumentar la vida útil de los moldes o matrices, estos moldes o matrices se ingresan para nitrurar dentro de este horno; desde este año se tienen registros digitales del proceso donde se tienen datos del consumo de agua, energía, amoniaco y matrices nitruradas por proceso, esto con el fin de tener control sobre el proceso y poder obtener la rentabilidad de este. Entre el año 2014 y 2015 se llevan a cabo 128 procesos de nitruración, sin embargo, en el año 2016 se detiene este proceso y se procede a realizar la nitruración por un tercero como la empresa Ferrotermicos, esto a causa de la detección de valores no permitidos según lo establecido en la Resolución 631 de 2015, lo cual generó costos elevados.

Para el año 2018 se reanuda el proceso de nitruración dentro de la empresa, donde del 19 de enero de 2018 al 3 de diciembre de 2018 se realizaron 44 nitruraciones y para el 28 de febrero de 2019 se realizaron 19 nitruraciones todas por un costo menos al ofrecido por Ferro térmicos.

2.1.3 Estudios previos. En la empresa Aluica S.A.S. se realizó un estudio previo a este proceso, el cual será la base para el desarrollo del proceso de desorción, el primer resultado obtenido en dicho estudio fue la gráfica de control de Shewhart la cual indicó que el proceso no se encontraba bajo control estadístico, lo que llevo a la realización de una revisión física y técnica del equipo, desarrollando un mantenimiento preventivo y la actualización del protocolo del proceso de nitruración, seguido a esto se realizó una caracterización física y química del proceso.

Después de la caracterización física se concluye que los rangos de temperatura, pH y flujo volumétrico son de 39.4°C a 41.2°C, 10.50 a 10.83 y 0.11 a 0.12 L/s respectivamente, mientras que los resultados del análisis químico para los parámetros de nitrógeno amoniacal, nitratos, nitritos, hierro y cromo totales se ven reflejados en la Tabla 2. Teniendo el agua de salida del proceso caracterizado se procede a realizar una matriz de selección con el fin de seleccionar la opción más adecuada para el tratamiento de agua residual, esta matriz da como resultado la remoción de amoniaco por arrastre de aire como el más prometedor, por esto se evalúan dos diseños de remoción, el primero una torre empacada con anillos de Pall y una torre inundada por micro burbujeo.

Tabla 2. Resultados de análisis químico de muestra de agua residual.

Muestra	Nitrógeno amoniacal (mg/L)	Nitratos (mg/L)	Nitritos (mg/L)	Hierro total (mg/L)	Cromo total (mg/L)
Muestra simple inicio	1333.0	3.21	0.684	0.216	< 0.011
Muestra compuesta (muestra # 2 a 6) (Durante el proceso)	1090.6	3.74	2.600	0.123	< 0.011
Muestra simple final	845.2	2.71	0.076	0.112	< 0.011

Fuente. FERNÁNDEZ, Juan. PROPUESTA PARA EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL PROCESO DE NITRURACIÓN EN LA EMPRESA ALUICA S.A.S. Fundación Universidad de América, 2018.

Cabe resaltar que el valor máximo de concentración de amoniaco se identifica al promover la alimentación del amoniaco en el sistema, y que su valor va decreciendo a lo largo del proceso.

Los resultados fueron desarrollados por una empresa externa; Quimicontrol es una compañía dedicada al análisis de aguas y tratamientos para las mismas, esta empresa seguirá siendo la cual provea los resultados para todos los protocolos y experimentaciones realizados en este documento.

Las mayores eficiencias de remoción se dieron al realizar el proceso mediante una torre empacada, sin embargo, cabe resaltar que la concentración de amoniaco en el agua tratada no correspondía a su valor máximo, evidencia de esto se encuentra en la siguiente tabla.

Tabla 3. Resultados de estudios previos, torre empacada vs micro burbujeo.

Torre de desorción	Torre empacada	Torre empacada	Torre por micro burbujeo	Torre por micro burbujeo
No. Nitruración	1	2	1	2
Flujo volumétrico de aire previo (L/s)	0.2656	0.2571	0.6423	0.8172
Flujo volumétrico de aire real (L/s)	0.1219	0.1260	0.1154	0.1066

Tabla 3. (Continuación)

Torre de desorción	Torre empacada	Torre empacada	Torre por micro burbujeo	Torre por micro burbujeo
Disminución de flujo volumétrico de aire en la torre (%)	54.09%	51.00%	82.00%	86.95%
Concentración de NH ₃ (mg/L) en corriente líquida de entrada	1100	1129.9	1076.9	1119
Concentración de NH ₃ (mg/L) en corriente líquida de salida	624.7	634.0	884.3	906.8
Eficiencia de remoción de amoníaco (%)	43.21%	43.89%	17.88%	18.96%

Fuente. FERNÁNDEZ, Juan. PROPUESTA PARA EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL PROCESO DE NITRURACIÓN EN LA EMPRESA ALUICA S.A.S. Fundación Universidad de América, 2018.

A partir de los estudios previos se demostró de forma práctica la evaluación de las eficiencias de los dos tipos de columnas, estos tipos de columnas están descritos como torre empacada y torre burbujeada, la torre empacada trabaja con anillos pall, escogidos en los estudios previos y seleccionados por el director de tesis, esta se evaluó a partir de inyección de aire a un flujo de 0.26 l/s aproximado, adicional se evaluó la torre burbujeada con inyección de aire de 0.64 y 0.8 l/s aproximadamente; adicional todos se evaluaron con flujos de agua de 0.0233 l/s; se obtuvo como resultado unas eficiencias de remoción para torre empacada de 43% aproximado y para torre burbujeada de 18.5%, obteniendo como mejor resultado una torre empacada con el mayor flujo de aire evaluado. Cabe resaltar que para efecto de cálculos la concentración del amoníaco en el agua residual se lleva hasta 15445.92 mg/L concentración mostrada en amarillo en la figura 4.

Figura 4. Balance global para el proceso de remoción por arrastre de aire.

V_{m1} Kg/s	0.08044		T_0 °C	40.4
V_{mol1} Mol/s	0.002780		$[]_0$	15445.92
Y_1	0.0018180		L_{v0} L/s	0.1183
y_1	0.0027492		L_{m0} Kg/s	0.1154
			L_{mol0} Mol/s	0.006411
			x_0	0.016451
			X_0	0.015587
			L' L/s	0.008308
V_{mN+1} L/s	0.08031	$[]_N$	14342.92	
V_{molN+1} Mol/s	0.002772	L_{mN} Kg/s	0.1153	
Y_{N+1}	0	L_{molN} Mol/s	0.006404	
y_{N+1}	0	x_N	0.015278	
		X_N	0.01445	

Fuente. Fernández, Juan. PROPUESTA PARA EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL PROCESO DE NITRURACIÓN EN LA EMPRESA ALUICA S.A.S. Fundación Universidad de América.

En la figura anterior se muestra los datos obtenidos en el balance global realizado en los estudios previos; estos estudios previos se utilizaron las notaciones globales de V_1 , para el vapor de salida de desorción, y_1 para el valor de fracción másica de amoniaco en vapor; se utilizó V_{N+1} para el aire de entrada, Y_{N+1} para el valor de fracción másica de amoniaco en aire; se utilizó L_0 para flujo del agua amoniacal de entrada, X_0 para fracción másica de amoniaco de entrada en agua; por último se utilizó L_N para flujo de salida de agua tratada, además X_N para la fracción másica de amoniaco en el agua tratada.

Además, cabe resaltar que se utilizaron los subíndices de m para flujo másico con unidades de kg/s, se utilizó el subíndice de mol para flujo molar con unidades de mol/s, y luego se utilizó la simbolización de paréntesis cuadrados (" $[]$ ") para simbolizar una concentración definida. Por último, se determinó a partir de estos balances los respectivos valores para altura, diámetro, caídas de presión y velocidades ideales para el sistema; obteniendo entonces como resultados los mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados físicos para la torre de desorción.

Parámetro	Valor
Caída de presión en el punto de inundación (in H ₂ O / ft)	1.52
Parámetro de flujo	0.0506
Velocidad de masa de gas (lbm/ ft ² * s)	0.6863
Área de sección transversal ft ²	0.5160
Diámetro m	0.2470
Altura promedio m	4.33

Fuente: elaboración propia, con base en. Fernández, Juan. PROPUESTA PARA EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL PROCESO DE NITRURACIÓN EN LA EMPRESA ALUICA S.A.S. Fundación Universidad de América.

Para finalizar a este estudio previo se le realizaron recomendaciones como la evaluación de la eficiencia de eliminación de amoniaco con varios sistemas de micro burbujeo, evaluar torre de absorción para eliminar el amoniaco del aire mediante una torre a contraflujo con ácido sulfúrico para la producción de sulfato de amonio, evaluar la eficiencia de un diseño mixto entre la torre empacada con anillos de Pall y la torre inundada por micro burbujeo y utilizar un rango mayor de relaciones de flujo volumétrico de aire y de agua para la evaluación de la torre empacada con anillos de Pall y la torre inundada por micro burbujeo.

2.1.3.1 Condiciones del flujo de salida del proceso de nitruración.

Teniendo en cuenta que en el estudio previo se realizó la caracterización del agua de salida del proceso de nitruración, se presentan dichos valores en la siguiente tabla debido a que se usarán como información inicial del flujo de entrada al proceso desorción y absorción, así mismo se muestra si el parámetro está cumpliendo con la Resolución 631 de 2015:

Tabla 5. Parámetros en normas.

Parámetro	Valor	Cumple: si/no
pH	10.62	No
Temperatura	40.4 °C	No
Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	1333.0	N/A
Nitratos (mg/L)	3.21	N/A
Nitritos (mg/L)	0.684	N/A
Hierro total	0.216	Sí

Tabla 5. (Continuación)

Parámetro	Valor	Cumple: si/no
Cromo total	<0.011	Sí
Flujo Volumétrico (L/s)	0.11 – 0.12	N/A

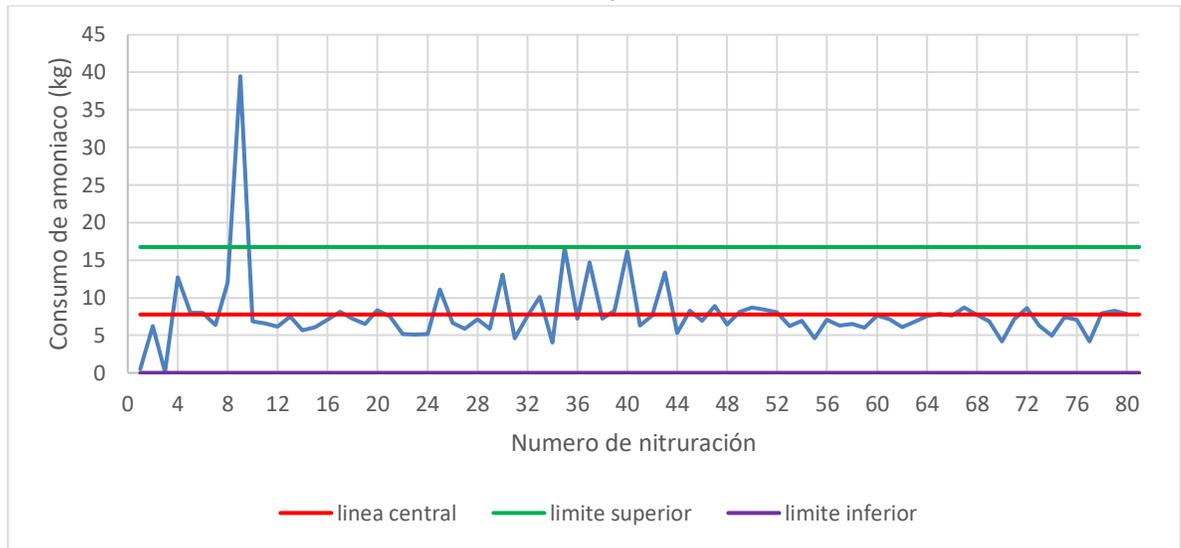
Fuente: elaboración propia, con base en. Fernández, Juan. Propuesta Para El Sistema De Tratamiento De Agua Residual Del Proceso De Nitruración En La Empresa Aluica S.A.S. Fundación Universidad de América.

La concentración del amoniaco siempre será dependiente del pH, es decir que si se tiene una sustancia con pH alto (alcalino) indica una presencia alta de amoniaco, caso contrario si se tiene un pH bajo (acido) es indicativo de ausencia de nitrógeno amoniacal. Por esto el parámetro que se trata directamente es la concentración de Nitrógeno Amoniacal.

2.1.3.2 Gráfico de control de Shewhart. Como se mencionó anteriormente, en el estudio previo se realizó un gráfico de control de Shewhart el cual arrojó que el proceso no se encontraba bajo control estadístico, sin embargo, se tomaron unas acciones correctivas sobre el proceso, por esta razón se decide verificar que el proceso continúe bajo control estadístico midiendo el consumo de amoniaco, ya que este factor si el proceso varia continuamente no se podrá llegar a un resultado poco variable, utilizando la gráfica de control de Shewhart, los resultados obtenidos se muestran en la gráfica 1.

En esta gráfica, el eje vertical corresponde a los valores de consumo de amoniaco y el eje horizontal corresponde al número de lote analizado. Adicionalmente, cuenta con una línea central de color roja, y una línea superior (línea verde) y una inferior (línea morada) las cuales indican los límites permisibles en los cuales puede fluctuar el proceso, puesto que si no se tiene un proceso en control puede llegar a generar interferencia al momento de muestra y si estas no son regulares, ocasionaría un error en el proceso y en el diseño de las torres y llegar a presentar riesgos para el manejo de estas. Para el cálculo de los límites superior e inferior se utiliza la desviación estándar total que para este caso se utilizó 2σ , la cual se obtuvo a partir de la desviación estándar de cada lote, cabe resaltar que el cálculo del límite inferior arrojó un valor de -1.20 sin embargo se ajustó a 0 ya que este valor contradice la teoría de nitruración.

Grafica 1. Grafica de control de Shewhart para los años 2018 – 2019.



Fuente: elaboración propia.

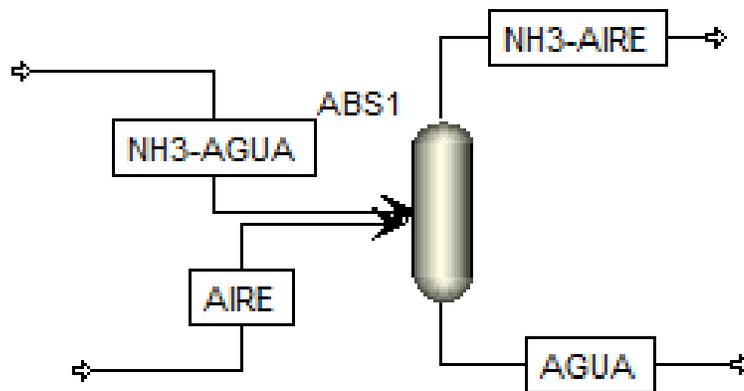
Nota 1. La línea central corresponde a la media o promedio de los consumos de energía de los 81 lotes analizados.

Nota 3. En el Anexo B, se desarrollan los cálculos necesarios para obtener la gráfica de control de Shewhart.

En la gráfica se puede notar varios picos y valles, un pico supera el límite superior sin embargo se puede deber algún error del operario o de digitación por tanto no se considera un valor significativo, los demás resultados se encuentran dentro de los límites lo cual indica que las acciones correctivas realizadas en el estudio anterior perduran hasta la actualidad y el proceso continúa bajo control estadístico con poca variabilidad, por tanto, no es necesario realizar algún tipo de inspección o corrección al proceso.

2.1.4 Simulación con las condiciones planteadas en estudios previos. Con el fin de confirmar los datos obtenidos en el estudio previo realizado por la empresa y constatar que se están usando los datos adecuados, se realiza una simulación en Aspen plus V9. En el Anexo C se muestra el procedimiento de realización de la simulación, en este se describe cuáles fueron los pasos que se realizaron, además de las condiciones ingresadas y selección de parámetros importantes para la simulación.

Imagen 3. Esquema del proceso desarrollado en Aspen Plus.



Fuente: elaboración propia, con base en el software. ASPEN PLUS V9.

Con el fin de comprobar el correcto desarrollo de la toma de muestra del estudio previo se procedió a ingresar los datos de partida para dos corridas de la corriente NH_3 -agua, los componentes internos y las especificaciones necesarias para simular una torre empacada véase el Anexo C.

Por último, se analizaron los datos obtenidos de salida en las corrientes, esto se realiza con el fin de comparar los datos obtenidos por la experimentación en los estudios previos con la simulación; así confirmar una respuesta o resultado similar que pueda arrojar un simulador; es posible que puedan llegar a variar un poco y es por esto que se decide aceptar por parte de la empresa un error de hasta un 20% en la diferencia de datos obtenidos, debido a ser comparado un dato teórico con uno práctico.

En los estudios previos se tiene una eficiencia de remoción cercana al 43%, es decir que nuestra remoción ideal, según lo planteado sería del 23%, de lo obtenido con los estudios previos se espera una remoción cercana o superior.

A partir de este desarrollo se encuentran los siguientes resultados:

Tabla 6. Resultados de estudios previos 1100 mg/L en Aspen.

Variable	NH ₃ -AIRE		AGUA	
	Flujo molar (kmol/s)	Flujo másico (kg/s)	Flujo molar (kmol/s)	Flujo másico (kg/s)
	5.55E-06	1.00E-04	1.50E-03	2.73E-02
	Fracción molar	Fracción másica	Fracción molar	Fracción másica
Aire	0.56	0.68	0.00	0.00
Agua	0.08	0.06	0.89	0.89
Amonio	0.36	0.26	0.11	0.11

Fuente: elaboración propia, con base en el software. ASPEN PLUS V9.

A partir de los datos obtenidos de la simulación para 1100 mg/L de amoniaco en agua, se obtiene como resultado una recuperación menor al 15%, a comparación al 43,21% obtenido en los estudios previos.

Tabla 7. Resultados de estudios previos 1129 mg/L en Aspen.

Variable	NH ₃ -AIRE		AGUA	
	Flujo molar (kmol/s)	Flujo másico (kg/s)	Flujo molar (kmol/s)	Flujo másico (kg/s)
	6.27E-06	1.00E-04	1.50E-03	2.73E-02
	Fracción molar	Fracción másica	Fracción molar	Fracción másica
Aire	0.52	0.65	0.00	0.00
Agua	0.08	0.07	0.88	0.89
Amonio	0.40	0.29	0.12	0.11

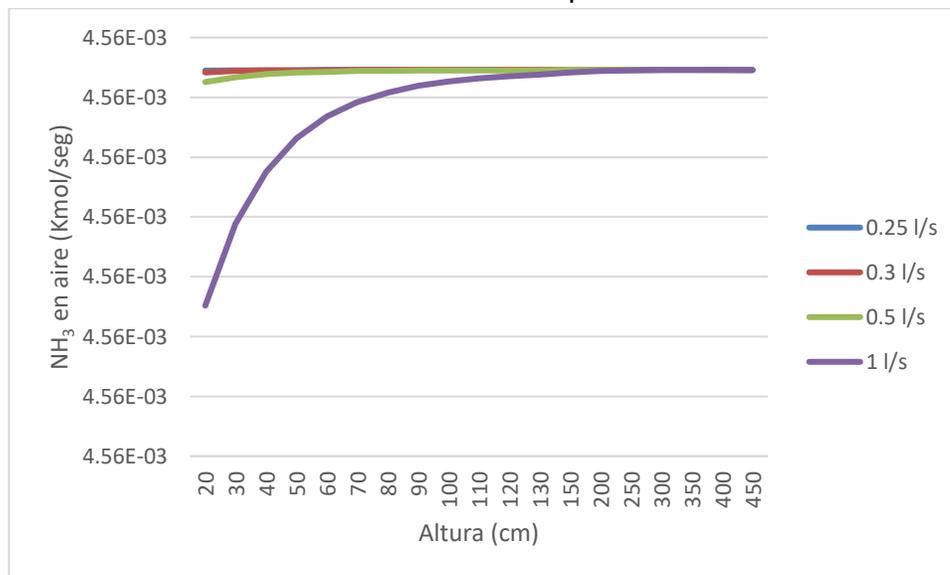
Fuente: elaboración propia, con base en el software. ASPEN PLUS V9.

Al comparar con los resultados obtenidos en los estudios previos se muestra una reducción de aproximadamente menor al 16% para una concentración de 1129 mg/L; a diferencia de los resultados obtenidos los cuales hablan de cerca de un 43,89%, prueba de que no es efectiva la comparación teórica con la física. Además, prueba que existen errores en la medición del proceso, pudo existir un mayor tiempo de reposo, así como la existencia de mayor flujo de aire al estimado, esto es debido a la dificultad de medición de flujos de aire en procesos como este.

Adicionalmente se realizó el cambio o variación de las condiciones máximas de operación, para el flujo de agua, con esta se decidió variar los valores de altura y empaques.

Se utilizaron valores de flujos de aire para la entrada de 0.25 L/s (flujo mínimo de operación para el simulador, por factores descritos del simulador) hasta 0.5 L/s, considerado dentro de las heurísticas de 2 veces el mínimo, además de temperatura de operación de 35°C y una presión parcial de 0.72 atm (presión de Mosquera); a partir de estos datos se encontró la siguiente gráfica.

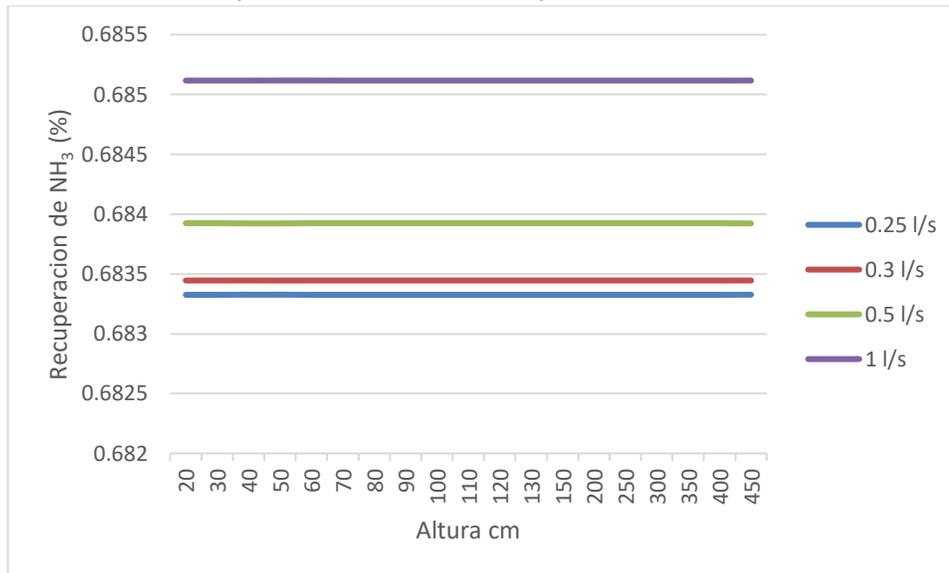
Grafica 2. Fracción de NH₃ en aire comparada con altura.



Fuente: elaboración propia, con base en. ASPEN PLUS.

Por otra parte en la gráfica anterior se muestra la fracción de amoníaco en el aire con respecto a la altura; esta gráfica se realiza con el objetivo de identificar su influencia en el proceso, identificando su variabilidad en la concentración a medida que se modifica la altura con los flujos establecidos; a partir de la anterior se puede ver que la altura deja de ser determinante en a partir de los 120 cm aproximadamente a las condiciones planteadas; además en la gráfica la variable respuesta es indicativo de la dependencia del flujo de aire y del flujo de agua introducido al sistema; es decir a medida que aumenta el flujo de aire de ingreso al sistema este aumenta nuestra fracción de amoníaco de salida en el aire, sin embargo no existe una diferencia significativa entre alturas para la fracción recuperada; es por esto que se descarta como factor influyente la altura de la torre a escala industrial.

Grafica 3. Recuperación de NH₃ comparada con altura.



Fuente: elaboración propia, con base en el software. ASPEN PLUS.

La gráfica anterior muestra la relación de la altura, flujo de aire y recuperación con el fin de determinar cuál será el máximo teórico que se puede llegar a remover del agua residual del proceso, teniendo en cuenta de lo anterior el máximo de remoción que se puede alcanzar es de aproximadamente 70%, además se concluye que aun máximo de flujo de aire, existe mayor remoción.

2.2 ALTERNATIVAS DE MEJORA PARA LA TORRE DE DESORCIÓN

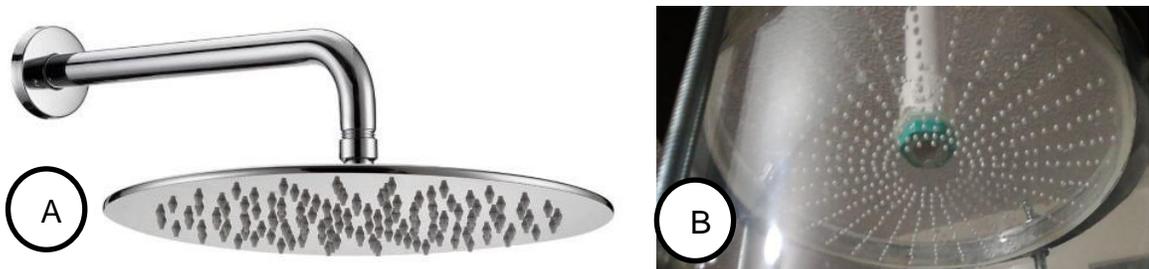
Como parte del proceso de resolución del problema es necesario buscar o generar alternativas de solución como mejora al proceso, las cuales luego de su respectiva evaluación llevarán a tomar una decisión sobre la solución a implementar. Para que las alternativas de solución sean escogidas o válidas para este proceso, es necesario cumplir con la operatividad y a su vez sean concretas.

2.2.1 Aspersión de líquido. El distribuidor de líquido debe garantizar la irrigación adecuada del empaque y distribución uniforme del líquido, resistencia a la obstrucción baja caída de presión. Se considera necesario proporcionar al menos cinco puntos de introducción del líquido por cada 0,1 m² de sección transversal para

diámetros de la torre mayor a 1,2 m y un número mayor para diámetros pequeños.⁵⁴
55

Sin embargo teniendo en cuenta la información del estudio previo⁵⁶, el sistema de aspersión utilizado fue una ducha comercial la cual no permite una buena introducción de líquido, ni garantizar el mínimo de 5 puntos de introducción del líquido para cada 0.1 m², por lo cual se procede a realizar un sistema de aspersión en acrílico con un diámetro de 19 cm el cual es inferior al diámetro de la torre, lo cual evitara que las gotas caigan por la pared de esta, además se aumenta el número de puntos de introducción del líquido, a continuación se muestra una imagen del nuevo sistema de aspersión planteado. En la imagen 4 se puede observar el cambio del sistema de aspersión de líquido, antes (A), allí se muestra que cuenta con mayores puntos de introducción de líquido (B) y cuenta con un espacio entre la pared de la columna y el aspersor.

Imagen 4. Comparación, aspersión de líquido actual vs anterior.



Fuente: elaboración propia.

2.2.2 Relación diámetro de columna – diámetro del empaque. Cuando la relación del diámetro del empaque y el diámetro de la columna es menor de 1 a 8⁵⁷, el líquido tiende a desplazarse hacia afuera del empaque y descender por la pared de la pared de la columna,⁵⁸ sin embargo este parámetro es especialmente para torres a escala real a partir de esto, se decide llevar la relación diámetro de empaque a diámetro de columna de 1:3 a 1:4 con el fin de reducir que el líquido descienda por la pared de la columna, es decir se utilizó un diámetro de 20 cm por 65 cm de

⁵⁴ TREYBAL, ROBERT E. Operaciones con Transferencia de Masa. Edición Revolucionaria, La Habana, 1985. Págs. 213-225

⁵⁵ De la Hoz, S. H. Diseño de un módulo para el dimensionamiento hidráulico de torres empacadas.

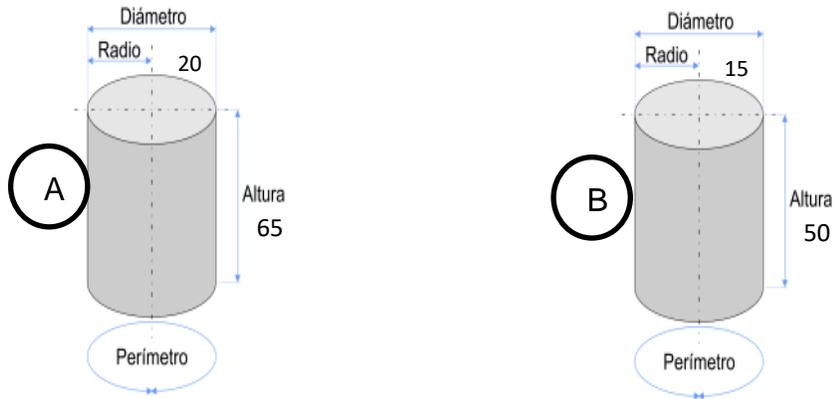
⁵⁶ Fernández, Juan. PROPUESTA PARA EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL PROCESO DE NITRURACIÓN EN LA EMPRESA ALUICA S.A.S. Fundación Universidad de América.

⁵⁷ MC CABE, Warren. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. McGraw- Hill education, 2005. 590-595 p.

⁵⁸ Mccabe, Smith. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. Mc Graw Hill. Sexta edición.

altura (imagen 5 B); cabe resaltar que la propuesta anterior se tiene una relación similar a la plateada, se utilizó una relación 1:4, descrita por una torre de 15 cm de diámetro por 50 cm de altura (imagen 5 B).

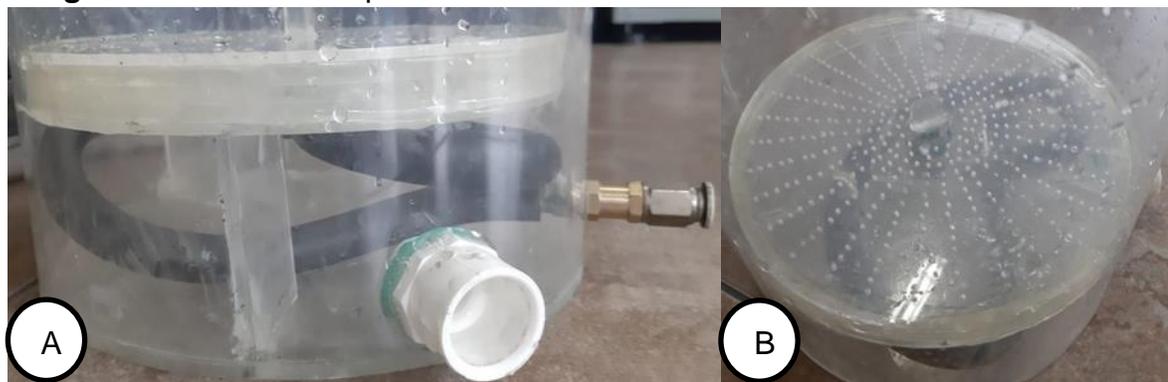
Imagen 5. Esquema relación diámetro altura actual vs anterior.



Fuente: elaboración propia.

2.2.3 Difusor de aire. Teniendo en cuenta que anteriormente se utilizó una manguera difusora de aire, normalmente utilizada en los acuarios, se procede a realizar un difusor de aire en acrílico con el fin de hacer más simétrica la difusión (imagen 6 B), además de esto garantizar que la dispersión del gas se haga uniformemente y en caso de utilizar una torre inundada cree burbujas, de esta forma evitando las zonas muertas de la torre. Se utilizó una manguera de caucho para agua de alto calibre (imagen 6 A), además de un acople que da al exterior para el aire.

Imagen 6. Sistema de aspersión de aire actual.



Fuente: elaboración propia.

2.2.4 Mejora en la medición de flujos de aire y agua. Con el fin de realizar una mejora en la medición de los distintos flujos y teniendo en cuenta como se realizó dicha medición en el estudio previo⁵⁹ se decide utilizar una placa electrónica conocida como Arduino Uno, Arduino es una plataforma de creación de electrónica de código abierto, la cual está basada en hardware y software libre, flexible y fácil de utilizar para los creadores y desarrolladores. Esta plataforma permite crear diferentes tipos de microordenadores de una sola placa a los que la comunidad de creadores puede darles diferentes tipos de uso.⁶⁰ En el Anexo D se muestra la ficha técnica de esta placa. Con el fin de medir el flujo de agua a la entrada de la torre se incorpora un sensor de flujo de agua YF-S201 y para el flujo de aire se utilizará un sensor de presión MPS20N004D y el amplificador LM358 ambos conectados a la placa Arduino, en el Anexo E se encuentra la ficha técnica de ambos sensores. Es importante mencionar que el código de programación y la calibración utilizada para la configuración de ambos sensores se muestra en el Anexo F.

2.2.4.1 Medición de la velocidad del aire. Con el fin de obtener el caudal y la diferencia de velocidad entre la entrada y la salida de la torre, se opta por la compra de un anemómetro, el cual es un instrumento que mide la velocidad instantánea del viento, pero las ráfagas de viento desvirtúan la medida, de manera que la medida más acertada es el valor medio de medidas que se tomen a intervalos de 10 minutos⁶¹. Mediante la velocidad del viento y el área de la tubería se obtuvo el caudal mientras que la diferencia de velocidades se obtuvo mediante la resta de la velocidad a la entrada y a la salida, adicional este medidor posee un termómetro interno, con el fin de conocer y mantener la temperatura constante; en el Anexo G se muestra la ficha técnica del instrumento.

2.2.5 Variación de los flujos aire – agua para la torre empacada. Según el estudio previo realizado⁶² los flujos aire-agua más prometedores fueron de 0.2571 L/s y 0.0233 L/s respectivamente, arrojando una eficiencia de remoción del 43.9%,

⁵⁹ Fernández Juan, et al. Propuesta para el sistema de tratamiento de agua residual del proceso de nitruración en la empresa Aluica [en línea]. En: Fundación Universidad de América. Diciembre, 2018, [Consultado 20 de diciembre de 2018].

⁶⁰FM, Yúbal. Qué es Arduino, cómo funciona y qué puedes hacer con uno. [1]. -07-21T10:06:20+00:00. [Consultado el Sep 5,2019]. Disponible en: <https://www.xataka.com/basics/que-arduino-como-funciona-que-puedes-hacer-uno>

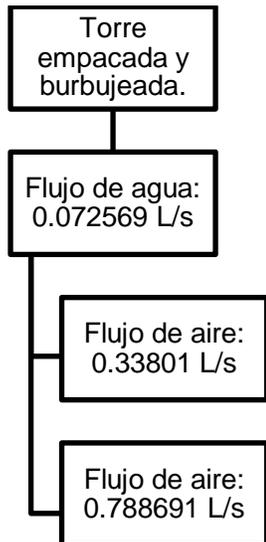
⁶¹ Infoagro Systems, S.L. C/ Capitán Haya, 60, 2 º, 28020, Madrid, España [Consultado el 7 de septiembre, 2019]. Disponible en: https://www.infoagro.com/instrumentos_medida/doc_anemometro_velocidad_viento.asp?k=80

⁶² Fernández Juan, et al. Propuesta para el sistema de tratamiento de agua residual del proceso de nitruración en la empresa Aluica [en línea]. En: Fundación Universidad de América. Diciembre, 2018, [Consultado 20 de diciembre de 2018].

valores que, aunque son prometedores no son los óptimos para el escalado y el funcionamiento en planta de la torre, por esta razón se procede a realizar una mejora a esta relación.

Se tuvo en cuenta la temperatura de operación del sistema, tomando muestras aleatorias de agua y midiendo tanto su pH como la temperatura; con el fin de confirmar las eficiencias obtenidas en el anterior estudio e implementar la mejora se evaluarán los flujos mostrados en la Figura 4, cabe resaltar que los nuevos flujos se obtuvieron fijando el valor del flujo de agua el cual es el máximo obtenido a la salida del proceso de nitruración, mientras los flujos de aire se proponen en base a la heurística 1.3 y 3.5 obtenidas por Perry⁶³ y Crittenden⁶⁴.

Figura 5. Flujos utilizados en la experimentación.



Fuente: elaboración propia.

2.2.6 Generación de burbujas. El aire comprimido generalmente se introduce a través de membranas porosas, placas, tubos porosos, fibras enrolladas o filamentos metálicos en el fondo de un recipiente o tanque. Los sistemas de aire difuso generalmente requieren filtros para evitar las partículas en el aire, debido a que el aire se ve obligado a fluir a través de poros muy finos, el cual puede taponarse

⁶³ PERRY, Hobert H. and GREEN, Don W. Perry: manual del ingeniero químico. Tomo IV (6a. ed.). México, D.F: McGraw-Hill Interamericana, 1992.

⁶⁴ Crittenden, John C. Trussell, R. Rhodes Hand, David W. Howe, Kerry J. Tchobanoglous, George. (2012). MWH's Water Treatment - Principles and Design (3rd Edition) - 14. Air Stripping and Aeration. (pp. 31). John Wiley & Sons. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00AD4ZF1/mwh-s-water-treatment/air-stripping-aeration>.

fácilmente.⁶⁵ En este caso se utilizará el difusor de aire planteado en la sección 2.6.3 de este documento. el cual genera burbujas al momento de existir una inundación, aunque este no forme burbujas muy finas, generará mayor uniformidad de estas; en la práctica se evidenció que se genera turbulencia, esto permite el aumento a la transferencia de masa⁶⁶.

Imagen 7. Generación de burbujas.



Fuente: elaboración propia.

2.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

A continuación, se muestra el protocolo para el desarrollo experimental el cual permitirá evaluar la remoción de amoníaco. 1. Mediante una torre empacada. 2. Mediante una torre de burbujeo. La experimentación para desarrollar permitirá determinar cuál método y relación de flujo aire – agua, será el más adecuado para la remoción del amoníaco del agua.

2.3.1 Descripción del prototipo de torre de desorción. Se realiza un prototipo a escala laboratorio para evaluar los métodos de remoción de amoníaco en el agua, este prototipo cuenta con 60 cm de altura y un diámetro interno de 20 cm⁶⁷, un espesor de 5 mm y está fabricado en acrílico transparente con el fin de poder visualizar el proceso al interior de la torre.

⁶⁵ Crittenden, John C. Trussell, R. Rhodes Hand, David W. Howe, Kerry J. Tchobanoglous, George. (2012). MWH's Water Treatment - Principles and Design (3rd Edition) - 14. Air Stripping and Aeration. (pp. 31). John Wiley & Sons. [Consultado septiembre 19 de 2019] Disponible en:

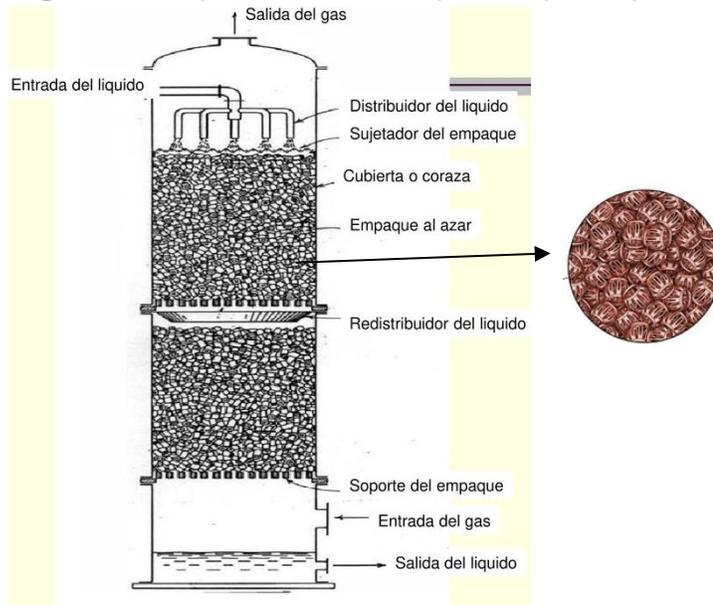
<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00AD4ZF1/mwh-s-water-treatment/air-stripping-aeration>

⁶⁶ Voisin, Leandro, Ingeniería de minas, CLASE,04/05 and Transporte de Masa. FENÓMENOS DE TRASPORTE EN METALURGIA EXTRACTIVA. [Consultado el 11, sep, 2019] Disponible en: <https://es.scribd.com/document/327148445/FTM-Clase-21-Transporte-de-Masa-4>

⁶⁷ McCabe, Smith. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. Mc Graw Hill. Sexta edición.

La columna cilíndrica contiene en la parte superior una entrada de agua la cual conecta a un distribuidor de líquido y una salida de gas, en la parte inferior cuenta con una entrada de aire la cual conecta a un distribuidor de gas, así mismo cuenta con una salida de líquido residual del proceso; según sea el caso se cuenta con anillos Pall distribuidos aleatoriamente, con una profundidad de lecho de relleno de 50 cm. En la figura siguiente se muestra un esquema de la torre de desorción en la cual se establecen las corrientes y en la imagen siguiente se muestra la instalación realizada en planta.

Figura 6. Esquema ilustrativo para el prototipo de la torre de desorción.



Fuente: elaboración propia, con base en. Benemérita, universidad autónoma de Puebla, México⁶⁸

⁶⁸Nieto Silva, Luis, C. A., Benemérita universidad autónoma de Puebla, 2020, [consultado en enero 28 de 2020] Disponible en: <https://slideplayer.es/slide/13654863/>

Imagen 8. Prototipo a escala laboratorio columna de desorción.



Fuente: elaboración propia.

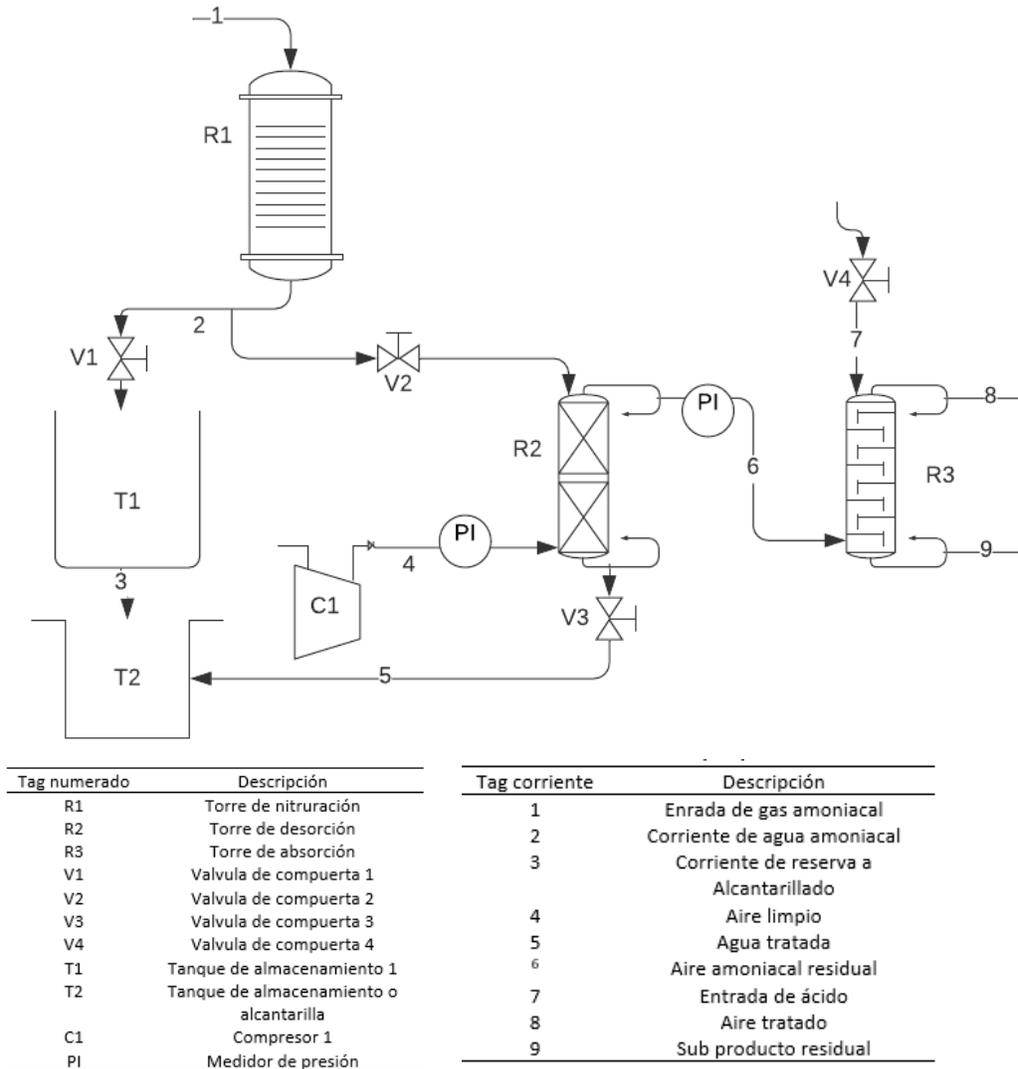
Según lo observado en la planta de Aluica e información obtenida en el estudio previo⁶⁹, el equipo de nitruración cuenta con una salida la cual permitirá obtener el agua residual directamente del proceso de nitruración, adicional a esto se hará la inclusión del sistema de absorción y de diferentes herramientas para la medición de caudales y presión en ambos sistemas. En la figura siguiente, presentada como diagrama P&D se muestra el esquema ilustrativo del proceso de nitruración junto con la desorción y la absorción, además de las descripciones de las corrientes y los elementos del sistema, dentro de los cuales se encuentran: torre de nitruración, torre de desorción, torre de absorción, válvulas, tanques, compresores y medidores; además corrientes de entradas de amoniaco, corrientes de aire y demás.

Es importante mencionar que el tipo de empaque utilizado es el Anillo Pall elaborado en polipropileno de alta densidad traslucido a color natural, tienen un diámetro de 50mm y una altura de 50mm cada uno y un área de contacto de $38 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ ⁷⁰ mientras que los difusores de aire y agua son los mismos enunciados en la sección 2.6.1. y 2.6.3.

⁶⁹ Fernández Juan, et al. Propuesta para el sistema de tratamiento de agua residual del proceso de nitruración en la empresa Aluica [en línea]. En: Fundación Universidad de América. Diciembre, 2018, [Consultado 20 de diciembre de 2018].

⁷⁰ ⁷⁰ Fernández Juan, et al. Propuesta para el sistema de tratamiento de agua residual del proceso de nitruración en la empresa Aluica [en línea]. En: Fundación Universidad de América. Diciembre, 2018, [Consultado 20 de diciembre de 2018].

Figura 7. Esquema ilustrativo de nitruración junto con la desorción y absorción.

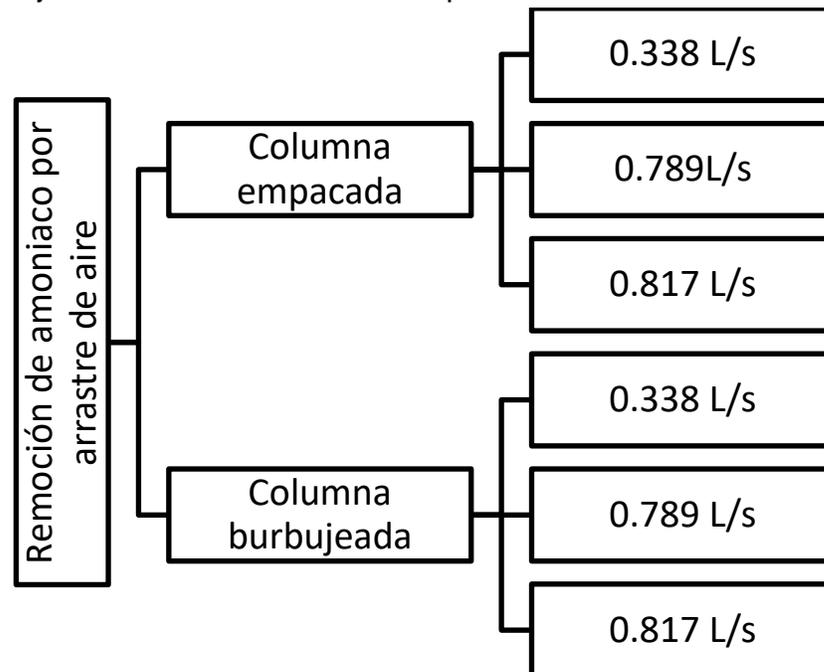


Fuente: elaboración propia.

2.3.2 Protocolo de experimentación. Mediante el proceso de experimentación se realizó el procedimiento adecuado con el objetivo de evaluar las decisiones tomadas, adicional se verificó la efectividad de remoción de amoníaco mediante (1) torre empacada y (1) burbujeada, así mismo se propone la evaluación de dos flujos volumétricos de aire con los cuales no se había experimentado anteriormente, seguido de un flujo con el cual se había experimentado anteriormente; flujo que obtiene la mayor eliminación con un 40%; y por último a la máxima capacidad de flujo de aire arrojada por la bomba; en todas las muestras se utilizó el flujo total de agua a la salida. De esta manera se llevan a cabo 14 eventos.

En el procedimiento llevado a cabo se evaluaron tres (3) distintos flujos de aire manteniendo el flujo de agua como máximo 0.072569 L/s; a partir de este flujo de aire y teniendo en cuenta el mejor resultado obtenido en estudios previos, se tomaron los valores de flujos de aire equivalentes a el flujo mínimo para la generación de burbujas (0.338 L/s), el flujo ideal utilizado por estudios previos (0.789 L/s) y la mitad del flujo máximo posible generado por la bomba (0.817 L/s); a continuación se muestran los flujos experimentales.

Figura 8. Flujos de aire utilizados en la experimentación.



Fuente: elaboración propia.

Nota 3. En el Anexo H se muestra el protocolo de experimentación cumpliendo la NTC 4783.

2.4 EJECUCIÓN EXPERIMENTAL

El día 18 de septiembre de 2019 se realiza la toma de muestras para el proceso de desorción, donde se obtienen distintos resultados de pH y temperatura, además de esto el día 19 de septiembre se llevan las muestras al laboratorio Quimicontrol con el fin de determinar las concentraciones de estas.

2.4.1 Resultados de experimentación. La experimentación se llevó a cabo el día 18 de septiembre de 2019, completando todo el procedimiento satisfactoriamente. El registro de los datos se realizó mediante la Tabla 8, en esta tabla cada columna corresponde a las distintas variables evaluadas a la entrada y salida del proceso, mientras que las filas corresponden a las horas de muestreo, sin embargo, es importante resaltar que el flujo del agua a la entrada no se registra ya que es un parámetro constante y corresponde al máximo obtenido en el proceso.

Es importante resaltar que, aunque el tamaño del prototipo no da ningún indicativo si el proceso promueve o no un cambio de temperatura, se registra la temperatura a la entrada y la salida con el fin de identificar si hay posibilidad que esto ocurra. Es importante resaltar que la eficiencia se reduce significativamente a medida que la temperatura del aire disminuye⁷¹, por lo cual se debe mantener una temperatura del aire superior a 20 (°C) con el fin de mantener una alta eficiencia de remoción de amoniaco.

Los resultados de la disminución de pH y concentración de nitrógeno amoniacal en cada tipo de torre evaluada se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. pH vs muestra.

Número de muestra de agua 100mL	pH inicial	pH final	T(°C) inicial	T(°C) final
2	10.24	9.76	40.2	32.1
3	10.24	9.72	40.4	32.3
5	10.2	9.77	40.3	30.8
6	10.2	9.7	41	31.1
7	10.2	9.85	39.8	31.8
8	10.2	9.74	39.9	35.9
10	9.97	9.73	40.2	21
12	10.25	9.88	40.1	31.3
13	10.25	9.65	39.9	32.7
15	9.91	9.76	39.9	30.3
16	9.91	9.7	40.2	30.1
17	9.91	9.76	40.3	26.9
18	9.91	9.74	39.8	26.7
20	9.71	9.53	39.8	21.7

Fuente: elaboración propia.

⁷¹ United states environmental protection agency. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Extracción de amoniaco por arrastre con aire. [0]: Washington D.C.: 2000.

De la anterior tabla es importante resaltar que el tratamiento realizado es viable ya que en todos los casos se presenta una disminución de pH, sin embargo, una disminución de pH poco significativa puede conllevar a una disminución muy alta de concentración de amoníaco, por lo que se lleva al laboratorio Quimicontrol con el fin de realizar un análisis a profundidad y ratificar la disminución de concentración. En la siguiente tabla se puede visualizar los resultados obtenidos.

Tabla 9. Resultados proceso de desorción.

Flujo volumétrico de agua(L/s): 0.07269							
Flujo vol. de aire (L/s) a la entrada	Velocidad del aire (m/s)	Flujo vol. de aire (L/s) a la salida	Disminución de flujo volumétrico en la torre o pérdidas (%)	Disminución [NH ₃] (mg/L) en la corriente liquida a la entrada	[NH ₃] (mg/L) en la corriente liquida a la salida	Eficiencia de remoción de amoníaco (%)	Tipo de torre
0.12	6.6	0.065	5.5	1065.4	695.9	34.68	Empacada
0.32	16.62	0.089	23.1	1029.9	623.2	39.49	Empacada
0.37	19.2	0.103	26.7	1029.9	607.6	41.01	Empacada
0.95	35	0.298	65.2	1015.1	445.8	56.07	Empacada
0.13	6.6	0.039	20.6	1009.5	699.4	30.72	Burbujeada
0.32	16.62	0.114	20.6	1008.1	629.4	37.57	Burbujeada
0.37	19.2	0.076	29.4	1008.1	644.5	36.07	Burbujeada
0.95	35	0.213	73.7	1002.3	451.5	55.52	Burbujeada

Fuente: elaboración propia.

La tabla anterior muestra los datos tomados para el flujo de agua de salida de nitruración (0.07269 L/s); en la primera columna se muestra un flujo determinado de aire, este flujo fue la única variable a modificar; se tomó un flujo de aire desde 0.12 L/s, siendo el mínimo flujo medible, subiendo hasta un flujo de 0.37 L/s, sin embargo se tuvo en cuenta la mitad del flujo máximo de aire que trabaja la bomba, que es de 0.9 L/s, este dato se utilizó con base a los resultados obtenidos en la simulación, junto a este se calculó el flujo másico (Variable de velocidad de aire); paso seguido se realizó la medición del flujo de aire a la salida del sistema (variable flujo volumétrico de aire), es decir, saliente de la desorción; se calcularon las pérdidas para cada proceso con estos flujos (variable de disminución de flujo volumétrico); posterior se tomaron muestras de agua para el proceso de desorción, se tenía en cuenta la entrada (concentración de amoníaco en la entrada) y salida (concentración de amoníaco en la salida); se muestrearon 100 mL de cada proceso realizado, con

su respectiva repetibilidad; este proceso se realizó para una columna empacada y una burbujeada.

Como resultados arrojados en la séptima columna se puede ver que el aumento en la eficiencia de remoción utilizando el flujo máximo de aire y agua, en el Anexo J y K se muestran los datos de concentración máximo y mínimos encontrados, el cual nos lleva al valor de concentración de salida de 445.8 mg/L, en el Anexo I se muestran los mejores resultados, siendo este el más bajo registrado, sin embargo, al comparar los valores con el estudio previo se puede evidenciar que la eficiencia de remoción para el mismo flujo de aire es menor ya que el flujo de agua es mayor, cabe resaltar que la disminución es del 56% para un aumento de flujo de casi el doble, lo cual es un fuerte indicio de que las mejoras tienen un efecto positivo sobre la torre. Por otra parte, es importante resaltar que según los datos obtenidos en la simulación de la sección 2.5 de este mismo documento, la eficiencia de remoción a flujos hasta de 1 L/s de aire no supera el 70%.

Además, es importante resaltar que, a partir de las mejores físicas hechas en la aspersión de líquido, difusor de aire, y diámetro y altura de la columna, y al encontrar los flujos líquido – gas adecuados, se encuentra una mejora a la eficiencia de remoción del anterior estudio lo cual conlleva a pasar de una eficiencia de remoción de 43.89 % en el estudio anterior a una de 56.07%.

3. SISTEMA DE ABSORCIÓN

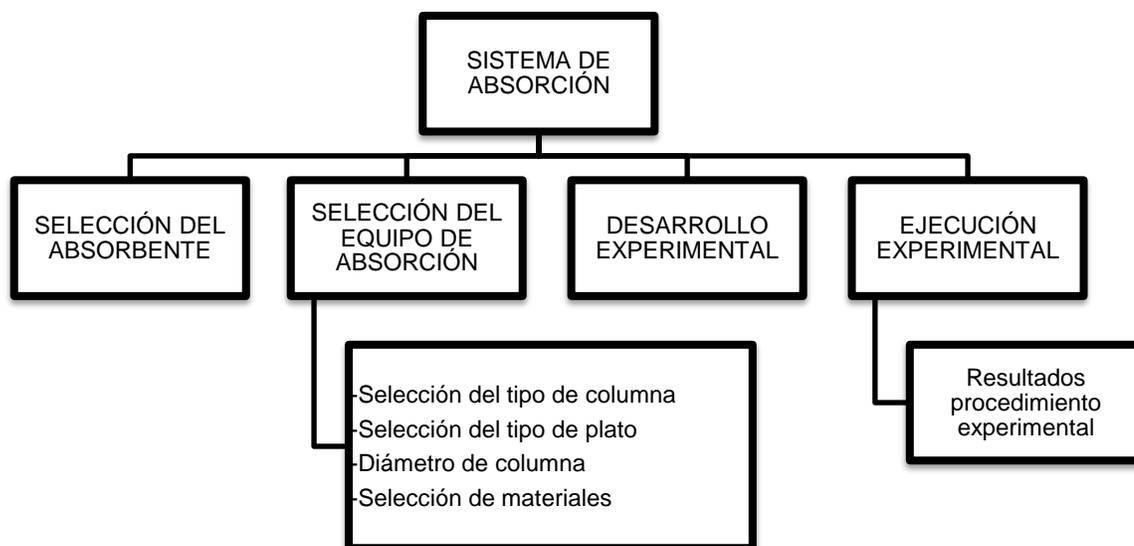
En el siguiente capítulo se plantea un sistema de absorción con el fin de darle una correcta disposición al gas residual (aire + NH₃) resultante del sistema de desorción, es importante captar los gases residuales debido a que es un gas toxico que puede generar irritación en el peor de los casos, desmayo hasta la muerte, es por esto que se decide captar el gas por un sistema de absorción, para el cumplimiento de las normas y realizar el debido proceso complementario a la desorción. Se evaluarán distintos absorbatos para llevar a cabo el proceso y se mostrara la eficiencia del proceso mediante la determinación de la concentración del subproducto que se forme.

3.1 SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA

Como primer paso, se decide seleccionar los diferentes componentes de un sistema de absorción con el fin de escoger los más adecuados para los requerimientos del proceso, se seleccionará el compuesto absorbedor, los materiales y tipo de estructura, luego sus elementos internos luego por último se tendrá un esquema global del sistema.

En la siguiente figura se muestra un resumen del procedimiento que se realizara en este capítulo.

Figura 9. Esquema de proceso en el capítulo 3.

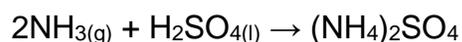


Fuente: elaboración propia.

3.1.1 Selección del absorbente. A partir de la literatura se han determinado los tres compuestos más utilizados como absorbentes de aire con nitrógeno amoniacal son el ácido sulfúrico⁷², ácido clorhídrico⁷³ y ácido nítrico⁷⁴; por lo tanto, se comenzará con un análisis matemático para las reacciones que se producen entre los distintos absorbentes y el gas determinando cada una de las energías libres de Gibbs, esta determinara la conversión en la reacción y que tan rápida se da la misma a la temperatura de operación; y su respectivo calor de formación, el cual determinara el tipo de material a utilizar de acuerdo al calor desprendido de la reacción.

La primera reacción por analizar se hará mediante ácido sulfúrico y el gas para producir sulfato de amonio. El procedimiento detallado de los cálculos utilizados para obtener los resultados de las siguientes tablas será mostrado en el Anexo L, donde se describe el procedimiento para cada uno de los compuestos y resultados encontrados.

Reacción 4. Reacción para producir sulfato de amonio.



Con el fin de determinar si la reacción ocurre de forma espontánea o no, se realiza el cálculo de la energía libre de Gibbs.

⁷² IPNI, Fuentes de nutrientes específicos, sulfato de amonio; [consultado el 11 de septiembre de 2019] disponible en: [http://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/794F6BDB7E84EA4785257BBA0059C154/\\$FILE/NSS-ES-12.pdf](http://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/794F6BDB7E84EA4785257BBA0059C154/$FILE/NSS-ES-12.pdf)

⁷³ Cloruro de amonio, la guía química, monica Gonzales, [consultado el 20 de septiembre de 2019]; disponible en: [http://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/794F6BDB7E84EA4785257BBA0059C154/\\$FILE/NSS-ES-12.pdf](http://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/794F6BDB7E84EA4785257BBA0059C154/$FILE/NSS-ES-12.pdf)

⁷⁴ IPNI, Fuentes de nutrientes específicos, nitrato de amonio; [consultado el 11 de septiembre de 2019] disponible en: [http://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/1F51C7CDE49DF9E985257BBA0059DB3C/\\$FILE/NSS-ES-22.pdf](http://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/1F51C7CDE49DF9E985257BBA0059DB3C/$FILE/NSS-ES-22.pdf)

Tabla 10. Energía libre de Gibbs para sulfato de amonio.

Sustancia	Fórmula	T _{min} (K)	T _{máx} (K)	Gibbs (298K) (kJ/mol)
Amoníaco	NH ₃	298.15	1500	-16.37
Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄	298.15	368.3	-653.37
Sulfato amonio	(NH ₄) ₂ SO ₄	298.15	320.2	-596

Fuente. Yaws' Handbook of Thermodynamic Properties for Hydrocarbons and Chemicals.

Como se puede notar el valor de energía libre de Gibbs se da a una temperatura estándar lo cual permite realizar el cálculo de la constante de equilibrio, es necesario utilizar una temperatura diferente a la temperatura estándar, debido a que el proceso de nitruración trabaja con temperaturas de agua de 30°C hasta 45°C; a partir de esto se calcula la conversión a diferentes temperaturas las cuales son las más comunes en la empresa. Para el cálculo de la conversión se hace uso de las constantes y la energía libre de Gibbs.

En la siguiente tabla se muestran los resultados para la anterior reacción.

Tabla 11. Resultados a diferentes temperaturas sulfato de amonio.

Temperatura(K)	K _o	Ln K _a	K _a	Conversión
300	1.54E+36	86.50	3.67E+37	1
315	2.92E+34	82.38	5.97E+35	1
350	1.04E+31	74.14	1.58E+32	1
400	1.38E+27	64.87	1.49E+28	1
450	1.34E+24	57.66	1.10E+25	1
500	5.17E+21	51.90	3.46E+22	1
550	5.48E+19	47.18	3.09E+20	1
600	1.24E+18	43.25	6.06E+18	1

Fuente: elaboración propia.

A partir de los resultados obtenidos, notamos que al tener una temperatura de 300°K a 350°K no hay una diferencia relativa en la constante de equilibrio, esto indica que no varía el comportamiento de la reacción; adicional se puede observar que la

reacción a las distintas condiciones planteadas es viable en base a la energía libre de Gibbs y la conversión, en este caso indica que la conversión es 1, es decir es una reacción instantánea a la temperatura planteada.

Para la segunda reacción se tiene ácido clorhídrico junto con el gas para producir cloruro de amonio.

Reacción 5. Reacción para producir cloruro de amonio.



Siguiendo el procedimiento encontrado en el Anexo L se obtienen los siguientes valores.

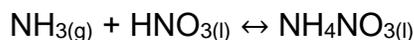
Tabla 12. Resultados a diferentes temperaturas cloruro de amonio.

Temperatura(K)	K _o	Ln K _a	K _a	Conversión
300	1.53E+16	50.91	1.29E+22	1
315	2.60E+15	48.49	1.14E+21	1
350	7.47E+13	43.64	8.94E+18	1
400	1.38E+12	38.18	3.82E+16	1
450	6.17E+10	33.94	5.49E+14	1
500	5.14E+09	30.55	1.84E+13	1
550	6.74E+08	27.77	1.15E+12	1
600	1.24E+08	25.45	1.13E+11	1

Fuente: elaboración propia.

Por último, se tiene la reacción entre el gas amoniacal y ácido nítrico para producir nitrato de amonio, así como en las dos anteriores reacciones se sigue el procedimiento planteado en el Anexo L, donde se describe el procedimiento para cada uno de los compuestos y resultados encontrados.

Reacción 6. Reacción para producir Nitrato de amonio.



Para las distintas temperaturas planteadas se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 13. Resultados a diferentes temperaturas nitrato de amonio.

Temperatura(K)	K_0	$\ln K_a$	K_a	Conversión
300	1.56E+17	37.52	1.98E+16	1
350	5.46E+14	32.16	9.30E+13	1
400	7.85E+12	28.14	1.67E+12	1
450	2.90E+11	25.02	7.32E+10	1
500	2.07E+10	22.51	6.00E+09	1
550	2.39E+09	20.47	7.74E+08	1
600	3.95E+08	18.76	1.41E+08	1

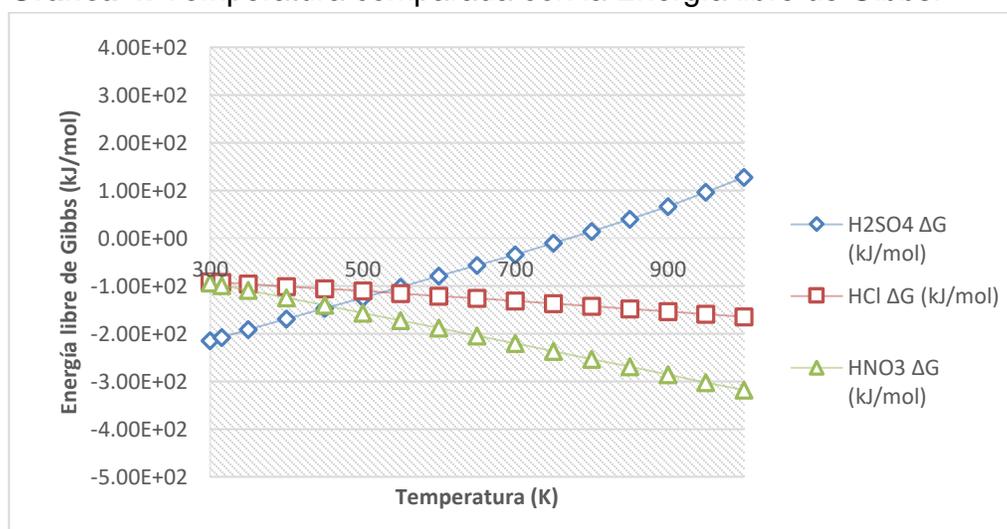
Fuente: elaboración propia.

Con el fin de poder hacer una comparación más ágil de la energía libre de Gibbs de las diferentes reacciones se procede a realizar una gráfica de temperatura vs ΔG .

A partir de los anteriores estudios, se notó que el K_0 no vario relativamente con lo encontrado, es por esto por lo que no se considera relevante en los estudios presentados.

En los siguientes gráficos, tendremos en cuenta la simbología de reacción 1, para el ácido sulfúrico para producir sulfato de amonio, la reacción 2 nos indica el ácido clorhídrico para formar cloruro de amonio y la reacción 3 nos indica el ácido nítrico para producir nitrato de amonio.

Gráfica 4. Temperatura comparada con la Energía libre de Gibbs.

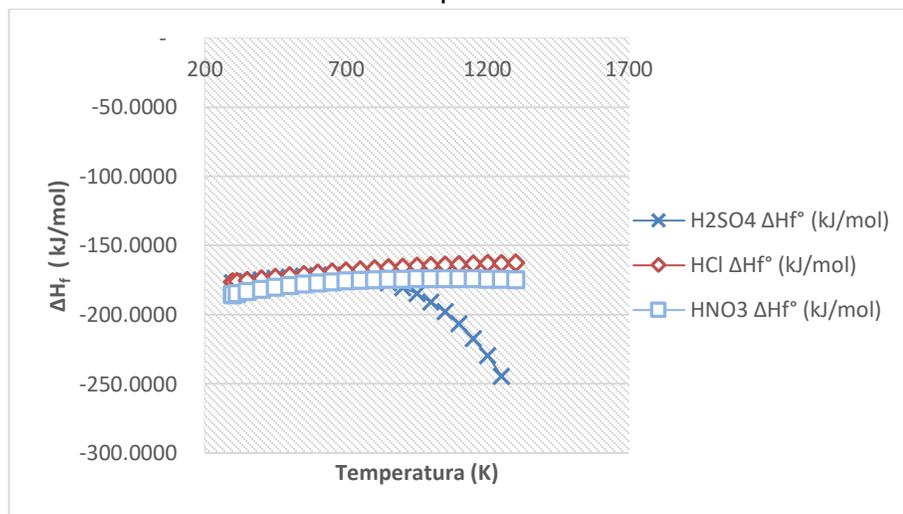


Fuente: elaboración propia.

En la gráfica anterior se puede notar que la reacción que se produce con mayor espontaneidad es la del ácido sulfúrico, esto da un indicio de la reacción que se debe tomar, sin embargo, este no es el único factor para tener en cuenta por tanto se procede a realizar una matriz de selección evaluando otro tipo de factores como costos y viabilidad.

Por otra parte, se realiza el cálculo de la entalpía de formación con el fin de determinar si la reacción es endotérmica o exotérmica, además de conocer la magnitud del calor liberado o absorbido por ella. Por esto se hace el cálculo de dicho calor para cada reacción, mediante el uso de la entalpía de formación de cada reactivo y producto, estas entalpías se corrigen mediante el calor específico y las ecuaciones semi empíricas planteadas en la literatura, es importante resaltar que el valor de las constantes a diferentes temperaturas utilizadas en dichas ecuaciones se toma de la página web “Knovel”, los resultados de dichos cálculos se muestran en la gráfica 5.

Gráfica 5. Calor de formación para cada una de las reacciones.



Fuente: elaboración propia.

A partir de esta grafica se puede observar que la reacción que desprende menor cantidad de calor es la reacción, 2 y 3 es muy similar, sin embargo, la reacción 1 tiene un aumento de temperatura o disminución de entalpía siempre que pase de los 800 K este para el ácido sulfúrico, esto indica que no es una variable para tomar en cuenta, por esto, es considerado una variable que no afecta en el proceso drásticamente entre los compuestos seleccionados.

3.1.1.1 Matriz de selección. Para seleccionar el absorbente más adecuado se utilizará el método de Kepner-Tregoe, esta medida está diseñada con el fin de dar valores a los datos suministrados y seleccionados, además de permitir seleccionar a partir de ciertos criterios, cada absorbente se evaluará bajo cinco criterios: costo, eficiencia, factibilidad, operatividad y tiempo.

- **Costo:** Es importante destacar bajos costos en el momento de la selección de materiales, equipos, implementación, operación y/o mantenimiento; de la misma manera tener en cuenta la eficiencia al momento de ejecutarse en el proceso. La evaluación por costos mide todos estos parámetros teóricos y permite su selección por este criterio. En este punto se decidió las calificaciones de $\text{H}_2\text{SO}_4 = 3$, $\text{HCl} = 3.5$ y $\text{HNO}_3 = 2$.
- **Viabilidad:** se debe tener en cuenta la disponibilidad de los recursos, tanto de la empresa como de los tesisistas o encargados del proyecto, adicional se debe tener en cuenta que la operación sea sencilla, que no dependa de información adicional ni capacitación, ni de un incremento en el personal solo para llevar a cabo el tratamiento o control del agua residual. A partir de esto se tuvo las valoraciones de $\text{H}_2\text{SO}_4 = 4.5$, $\text{HCl} = 4.3$ y $\text{HNO}_3 = 4.0$.
- **Eficiencia:** Para este criterio es importante medir las opciones de rendimiento de cada reacción; además, es el encargado de medir en qué nivel de cumplimiento se encuentra con respecto a los costos, es decir, mide que porcentaje del desarrollo puede ser ejecutado y realizado; a partir de esto se decidió una valoración de $\text{H}_2\text{SO}_4 = 4.5$, $\text{HCl} = 4.0$ y $\text{HNO}_3 = 4.0$.
- **Tiempo:** El tiempo en este proyecto estará regido por el utilizado al momento de realizar las gestiones de trámites internos para la empresa Aluica S.A.S. como en las operaciones unitarias desarrolladas en el proceso, como el tiempo de implementación y puesta en marcha de este. Para este se decidieron unas valoraciones de $\text{H}_2\text{SO}_4 = 3$, $\text{HCl} = 3$ y $\text{HNO}_3 = 4$.

Para el desarrollo de la matriz de selección, se realizó un escalado de importancia a partir de los criterios de calificación; a partir de estos criterios constituidos en el Anexo M, se explican los resultados mostrados en la siguiente Tabla 13.

Tabla 14. Evaluación de las alternativas consideradas.

Criterio	Calificación (%)	Alternativas Consideradas		
		SO ₄	Cl	NO ₃
Costo	35	3	3.5	2
Viabilidad	20	4.5	4.3	4.0
Eficiencia	30	4.5	4	4
Tiempo	15	3	3	4
Promedio		4.1	3.735	3.3

Fuente: elaboración propia.

Se le dio una valoración a cada uno de los criterios, resultados que se pueden observar en la Tabla 14, es importante resaltar que los valores dados a cada compuesto fueron de acuerdo con lo estudiado internamente junto a los coordinadores en la empresa, fuentes bibliográficas y condiciones internas de la empresa; esta selección únicamente fue desarrollada para los compuestos; debido a que, según el compuesto, debe ser elegido el material de la torre.

Finalmente se realiza la sumatoria de los distintos valores otorgados a los reactivos y se determina el ácido sulfúrico (SO₄), como el más viable para el proceso que se realizará. Pudiendo desarrollar el sistema de absorción para el vapor de agua residual amoniacal, esto para darle solución a la problemática teniendo en cuenta opinión de la empresa. El complementario a las calificaciones se encuentra en el Anexo M.

3.1.2 Selección del equipo de absorción. Teniendo en cuenta que el compuesto escogido anteriormente es un reactivo corrosivo y su capacidad calorífica se procede a seleccionar el equipo de absorción.

3.1.2.1 Selección del tipo de columna. Según Perry⁷⁵ la columna empacada sería pertinente para este proceso ya que se manejará un diámetro pequeño, sin embargo y para este caso, se decide seleccionar una torre de platos ya que, según el mismo autor⁷⁶, esta es preferible desde el punto de vista económico; además de esto teniendo en cuenta que la velocidad del gas a la salida de la torre de desorción no es muy alta la torre de platos sería adecuada para evitar dispersión axial o

⁷⁵ PERRY, Hobert H. and GREEN, Don W. Perry: manual del ingeniero químico. Tomo IV (6a. ed.). México, D.F: McGraw-Hill Interamericana, 1992.

⁷⁶ PERRY, Hobert H. and GREEN, Don W. Perry: manual del ingeniero químico. Tomo IV (6a. ed.). México, D.F: McGraw-Hill Interamericana, 1992

“bombeo” del gas hacia la parte inferior de la columna.⁷⁷; en general se prefiere, según el mismo autor debido a la eficiencia y caída de presión, además de esto el flujo de líquido no será alto debido al costo y a posibles problemas de seguridad y salud en el trabajo que se puedan manejar con el manejo del absorbato que será un ácido fuerte.⁷⁸

3.1.2.2 Selección del tipo de plato. En la bibliografía se habla de que el número de platos teóricos o etapas en el equilibrio en una columna o torre sólo depende de lo complicado de la separación que se va a llevar a cabo y sólo está determinado por el balance de materia y las consideraciones acerca del equilibrio⁷⁹; Con base en esto, se opta por la selección del tipo de plato, en la figura 10 se muestra la diferencia de la eficiencia global de diferentes tipos de platos, correspondiente a el número de etapas teóricas dividido por el número real de platos en una columna, se procede a seleccionar el plato adecuado para el proceso.

En la figura 10 tenemos la relación, eficiencia global comparada con la velocidad superficial del vapor, (V_G) expresada en pies sobre segundo; adicional la densidad del vapor o del gas en sistemas alcohol-agua o similares (ρ_G), expresados en libras sobre pie cúbico.

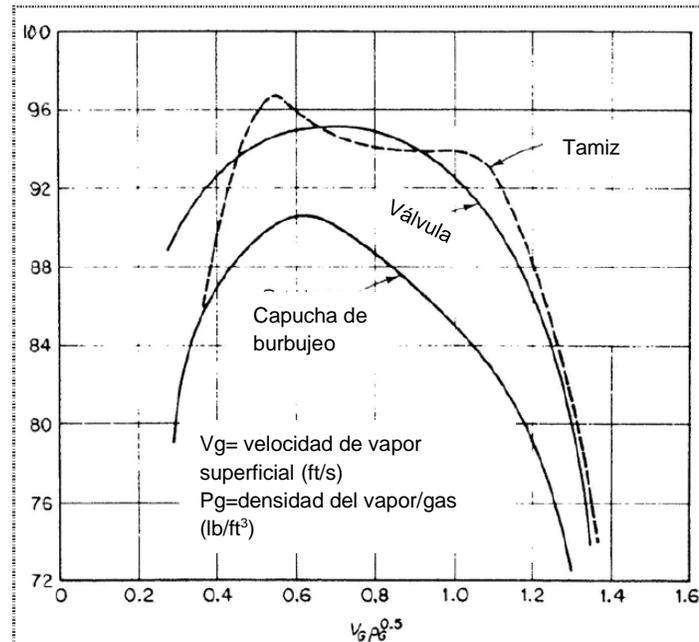
⁷⁷ PERRY, Hobert H. and GREEN, Don W. Perry: manual del ingeniero químico. Tomo IV (6a. ed.). México, D.F: McGraw-Hill Interamericana, 1992.

⁷⁸ Universidad Nacional del Sur. Diseño de equipos e instalaciones [0]. [Consultado el 11 de Noviembre, 2019]. Disponible en:

http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivos/curzoz/05___columnas_de_contacto.pdf

⁷⁹ TREYBAL, ROBERT E. Operaciones con Transferencia de Masa. Edición Revolucionaria, La Habana, 1985. Págs. 179-180.

Figura 10. Eficiencia global de diferentes platos, función de densidad y vapor.



Fuente. PLANT DESIGN AND ECONOMICS FOR CHEMICAL ENGINEERS Peters and Timmerhaus Chapter 16 “MASS TRANSFER AND REACTOR EQUIPMENT...”. McGraw Hill. 1991.

Con base en la anterior grafica se puede evidenciar que los platos más eficientes son el de tamiz y el de válvula, sin embargo, son diseños que requieren mayores inversiones, además de ser difíciles de construir internamente en la empresa, por tal razón, aunque no es la mejor opción en comparación en eficiencia global se escoge el plato por barboteo o tapa de burbuja. Es importante tener en cuenta que se va a perder presión debido a la altura del líquido sobre la abertura del gas, es por esto por lo que en la tabla 14 se muestran los valores más comunes de pérdida de presión por plato para plato por barboteo.

Tabla 15. Valores razonables de pérdida de presión.

Presión total	ΔP por plato
30 mmHg	≤ 3 mmHg
1 atm	0.07÷0.12 psi
300 psi	0.15psi

Fuente. PROCESS COMPONENT DESIGN. P. Buthod & all, Capítulo 10 y 11. Universidad de Tulsa. Oklahoma.

Esto va a permitir aproximarnos a la caída de presión que se va a presentar el sistema de absorción. Es importante resaltar que el diseño de la tapa circular de los capuchones y del tubo saliente del orificio, el rango de tamaño esta entre 4 y 7 entendiendo como modelo estándar de tamaño 6 in de tapa y 4 in del tubo saliente del orificio.⁸⁰

3.1.2.3 Diámetro de columna. Con el fin de aumentar el contacto liquido-gas, evitar la inundación o la suspensión del líquido en el gas se calcula un diámetro teniendo en cuenta el parámetro de velocidad del gas en la columna y la suficiencia que tiene la sección transversal para manejar los gases ascendentes sin un transporte excesivo de líquido de una bandeja a otra, además de tener en cuenta heurísticas de diseño, donde recomiendan una similitud en la torre de desorción y absorción.⁸¹

3.1.2.4 Selección de materiales. Teniendo en cuenta las características de los reactivos a utilizar, teniendo como parámetros, la temperatura, conversión en la reacción y además poder ser una estructura que permita la observación del reactivo; además teniendo como base la elección tomada en estudios previos⁸² se escoge el acrílico como material para el cilindro, ya que es un material plástico capaz de soportar largos periodos de tiempo a la intemperie, no es atacado por ácidos fuertes o débiles, ni por álcalis fuertes o débiles, además de esto soporta temperaturas de

⁸⁰ Universidad Nacional del Sur. Diseño de equipos e instalaciones [0]. [Consultado el 11 de noviembre 2019]. Disponible en:

http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/05___columnas_de_contacto.pdf

⁸¹ Universidad Nacional del Sur. Diseño de equipos e instalaciones [0]. [Consultado el 11 de noviembre 2019]. Disponible en:

http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/05___columnas_de_contacto.pdf

⁸² FERNANDEZ, Juan. PROPUESTA PARA EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL PROCESO DE NITRURACIÓN EN LA EMPRESA ALUICA S.A.S. Fundación Universidad de América, 2018

hasta 96°C⁸³, además de esto se escoge dicho material frente al PVC debido a que este último se consigue en el mercado en medidas estándar, la cual ninguna se aproxima o corresponde a la necesitada, además de esto el diseño de cilindros en PVC en tamaños personalizados es más costoso que en acrílico y no se existe una gran oferta en el mercado de los mismos. Por otra parte, se escoge como materiales para tuberías y válvulas hechas en PVC (policloruro de vinilo) ya que es un material muy duradero y resistente al ataque corrosivo de los diferentes químicos.

3.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL.

A continuación, se plantea el protocolo que permitirá evaluar el diseño para dar disposición final a la emisión generada por el proceso de desorción mediante una columna de platos por capuchones o borboteo.

La experimentación tiene como objetivo determinar la eficiencia de remoción de nitrógeno amoniacal de una corriente gaseosa y la cantidad producida de sulfato de amonio, mediante la evaluación de distintas concentraciones del ácido y tiempos de retención determinados.

3.2.1 Descripción del prototipo de torre de absorción. Para la elaboración del prototipo se tienen en cuenta heurísticas de diseño y construcción, como principal el principio de semejanza⁸⁴ a partir de estos, se decide construir un prototipo de torre de absorción, el cual cuenta con 18 cm de diámetro y una altura de 54 cm (siguiendo escala de desorción 3:1) y un espesor de pared de 4 mm (mismo grosor del sistema de desorción), está fabricado en acrílico transparente debido a las propiedades descritas anteriormente y la ventaja de permitir observar que ocurre en el interior de la columna durante el proceso.

La columna cilíndrica desarrollada contiene un agujero en la parte superior en el cual se adhirió un tubo de PVC de aproximadamente 5 cm de largo, pegado a un tapón de $\frac{3}{4}$ de pulgada perforado con el fin de poder verter el ácido desde la parte superior hasta el plato sin correr riesgo de salpicadura hacia el operario. Para la construcción del plato se decide realizar un soporte en acrílico con 9 agujeros donde se pegan tubos en PVC de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro y 5 cm de alto a los cuales se le

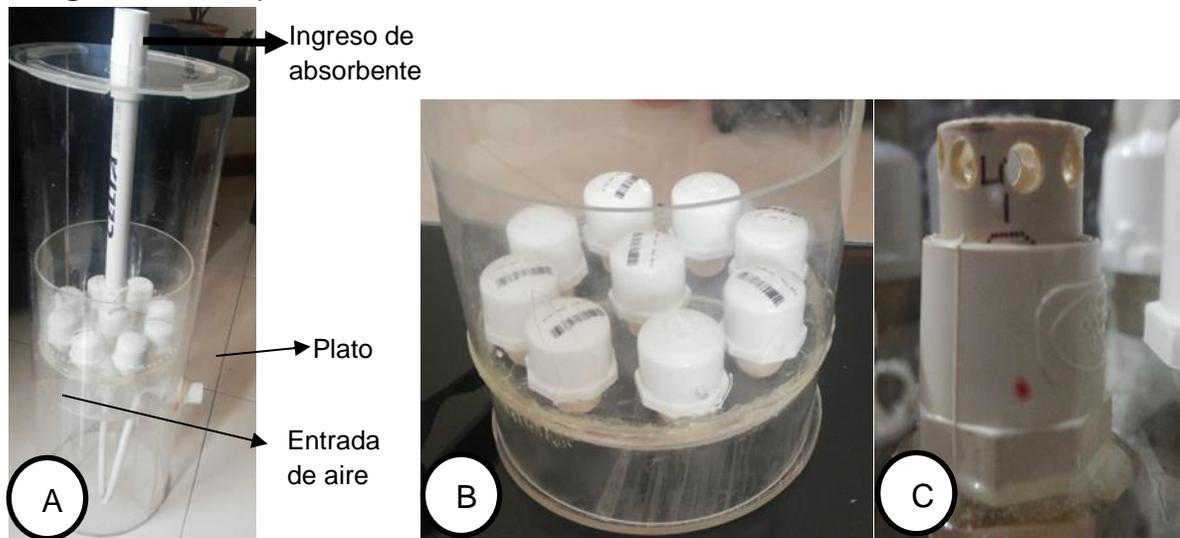
⁸³ ideplas. FICHA TÉCNICA LAMINA PMMA (ACRILICO) [0]. [Consultado el 10 de noviembre 2019]. Disponible en: <http://www.ideplas.com/lamina-pmma.pdf>

⁸⁴ Francisco Javier Pérez Urbano, Escalado de una Torre de Absorción, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla, 2016.

realizan agujeros en la parte superior, además de esto se le adhieren tapones de $\frac{3}{4}$ de pulgada en la parte superior con el fin de simular la tapa del capuchón; además de esto se realiza una cámara de aire adherida a la parte inferior del soporte del plato y un cilindro agujerado a 2 cm de alto pegado a la parte superior del soporte del plato. Es importante resaltar que en el medio de la columna se realiza un agujero para la entrada de la emisión de la columna de desorción y en la parte inferior de la columna un agujero que servirá de eliminador del residuo líquido de la columna. En la imagen 9 se muestra la fisionomía del plato y la columna de absorción.

En la imagen 9 a se muestra el prototipo completo de aspecto, las entradas y las salidas de la torre; en la imagen 9 b se muestra el diseño del plato, con los capuchones, hechos de PVC con acoples y tubería de media pulgada; en la imagen 9 c se muestra el diseño interno del acople para el paso del aire.

Imagen 9. Prototipo de columna de absorción.



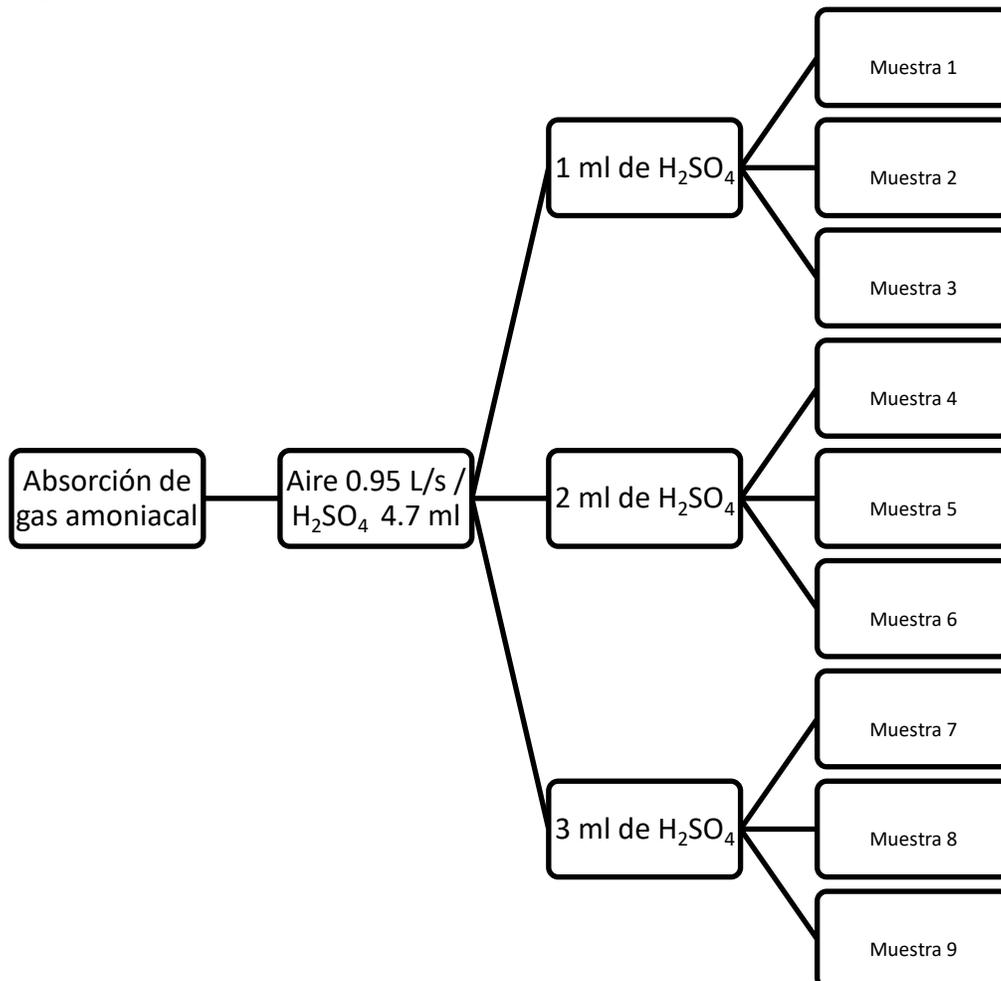
Fuente: elaboración propia.

3.2.2 Protocolo de experimentación. La experimentación evalúa y compara la eficiencia de remoción de amoníaco de una corriente gaseosa a través de un ácido a 1.5% v/v, 1% v/v y 5% v/v, que para este caso será ácido sulfúrico, por esta razón se decide realizar el cálculo de una concentración base teórica por medio de la estequiometría de la reacción con el fin de determinar la concentración teórica óptima para el sistema. Al tener definido el valor teórico se decide escoger una concentración menor y otra mayor al valor de referencia con el fin de determinar el comportamiento de la reacción a distintas concentraciones de ácido sulfúrico y

conseguir el valor más adecuado para el proceso. Es importante resaltar que los valores obtenidos para la concentración de ácido sulfúrico serán un aproximado, ya que la dilución del ácido y la medición de la concentración se harán de forma manual.

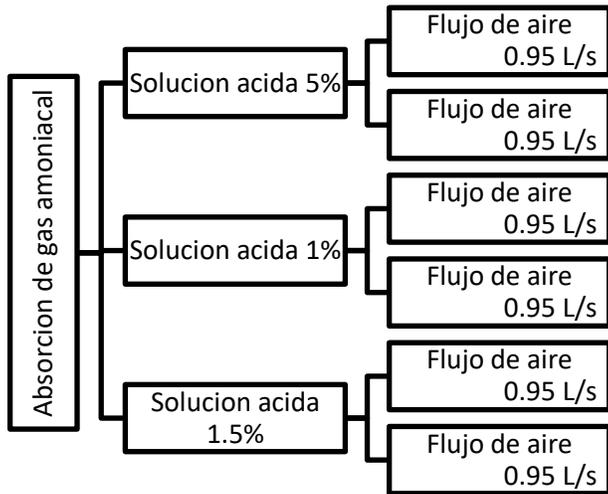
Mediante el proceso de experimentación se realizó el procedimiento adecuado con el objetivo de evaluar las decisiones tomadas y fueron comparados la capacidad del absorbente como solución a estos gases, para esto se evaluó dos concentraciones diferentes, respectivamente 1.5% v/v, 1% v/v y 5% v/v a flujo máximo de agua para el sistema de desorción, para obtener los mejores resultados posibles, estas soluciones fueron realizadas con base de 100 ml de la solución de agua-ácido, y luego insertadas al plato de absorción.

Figura 11. Protocolo de experimentación por cada muestra.



Fuente: elaboración propia.

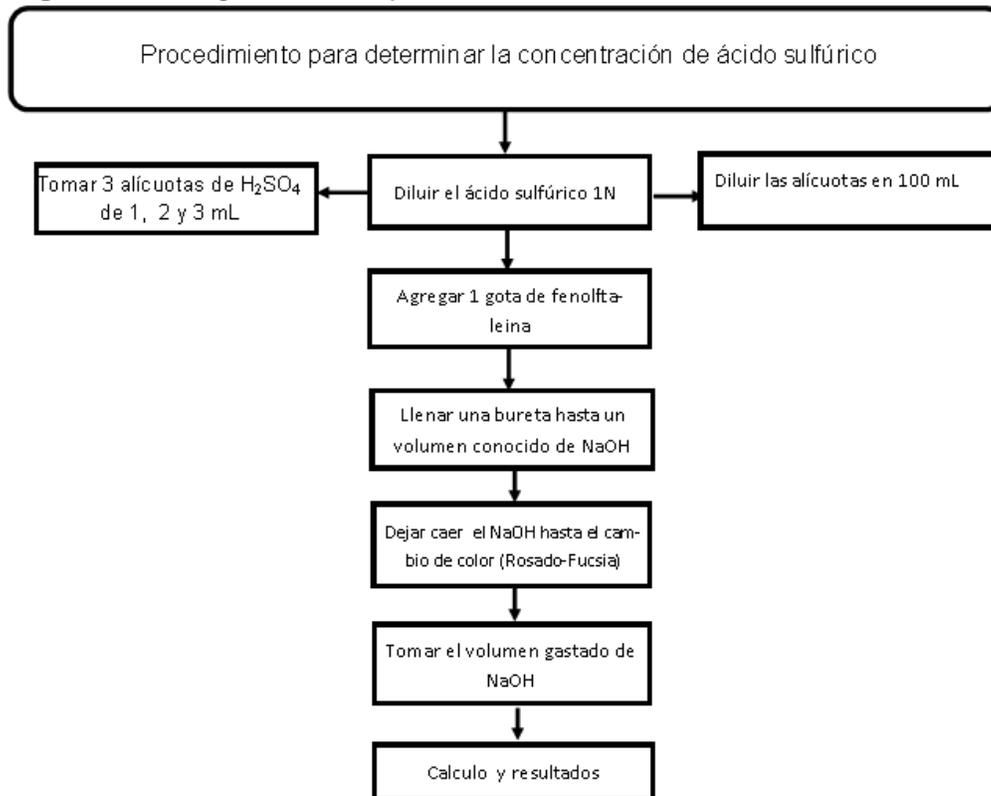
Figura 12. Flujos de aire para las concentraciones con repetibilidad.



Fuente: elaboración propia.

En primera instancia se hará la dilución del ácido sulfúrico al 50% en 100 mL de agua destilada; se utilizó agua destilada con el fin de obtener los mejores resultados, además de evitar contacto con metales fuertes que se manejan en la empresa y son vertidos al sistema, sin embargo no afecta el uso de agua potable, siempre y cuando sea de una fuente confiable; la concentración se determina con una titulación mediante hidróxido de sodio (NaOH) al 1N (Normal), en la siguiente figura se muestra el diagrama de flujo para llevar a cabo dicha titulación.

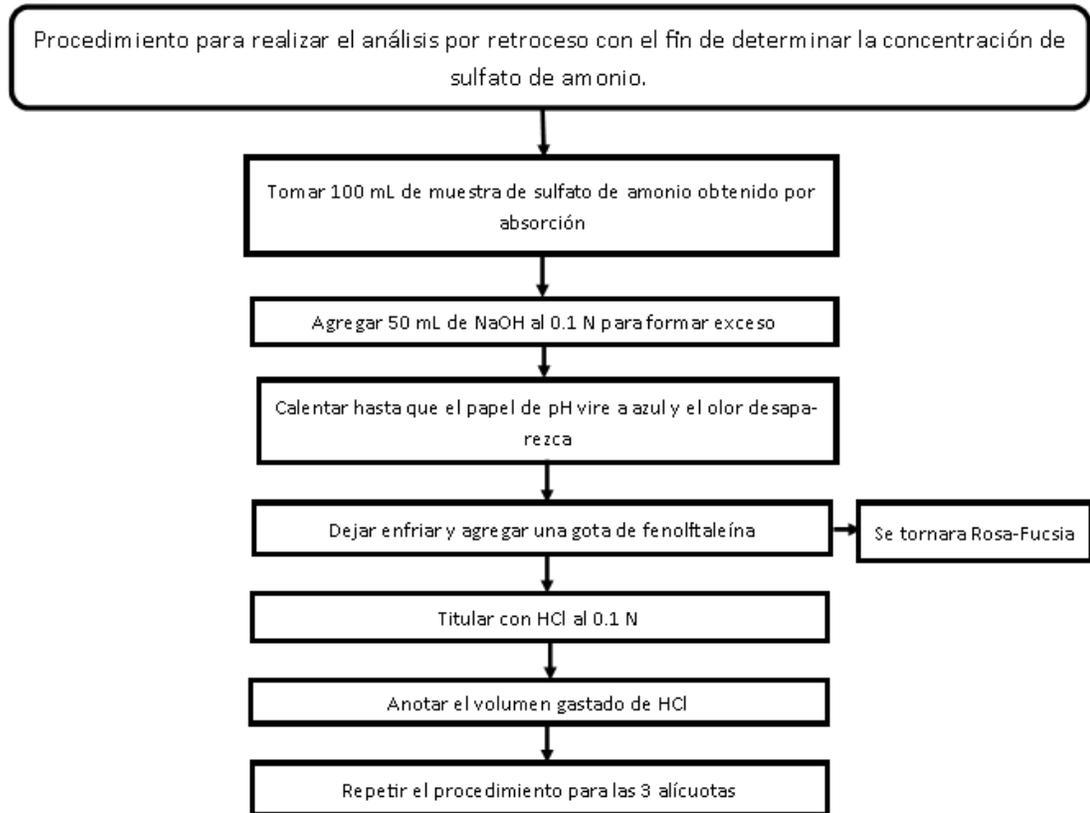
Figura 13. Diagrama de flujo de titulación.



Fuente: elaboración propia.

Con el valor de la concentración en la dilución se procede a ingresar el líquido en el plato descrito en la sección 3.2.1., con el líquido en el plato y la columna ubicada cerca al proceso de nitruración; en primer lugar, se inicia el proceso de desorción con la columna llena de empaques y haciendo fluir agua y aire dentro de la torre, se espera a que el sistema se estabilice, alrededor de 5 minutos, y se conecta el sistema de absorción, el aire con nitrógeno amoniacal fluye a través de la cámara de aire y el plato de la columna de absorción, generando burbujas en el líquido, el olor a la salida de la torre de absorción será diferente al olor característico del amoníaco y este deberá ser inofensivo para el medio ambiente y las personas del lugar. La distinción del olor se hará mediante pruebas organolépticas. El ácido sulfúrico se dejará en contacto con el aire amoniacal por al menos 10 minutos, al pasar este tiempo se procede a sacar una muestra con la nueva solución a cierta cantidad de sulfato de amonio. Para determinar la concentración de sulfato de amonio presente en el líquido se procede a realizar un análisis por retroceso, en la figura 14 se muestra el procedimiento para realizar dicho análisis.

Figura 14. Determinación de la concentración de sulfato de amonio.



Fuente: elaboración propia.

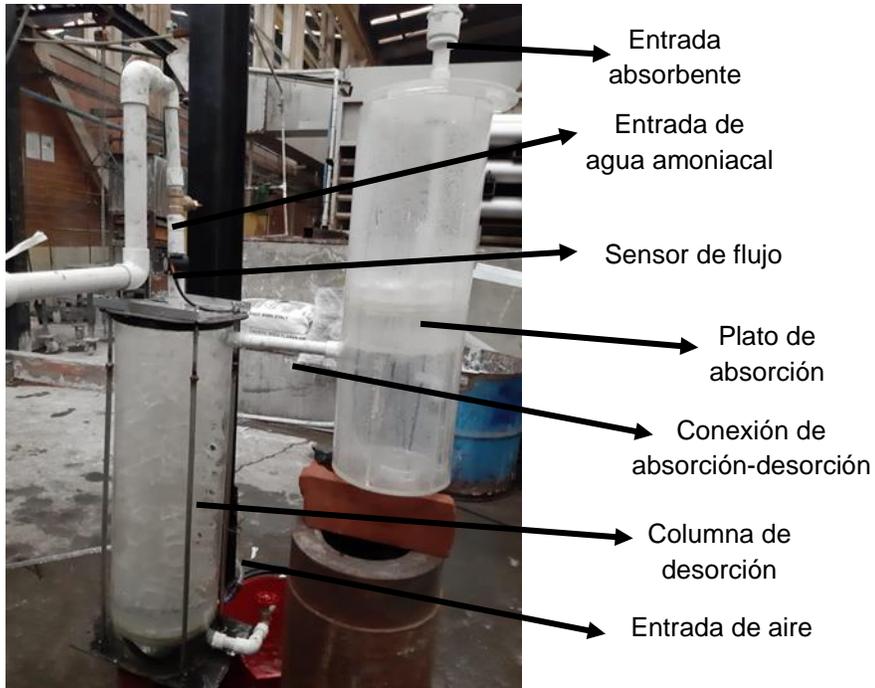
En la Imagen siguiente, se muestra la instalación de las torres de absorción y desorción en la planta, conectadas a la salida de agua de nitruración o agua amoniacal; además se muestra la conexión entre torres del sistema absorción-desorción, la salida de agua tratada entrada de aire y agua; adicionalmente los dispositivos de control utilizados como los son las válvulas y el sensor de flujo, además de la entrada de compuesto absorbente, en este caso, el ácido; la presión del sistema de desorción se elevará al conectar la columna de absorción ya que el plato y la disolución genera resistencia al paso del aire.

Imagen 10. Conexión del sistema desorción – absorción parte frontal.



Fuente: elaboración propia.

Imagen 11. Conexión del sistema desorción – absorción parte posterior.

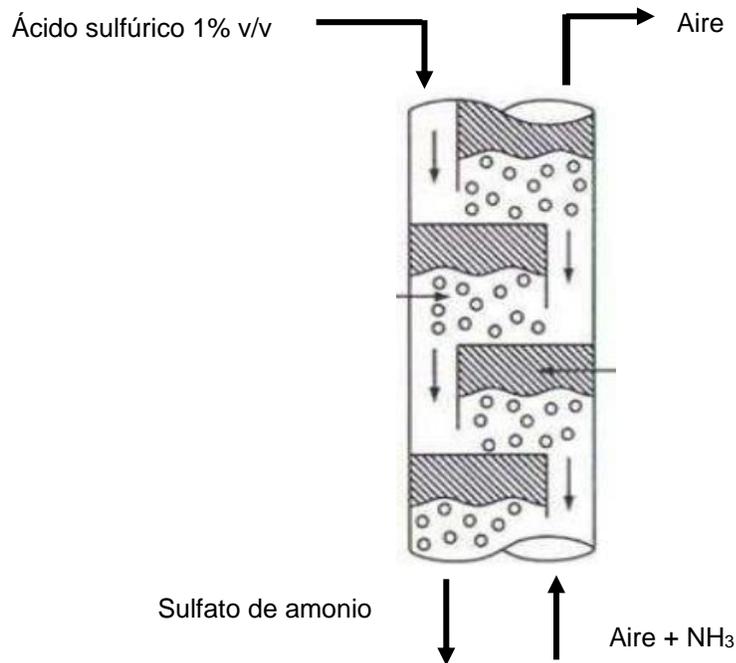


Fuente: elaboración propia.

3.2.3 Ejecución experimental. Con el fin de obtener la concentración más adecuada de ácido sulfúrico para el proceso se procede a realizar un cálculo de estequiometría simple con los datos obtenidos a la salida del proceso de desorción, en la figura 12 se ilustran las corrientes involucradas en el proceso de absorción.

Los cálculos detallados para la obtención del valor óptimo de ácido sulfúrico que se debe agregar a la dilución, la cual se ingresa en el plato de la torre en el proceso de absorción se denotan en el Anexo N, donde se evidencian que dicho valor equivale a 4.637 ml, sin embargo, no se llega a tomar dicho valor ya que la sustancia es controlada por entidades estatales (ministerio de justicia) y el uso adicional en réplicas de esta sustancia a nivel experimental puede generar problemas a nivel administrativo.

Figura 15. Corrientes involucradas en el proceso de absorción.



Fuente: elaboración propia, con base en. Torre de Platos Perforados.⁸⁵

Al consultar con el coordinador de seguridad y salud en el trabajo, recomienda evitar que los operarios manejen dicha cantidad de ácido sulfúrico. Cuando ya se tenga la

⁸⁵ Extracción líquido-líquido. [consultado el 20 de noviembre de 2019] disponible en :<http://procesosbio.wikispaces.com/Extracci%C3%B3n+líquido-líquido>

disolución, se ingresa al plato, en primera instancia se hace una prueba para determinar en qué tiempo aproximado la disolución cambia su pH, para esto a la disolución se le agrega una gota de fenolftaleína, la variación de color ocurre después de 6 minutos, sin embargo, se decide dejar cada una de las disoluciones por 10 minutos; tiempo en el que se ve el cambio de color más fuerte con titulación dentro del sistema de absorción; ya que la solución que viro en 6 minutos solamente contenía 1 ml de ácido sulfúrico, es importante indicar que se garantiza la concentración de amoniaco a la entrada de la torre, disponiendo la torre de desorción a las mismas condiciones que dieron la mayor eficiencia de remoción.

Teniendo en cuenta lo anterior se procede a realizar el proceso de absorción, se calcula la temperatura del aire de entrada mediante el anemómetro y el mismo parámetro se mide a través de la columna por medio del tacto ya que no se cuenta con un pirómetro en la empresa, además de esto se evidencia la entrada de presión al sistema mediante la generación de burbujas en la disolución de ácido. Se coloca cada una de las disoluciones de ácido sulfúrico en el plato, esperando los 10 minutos y vaciando el mismo. Cuando ya se obtuvieron todas las muestras se procedió a realizar un análisis por retroceso, el cual consiste en agregar a la muestra 50 ml de NaOH con el fin de tener un exceso de base, seguido a esto se hace un proceso de calentamiento hasta que los gases tengan un pH neutro y el olor característico a amoniaco desaparezca, después se agrega fenolftaleína, la muestra tornará de color rosa- fucsia; para este proceso el titulante será ácido clorhídrico HCl el cual se agrega a una bureta, se procede a agregar a las muestras hasta que desaparezca el color rosa-fucsia, por último se anota el volumen de HCl gastado. Para calcular la concentración de sulfato de amonio presente en la muestra, se tiene como guía un ejemplo de valoración por retroceso⁸⁶.

3.2.4 Resultados procedimiento experimental. Teniendo en cuenta lo anterior se realizan los cálculos para determinar los gramos de sulfato de amonio obtenidos en el análisis, en la tabla 15 se muestran los resultados del proceso.

⁸⁶ RUIZ MOLINA, Joaquin. Ejemplo de un análisis por retroceso, determinación del sulfato de amonio presente en una muestra comercial [0]:Granada, España: 2008.

Tabla 16. Resultados experimentales.

Cantidad de la solución	1 ml de H₂SO₄	2 ml de H₂SO₄	3 ml de H₂SO₄
N° eq HCL	5.6E-03	1.5E-03	5.2E-04
N° eq NaOH	4.8E-03	4.8E-03	4.8E-03
N° eq NH ₄	-8.6E-04	3.3E-03	4.2E-03
Gramos de (NH ₄) SO ₄	0.0570	0.2186	0.2809
Desviación estándar	0.0445	0.0685	0.0025

Fuente: elaboración propia.

A partir de esto se concluye que la mejor concentración para la dilución es la obtenida al utilizar 3 ml ya que es capaz de producir en promedio 0.2809 gramos de sulfato de amonio, la cual es la más cercana a la calculada teóricamente en el anexo N, es importante resaltar que la cantidad de sulfato de amonio producida en 10 minutos y con esas concentraciones de ácido sulfúrico no son muy altas, sin embargo se comprueba que la absorción se produce y se puede dar una correcta disposición a las emisiones del proceso de absorción.

En este capítulo se obtuvo un diseño físico estándar para la realización del proceso de absorción a escala piloto con el fin de dar correcta disposición a la emisión generada en el proceso de desorción, además se encontró la concentración teórica de ácido sulfúrico y se evaluó la eficiencia de absorción de tres concentraciones distintas, a partir de esto se determinó la mejor.

4. CONDICIONES TÉCNICAS DEL SISTEMA

En el siguiente capítulo se plasmarán las diferentes condiciones técnicas, junto con un análisis dimensional del sistema, balances de masa y energía, y condiciones de seguridad y manejo para los distintos reactivos y subproductos formados en el proceso.

4.1 BALANCE DE MASA PROCESO DE DESORCIÓN

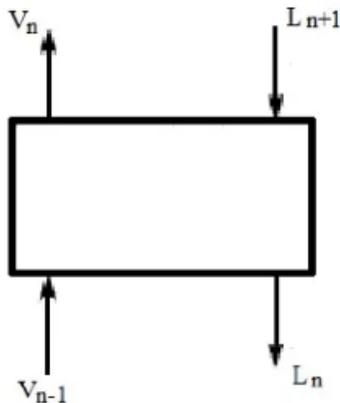
Este cálculo permite contabilizar la entrada y salida de masa⁸⁷ del proceso de desorción, además de esto es útil para el cálculo del tamaño de los equipos y por ende evaluar sus costos.⁸⁸

En la siguiente figura se observa una etapa de equilibrio n , con dos fases entrantes:

- L_{n+1} : equivalente a la corriente líquida de entrada (composición X_{n+1}).
- V_{n-1} : equivalente a la corriente gaseosa de entrada (composición Y_{n-1}).
- L_n : equivalente a corriente líquida salida (composición X_n).
- V_n : equivalente a la corriente gaseosa de salida (composición Y_n).

A partir de estos, se obtiene una ecuación de balance global:

Figura 16. Esquema balance global.



Fuente. Daniel Pautt, balance de materia en torre de absorción-desorción.⁸⁹

⁸⁷ Deiana; GRANADOS, Lucia and SARDELLA, fabiana. Capitulo IV, Balance de masa [0]:2018

⁸⁸ Deiana; GRANADOS, Lucia and SARDELLA, fabiana. Capitulo IV, Balance de masa [0]:2018

⁸⁹ Daniel Pautt, Balance de materia en torre de absorción-desorción, [consultado el 20 de noviembre de 2019] disponible en: https://www.academia.edu/10772397/BALANCE_DE_MATERIA_EN_TORRE_DE_ABSORCION

Teniendo en cuenta lo anterior y la ecuación 1 se realiza el balance global del sistema.

Ecuación 1. Balance global de materia.

$$\begin{aligned}L_{n+1} + V_{n-1} &= V_n + L_n = M \\V_{n-1} - L_n &= V_n - L_{n+1}\end{aligned}$$

En donde

- X_{n+1} = fracción molar del componente transferible en la fase líquida que sale de la etapa n+1.
- X_n = fracción molar del componente transferible en la fase líquida que sale de la etapa n.
- y_{n-1} = fracción molar del elemento transferible en la fase gaseosa que sale de la etapa n.
- y_n fracción molar del elemento transferible en la fase gaseosa que sale en la etapa n.

Con la ecuación anterior y los datos de flujos obtenidos experimentalmente, se tiene, $L_{n+1}= 0.072569$ l/s; $V_{n-1}=0.37$ l/s; $L_n=0.103$ l/s, se realiza el paso de litros a kilogramos para desarrollar correctamente el balance global y por componente del sistema. Es importante resaltar que la temperatura del aire está en aproximadamente en 26°C, y aunque el aire es un gas compresible para efectos de experimentación y cálculos se toma la capacidad del compresor.

Ecuación 2. Balance de masa por componente.

$$\begin{aligned}L_{n+1}X_{n+1} + V_{n-1}y_{n-1} &= V_n y_n + L_n X_n \\V_{n-1}y_{n-1} - L_n X_n &= V_n y_n - L_{n+1}X_{n+1}\end{aligned}$$

Es importante resaltar que existe pérdidas tanto de presión como de fugas del sistema, esto debido al manejo de la alta presión dentro del sistema, el acrílico como material solo puede llegar a manejar una presión de hasta 11 libras⁹⁰, es decir cerca de 50 pascales por metro cuadrado. A partir de esto se obtienen unas pérdidas tanto de aire como de agua adicional, de aproximadamente 27%, esto debido a diferentes

⁹⁰ Zoraida Morales, Alberto Morales, (2019) propiedades del acrílico, "acrílicos y policarbonatos" COYOACÁN, 04369, CDMX; Disponible en: <http://www.acrilico-y-policarbonato.com/acrilico-propiedades.html>

fugas que se puedan presentar en las columnas ya sea por fisuras generadas por desgaste o defectos de fabricación, además de esto se pueden presentar fugas de agua principalmente en la tubería de conexión entre equipos.

A partir del balance de masa por componente y teniendo en cuenta los flujos, se determinan las composiciones en las corrientes de 1015.1 (mg/L) de amoníaco de entrada y 445.8 (mg/L) de amoníaco en la corriente de salida; además se caracterizó cada corriente:

Ecuación 3. Caracterización de la corriente L_{n+1} desorción.

$$L_{n+1} = 0.072569 \frac{l}{s} = 0.065311 \frac{l}{s} (H_2O) + 0.007378 \frac{l}{s} (NH_3)$$

$$L_{n+1} = 0.997 \frac{kg}{l} \times 0.065311 \frac{l}{s} (H_2O) + 0.00073 \frac{kg}{l} \times 0.007378 \frac{l}{s} (NH_3)$$

$$L_{n+1} = 0.06512069 \frac{kg}{s} = 0,065115 \frac{kg}{s} (H_2O) + 5.3865E - 06 \frac{kg}{s} (NH_3)$$

Ecuación 4. Caracterización de la corriente V_{n-1} desorción.

$$V_{n-1} = 0.37 \frac{l}{s} = 0.37 \frac{l}{s} (aire)$$

$$V_{n-1} = 0.001225 \frac{kg}{l} \times 0.37 \frac{l}{s} (aire)$$

$$V_{n-1} = 0.00045325 \frac{kg}{s}$$

Para la caracterización de la corriente líquida de salida del sistema de desorción se tiene en cuenta la difusión de aire en el agua, es decir las micro burbujas capaces de ser arrastradas por las corrientes de agua.

Ecuación 5. Caracterización de la corriente L_n desorción.

$$L_n = 0.072569 \frac{l}{s} = 0.065088 \frac{l}{s} (H_2O) + 0.00324052 \frac{l}{s} (NH_3) + 0.0043614 \frac{l}{s} (aire)$$

$$L_n = 0.997 \frac{kg}{l} \times 0.065088 \frac{l}{s} (H_2O) + 0.00073 \frac{kg}{l} \times 0.00324052 \frac{l}{s} (NH_3)$$

$$+ 0.001225 \frac{kg}{l} \times 0.0043614 \frac{l}{s} (aire)$$

$$L_{n+1} = 0.06512 \frac{kg}{s}$$

$$= 0.06511 \frac{kg}{s} (H_2O) + 5.3865E - 06 \frac{kg}{s} (NH_3) + 4.45E - 06 \frac{kg}{s} (aire)$$

Se realiza el cálculo para conocer las composiciones de la corriente gaseosa, esto mediante el balance de masa, además de componente de amoniaco. La corriente V_{n-1} solo es considerada como aire ya que es la corriente gaseosa proveniente del compresor del cual dispone la empresa.

Ecuación 6. Balance global de materia para V_n desorción.

$$\begin{aligned}
 V_{n-1} - L_n &= V_n - L_{n+1} \\
 V_{n-1} - L_n + L_{n+1} &= V_n \\
 0.00045325 \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 0.06490 \frac{\text{kg}}{\text{s}} + 0.0651206 &= V_n = 0.000673417 \frac{\text{kg}}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta los datos obtenidos anteriormente se realiza el cálculo con el fin de determinar la composición de amoniaco, estos datos se dan en flujo másico, para después hallar su porcentaje o mg/l, además de obtener la entrada al siguiente proceso.

Ecuación 7. Balance de masa por componente de amoniaco para desorción.

$$\begin{aligned}
 V_{n-1}y_{n-1} - L_nX_n + L_{n+1}X_{n+1} &= V_n y_n \\
 0 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \times 0 \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 2.3655\text{E} - 06 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 0.4861 + 5.38\text{E} - 06 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 0.4861 \\
 &= 3.02\text{E} - 06 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times y_n \\
 0.2661104 &= y_n
 \end{aligned}$$

Obteniendo así una fracción molar de 0.26611, con una composición de amoniaco de aproximadamente de 569.3 mg y un flujo de 0.000003 kg/s del mismo compuesto. Se realizaron los mismos procedimientos para cada uno de los compuestos, obteniendo los datos de salida siguientes.

Tabla 17. Valores obtenidos en V_n por compuesto desorción.

Compuesto	Moles	Porcentaje	Flujo (l/s)	Flujo (Kg/s)	Flujo (mol/s)
Aire	28.966	0.988212432	0.000223158	0.000222489	1.236E-05
Amoniaco	17.03	0.011184437	0.004138242	3.02092E-06	1.7739E-07
Agua	18	0.000603131	0.3656386	0.000447907	1.5463E-05
Flujo	-	-	0.37	0.000673417	2.8001E-05

Fuente: elaboración propia.

A partir de los valores obtenidos anteriormente observamos que en la salida de aire del sistema de desorción obtenemos un porcentaje de arrastre de agua en la salida, debido a que el agua se dispersa en gotas lo suficientemente pequeñas que el flujo de aire es capaz de arrastrar, y esto permitiendo su paso al sistema de desorción, sin embargo este tiene un bloqueo tipo airlock, (sistema que permite el paso de aire pero no de líquidos) evitando así el arrastre del líquido al sistema de absorción.

4.2 BALANCE DE MATERIA DEL PROCESO DE ABSORCIÓN.

A partir de los datos obtenidos, los resultados ofrecidos demuestran una composición de casi el 100% de aire, acompañados con trazas de amoníaco y agua, sin embargo, aún es perceptible el amoníaco, debido a que se puede detectar desde los 5ppm⁹¹, se evaluaron además 3 concentraciones diferentes para el absorbente, sin embargo, primero se determinó cuáles serían los platos ideales para el sistema con compuesto absorbente puro, a condiciones establecidas.

Se realizó el balance respectivo como se mostró anteriormente, teniendo en cuenta el sistema mostrado en la figura 13, donde se encuentran L_{n+1} , V_{n-1} , L_n , y V_n .

Tabla 18. Flujos estequiométricos.

Reacción: $2\text{NH}_3(\text{g}) + \text{H}_2\text{SO}_4(\text{l}) \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$			
Compuesto	Peso (g/mol)	Flujo estequiométrico (kg/s)	
2NH_3	34.062	3.0209E-06	flujo entrada
H_2SO_4	98.079	8.6985E-06	flujo entrada
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	132.14	1.1719E-05	

Fuente: elaboración propia.

Con estos flujos estequiométricos y al considerar que la reacción, cuenta con una espontaneidad bastante alta, se considera que todo lo entrante reacciona, teniendo en cuenta esto se considera necesario un flujo estequiométrico de 6.46e^{-6} kg/s, con este flujo se realizó el respectivo balance, como se muestra en la sección 4.1. Se realizaron los cálculos respectivos obteniendo los valores mostrados en la tabla 18.

⁹¹ Universidad Nacional Autónoma de México. Hoja de seguridad Amoníaco. [0]. México. [Consultado el 25 de noviembre, 2019]. Disponible en: <https://quimica.unam.mx/wp-content/uploads/2016/12/18amoniaco.pdf>

Ecuación 8. Flujo másico a molar.

$$\begin{aligned} \text{para amonio: } (H_2SO_4): & 3.0209E - 06 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 34.02 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \times \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}} \\ & = 1.0277E - 07 \frac{\text{mol}}{\text{s}} NH_3 \\ \text{para acido: } & 8.6985E - 06 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 98.079 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \times \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}} = 8.531815E - 07 \frac{\text{mol}}{\text{s}} H_2SO_4 \end{aligned}$$

Adicional se determinó el flujo para los compuestos de ácido y de amonio entrantes, mostrados anteriormente.

Tabla 19. Valores obtenidos para V_n por compuesto absorción.

Compuesto	Moles	Porcentaje	Flujo (kg/s)	Flujo (mol/s)
Amoniaco	17.03	0.007300876	3.02E-06	1.02E-07
Aire	28.96	0.998394335	4.49E-04	1.55E-05
Flujo	-	-	4.49E-04	1.55E-05

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos se calcularon los platos teóricos requeridos, estos principalmente se realizaron, a partir de las composiciones de vapor y líquido de cada uno de los compuestos, se observa que además la separación o eliminación de amoniaco de forma estequiométrica muestra una efectividad del 80%, debido a que entra con un 0.008% y sale con un porcentaje cercano al 0.001%, evaluando un paso de absorción a partir del equipo mostrado anteriormente.

Se utilizó el cálculo de entrada de ácido sulfúrico a partir de la máxima concentración para la mayor conversión, a diferencia que en la experimentación se utilizó 1ml, es decir 0.5% v/v, sin embargo, al no notar una efectividad clara, se utilizó una concentración de 2ml, de ácido sulfúrico al 50% p/p, es decir una concentración de 1% v/v.

Con estos datos se determinan las relaciones de flujos o la entrada en moles de los compuestos a analizar, en este caso, amoniaco y ácido sulfúrico.

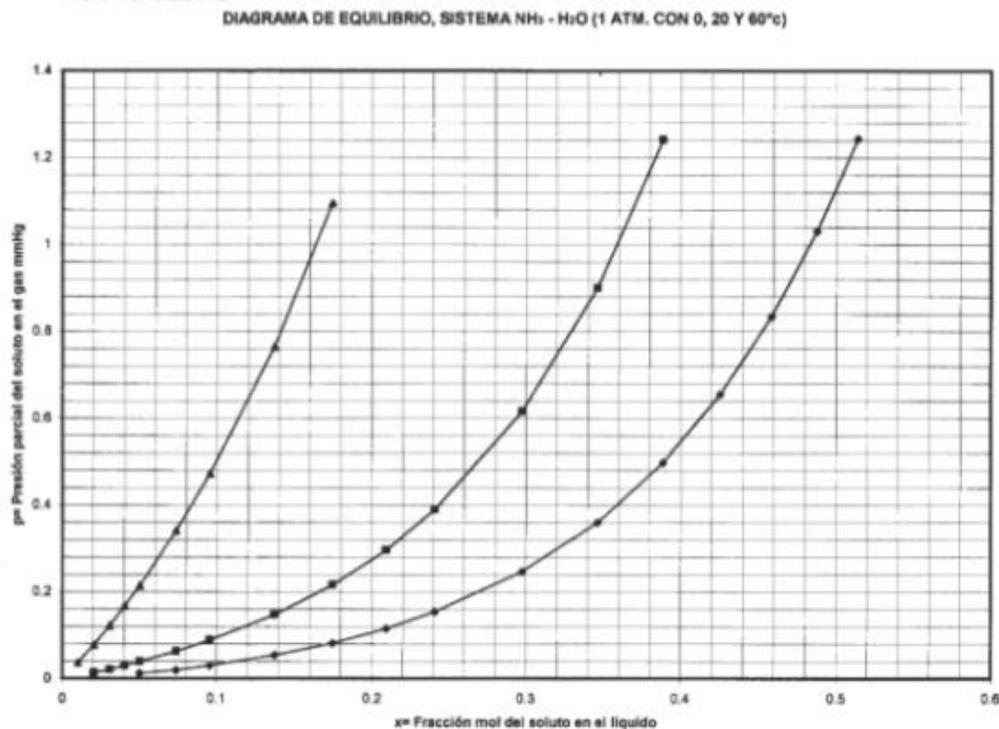
Ecuación 9. Relación de flujos de amoniaco y ácido sulfúrico.

$$\frac{1.0277E - 07 \frac{\text{mol}}{\text{s}} NH_3}{1.0277E - 07 \frac{\text{mol}}{\text{s}} NH_3 + 8.531815E - 07 \frac{\text{mol}}{\text{s}} \text{acido sulfurico}} = 0.11$$

Teniendo en cuenta esta relación, se desea entonces una relación de ácido-amoniaco de 9-1, es decir por cada unidad de amoniaco necesitamos 4 de ácido en términos de flujos estequiométricos; sin embargo, a partir de los balances encontramos que este flujo de amoniaco es más bajo, por lo cual necesitaríamos de un flujo de ácido igual de bajo; este flujo de ácido rondaría los $2.277E-8$ de ácido sulfúrico para $2.53e-8$ de amoniaco obtenido en los balances; obteniendo entonces como resultado que el amoniaco es nuestro reactivo limite además de la necesidad de evaluar la eficiencia de cada plato.

Seguido a esto se elaboró las relaciones de vapor-liquido, a partir de simuladores como aspen y datos encontrados en bibliografía; es necesario este diagrama con el fin de analizar qué tan fácil se realizará la absorción o separación del sistema, adicional estos diagramas permiten los cálculos de platos teóricos a partir de equilibrio liquido-vapor; estos equilibrios se tienen si el sistema se encuentra en condiciones ideales; se realizó la búsqueda del equilibrio liquido-vapor.

Grafica 6. Diagrama de equilibrio, sistema NH_3 -agua.



Fuente: UNIVERSIDAD VERACRUZANA FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS INGENIERÍA QUÍMICA ABSORCIÓN PERÍODO: agosto 2008/Feb 2009 Profr.: Mtro. Ernesto Gallardo Castán Poza Rica, Ver., viernes 01 de agosto del 2008.

Como resultado del gráfico observamos que el simulador nos arrojó tanto línea de operación, como de equilibrio, permitiendo desarrollar los pasos siguientes para este proceso, como lo son la determinación de platos teóricos, altura de torre y condiciones del sistema; estos se estudiarán en el siguiente capítulo; adicionalmente se estudiará el dimensionamiento básico del sistema de absorción a partir de este gráfico y de los balances realizados anteriormente en este capítulo.

4.3 BALANCE DE ENERGÍA DEL SISTEMA

Con el fin de realizar el balance de energía global se tiene en cuenta los componentes de entrada y salida del sistema, de acuerdo con esto, no se tuvo en cuenta el gasto energético del compresor, adicional, no se utilizará la influencia del aire sobre el proceso, debido a que se considera inerte.

El cambio de entalpía del sistema se calcula mediante el uso del calor específico junto con las ecuaciones semi empíricas planteadas en la literatura, además de esto se hace uso de las constantes de dichas ecuaciones pertenecientes a distintas temperaturas, teniendo en cuenta los resultados del cálculo del calor de reacción el sistema es exotérmico debido a su valor negativo, sin embargo, no es un calor de reacción lo suficientemente alto para elaborar un sistema de refrigeración a escala laboratorio. Es importante resaltar que a escala industrial se debe tener en cuenta dicho valor, para la realización de la columna con los materiales adecuados y las medidas de seguridad necesarias.

4.4 DIMENSIONAMIENTO BÁSICO DEL SISTEMA.

Se decide entonces realizar un dimensionamiento para determinar cuál sería la altura y diámetro ideal para este proyecto; además de platos ideales a partir de los flujos establecidos anteriormente.

4.4.1 Dimensionamiento básico del sistema de desorción. Con el fin de llevar la concentración de amoníaco a la salida del proceso de desorción a 244 mg/L, este valor se toma basado en los niveles permisibles para vertimientos promedio al alcantarillado en la red mundial,⁹² realiza una proyección de datos basados en

⁹² Concentraciones de referencia para los vertimientos industriales realizados a la red de alcantarillado y de los vertimientos industriales y domésticos efectuados a cuerpos de agua de la ciudad de Bogotá. : Bogotá: 2009.

distintas fuentes bibliográficas⁹³⁹⁴. En primera instancia en la tabla 20 se muestran los datos iniciales para el proceso, estos son obtenidos a partir de la experimentación en la torre a escala laboratorio, cabe resaltar que la altura empacada hace referencia a el tamaño de la columna realizada a escala laboratorio para la desorción, además de esto la sección empacada y la superficie específica de empaque son valores dados por el proveedor de los anillos Pall utilizados en la torre a escala laboratorio.

Tabla 20. Valores iniciales para el diseño.

Parámetro	Valor
Flujo másico del líquido (kg/s)	0.07235
Altura empacada (m)	0.6
Elimina satisfactoriamente (m ³ /s)	5.881
Diámetro de la columna (m)	0.2
Sección empacada (m)	0.05
Superficie específica de empaque (a) m ² /m ³	3800
Velocidad másica del aire (L) (kg/s m ²)	142.332

Fuente: elaboración propia.

En primera instancia se calcula la tasa mínima de humectación planteada por Morris and Jackson. En la siguiente ecuación se muestra el cálculo.

Ecuación 10. Tasa mínima de humectación.

$$\frac{L}{a} = \frac{142.332 \frac{kg}{s m^2}}{3800 \frac{m^2}{m^3}} = 0.0375 \frac{kgm^3}{s}$$

Según bibliografía la relación de escala para el diámetro del empaque no debe exceder 3, o preferiblemente 2, lo último daría una tasa de humectación en el prototipo 2.84 veces que en el modelo⁹⁵. Es por esto por lo que la relación del diámetro es el siguiente.

⁹³ DURAND, Alejandro and FLORES, Humberto. Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina. p. 31-39

⁹⁴ WOOLDRIDGE THRING, Meredith and EDGEWORTH JOHNSTONE, Robert. Pilot Plants, Model.s and scale up methods in chemical engineering. McGraw Hill Book Company INC, 1957. 173-190 p.

⁹⁵ WOOLDRIDGE THRING, Meredith and EDGEWORTH JOHNSTONE, Robert. Pilot Plants, Model.s and scale up methods in chemical engineering. McGraw Hill Book Company INC, 1957. 173-190 p

$$d = \frac{0.508 \text{ m}}{0.05 \text{ m}} = 10.16$$

Seguido a esto se procede a calcular la relación entre HTU (altura de una unidad de transferencia) y HETP (altura de una placa teórica) con el fin de determinar la nueva altura de la torre.

Ecuación 11. Relación Htu y Hetp.

$$HTU_l \sim HETP_l (d)^{0.5}$$

$$0.6 \text{ m} (10.16)^{0.5} = 1.9125 \text{ m}$$

A partir de esto se procede a calcular la velocidad de la masa del aire, el cual es el que retira la concentración de amoniaco presente en el agua.

Ecuación 12. Velocidad de la masa de aire.

$$L = 2.5 * 0.0375 \frac{\text{kg m}^3}{\text{s}} * 3800 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3} = 356.25 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Conservando la misma relación de flujo de la columna piloto se tiene que la velocidad del flujo del agua es:

Ecuación 13. Relación de la columna.

$$\frac{5.8 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * \frac{356.25(\text{kg})}{\text{s m}^2}}{0.0723 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} = 28558.57 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{s}}$$

Con estos datos se obtiene el valor de sección transversal de la siguiente forma.

Ecuación 14. Sección transversal.

$$\frac{7 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 356.25 \frac{\text{Kg}}{\text{s m}^2}}{28558.57 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{s}}} = 0.08732 \text{ m}^2$$

Con la sección transversal y el valor del área de un círculo se calcula el radio.

Ecuación 15. Área del círculo.

$$ST = \pi r^2$$
$$r = 0.166 \text{ m}$$
$$d = 0.33 \text{ m}$$

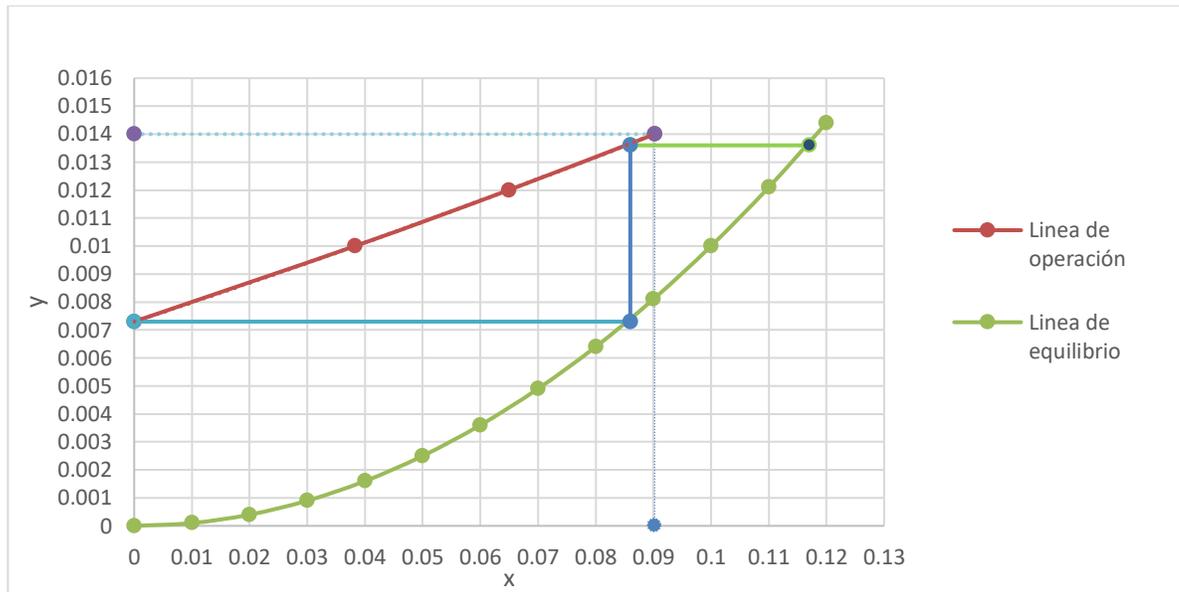
Con esto se puede decir que para llegar a tener una concentración de salida de 244 mg/l en el proceso de desorción se debe tener una altura de 1.9125 m y un diámetro de 0.52 m.

4.4.2 Platos teóricos. Con el fin de obtener los platos necesarios a partir de los balances obtenidos, se calculó el mínimo de platos con la mejor absorción, con base a esto, se obtendrá el diseño óptimo para el sistema de absorción; se elaboraron los platos iniciando con las condiciones.

Se decide utilizar el método McCabe Thiele debido a que la absorción es considerado método similar a la destilación; además de ser un método simple para el desarrollo de este tipo de problemas, depende además de la fracción molar de uno de los dos compuestos a analizar, teniendo además varios supuestos, como los son los efectos de calor despreciables y que por cada mol de líquido en vapor, es necesario condensar una mol de vapor; dicho esto se procede con este método y el grafico mostrado anteriormente, ver grafica 6.

Se realiza el primer plato teniendo como objetivo inicial el ingreso de ácido, para esto se utilizó el valor de relación inicial de 0 y 0 como composición inicial; punto siguiente el valor obtenido en la relación de flujos, el cual se obtuvo como resultado de 0.66 hasta el punto de la línea de equilibrio, y este punto hasta el punto máximo encontrado, debido a que la curva de operación es muy recta después de la composición 0.08; esto se realizó y se obtuvo el siguiente resultado.

Grafica 7. Platos teóricos.



Fuente: elaboración propia.

Se tiene que los mejores resultados fueron 1.16, es decir 2 platos teóricos, ver anexo N; esta línea de equilibrio y operación se desarrollaron con una concentración de ambos compuestos en estado estequiométrico puro.

4.4.3 Determinación de platos con base en la experimentación. Para la determinación de platos requeridos, se realizará el análisis de eficiencia de plato a partir de la eficiencia de Murphree, esta consiste en la determinación de platos a partir del factor de absorción y la relación de los puntos AB/BC equivalente al E, estos son descritos desde la línea de operación, hasta la curva de equilibrio y la diferencia entre la recta descrita; el factor de absorción está dado por $A=L/mG$ descrita como la relación de la línea de operación y la línea de equilibrio líquido – gas. Este procedimiento se realizará junto a la eficiencia total. Ver anexo R.

4.4.4 Altura de la columna y eficiencia de plato. Para el cálculo de eficiencia se inicia con la suposición que el líquido en cada plato se encuentra mezclado totalmente y que el vapor saliente del plato se encuentra en equilibrio con el líquido. En la práctica una condición de equilibrio completo no existe, debido a la necesidad de una cantidad finita de fuerzas de impulso, debido a esto se obtiene la definición de eficiencia:⁹⁶

⁹⁶ PERRY, Hobert H. and GREEN, Don W. Perry: manual del ingeniero químico. Tomo IV (6a. ed.). México, D.: McGraw-Hill Interamericana, 1992

Ecuación 16. Eficiencia de platos.

$$E = \frac{N_{real}}{N_{actual}} = \frac{\left(\log \left(1 + Emge \left(\frac{1}{A} - 1 \right) \right) \right)}{\left(\log \left(\frac{1}{A} \right) \right)}$$

$$E = \frac{\left(\log \left(1 + 0.33 \left(\frac{1}{0.75} - 1 \right) \right) \right)}{\left(\log \left(\frac{1}{0.75} \right) \right)} = 0.3627$$

$$E = \frac{2 \text{ platos}}{0.3627} = 5.5 \text{ platos}$$

Obtenemos entonces una eficiencia del 35%, para un total de 6 platos necesarios para lograr una correcta absorción, sin embargo, si aumentamos el 20% de estimación o sobre diseño obtendríamos un aproximado de 7 platos necesarios para una absorción total.

En base a lo anterior se procede a realizar el cálculo necesario para la altura torre, se determina experimentalmente que la altura equivale a 0.1 m, y que se recomienda un espaciado entre platos de 0.1 m⁹⁷. En la siguiente ecuación se muestra el cálculo a realizar para el cálculo de la altura.

Ecuación 17. Cálculo de la altura de la torre.

$$\text{Altura torre} = (0.1m + 0.15 m) * 7$$

Con lo anterior se determina que la altura ideal de la torre corresponde 1.75 m, basados en Saracco⁹⁸ se mantiene la relación de diámetros entre el proceso de desorción y absorción lo cual nos da como resultado una torre con un diámetro de 0.33 m.

En la tabla 21 se muestra un resumen de las dimensiones obtenidas para cada una de las torres.

⁹⁷ TREYBAL, ROBERT E. Operaciones con Transferencia de Masa. Edición Revolucionaria, La Habana, 1985.

⁹⁸ SARACCO, G. and GENON, G. High temperature ammonia stripping and recovery from process liquid wastes. En: JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS. vol. 37, no. 1, p. 191-206

Tabla 21. Resumen de las dimensiones de la torre.

Parámetro	Valor
Columna de desorción	
Altura (m)	1.995
Diámetro (m)	0.333
Columna de absorción	
Altura (m)	1.75
Diámetro (m)	0.33

Fuente: elaboración propia.

A partir de estos estudios realizados podemos obtener una torre de desorción con altura de 1.995 metros con un diámetro de 0.333 metros; adicional obtenemos una columna de desorción con una altura de 2.2 metros, junto con 11 platos internos y su respectivo espaciado entre platos; este espaciado fue determinado a partir de datos prácticos, teniendo en cuenta un espaciado de 15 cm entre platos y una altura de plato de aproximadamente 10 cm, con un diámetro de 0.33 metros. Este escalado preliminar se obtiene a partir de los resultados obtenidos en experimentación, balances de masa y heurísticas de diseño.

Los resultados obtenidos en la desorción son dependientes de las composiciones de amoníaco de el mismo día, las cuales pueden llegar a variar según lo nitrurado; adicional, el compuesto absorbente se calculó con las mismas composiciones salientes de la desorción lo cual pueden cambiar de acuerdo con la misma función variable, es decir la cantidad de nitrurado o cantidad de amoníaco que se realice.

5. COSTOS DE OPERACIÓN Y FABRICACIÓN DEL SISTEMA

5.1 COSTOS DE OPERACIÓN

A partir de este paso, se calcula el gasto generado por las diferentes fuentes energéticas o equipos que se necesitan para diseñar, operar y generar la limpieza, adicionalmente, los compuestos utilizados en la limpieza y el salario del trabajador que se encarga de operar nitruración, que en este caso será quien le hará el mantenimiento al tratamiento.

5.1.1 Costos energéticos. Aluica S.A.S. actualmente posee compresor, motobomba y mangueras, la manguera encargada de enviar el agua al tanque auxiliar, una motobomba encargada de la generación de corriente de agua y compresor encargado de generación de aire, en la Tabla 21 presenta la potencia en Hp, kW y precio por kW de cada una de estas.

Tabla 22. Costo generado por bombas y equipos.

Equipo	Potencia (Hp)	Potencia (w)	Costo por KW
Motobomba	1 HP	750	\$ 438
Compresor	2 HP	1500	\$ 438

Fuente: elaboración propia.

Seguido a esto, se determina el costo generado por las horas en función a su utilización. Se estima que el sistema dure en funcionamiento alrededor de 5 horas, ya que estas son las horas en las cuales se inyectan amoniaco en el proceso de nitruración, además de esto este proceso se lleva a cabo durante 2-3 días a la semana por lo cual los gastos generados por la motobomba están dados por la siguiente ecuación.

Ecuación 18. Costos generados por bomba.

$$MotoBomba = \frac{0,750 \text{ kw}}{h} \times \frac{5 \text{ hora}}{\text{dia}} \times \frac{3 \text{ dia}}{\text{semana}} \times \frac{4 \text{ semanas}}{1 \text{ mes}} = \frac{45 \text{ kW}}{\text{mes}}$$

$$Bomba = \frac{45 \text{ kW}}{\text{mes}} \times \frac{\$438}{\text{kW}} = \frac{\$19710}{\text{mes}}$$

Es por esto por esto que en total la bomba genera un costo mensual de \$19710 (COP). Por otro lado, es importante considerar los costos generados por el compresor, en la planta existe un compresor el cual abastece a todos los puntos de aire comprimido, es por lo que se decide realizar los cálculos de operación a partir del tiempo en el cual el sistema de desorción estará recibiendo una entrada de aire comprimido lo cual es alrededor de 5 horas.

Ecuación 19. Costos generados por maquinarias para lavado.

$$\text{Compresor} = \frac{1.5 \text{ kw}}{h} \times \frac{5 \text{ hora}}{\text{dia}} \times \frac{3 \text{ dia}}{\text{semana}} \times \frac{4 \text{ semanas}}{1 \text{ mes}} = \frac{90 \text{ kW}}{\text{mes}}$$

$$\text{Compresor} = \frac{90 \text{ kW}}{\text{mes}} \times \frac{\$438}{\text{kW}} = \frac{\$39420}{\text{mes}}$$

Es por esto por lo que en total el compresor genera un costo mensual de \$39420.

A partir de los cálculos anteriores, se determina el costo generado por servicios de operación, debido a que el sistema no depende de intercambiadores de calor ni bombas adicionales para flujos o extractores, se considera una alternativa económica para el proceso. En la tabla 22 se muestran los totales producidos por estos dos equipos.

Tabla 23. Costos generados por los equipos.

Equipo	Costos de operación al mes
Bomba	\$19,710
Compresor	\$39,420
Total	\$59,130

Fuente: elaboración propia.

5.1.2 Costos por compuestos. En el proceso de nitruración se utilizan compuestos como el amoniaco y agua, estos no serán considerados dentro de los cálculos, en cambio tendremos en cuenta el ácido sulfúrico utilizado en el proceso de absorción, compuesto utilizado en la absorción. Es importante resaltar que la cantidad de ácido sulfúrico teórico que se debe utilizar para cada proceso de absorción es de alrededor de 5 ml es por esto por lo que se calcula el costo de ácido sulfúrico de la siguiente forma.

Ecuación 20. Costos de ácido sulfúrico.

$$\text{\$ Ácido sulfurico} = \frac{5 \text{ ml}}{\text{día}} \times \frac{3 \text{ dias}}{\text{semana}} \times \frac{4 \text{ semana}}{\text{mes}} \times \frac{0.5283 \text{ \$}}{\text{ml}} = \$ 31.698$$

Se tiene un valor de 31.698 COP como gasto en el reactivo necesario para el proceso de absorción.

5.1.3 Costos por operarios. Nitruración es actualmente es operada por dos operarios, sin embargo, es considerado que depende de solo uno para el mantenimiento y servicio del sistema de absorción-desorción. En la tabla 23, se muestra el salario mensual del operario, aproximadamente se depende de unas 6 horas de atención al sistema.

Tabla 24. Salario del operario.

Trabajador	Salario mensual
Operario	\\$1'461.000

Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, este operario tiene oficios o tareas adicionales, es por esto por lo que su salario es dividido en las funciones, el monitoreo y mantenimiento del sistema de absorción y desorción requiere de aproximadamente 20 horas a la semana, es por esto que su salario se divide de la siguiente manera; en la ecuación 21 se verá el gasto en tiempo de atención, que genera el operario.

Ecuación 21. Cálculo de costo hora del operario.

$$\frac{\$1461000 \text{ meses}}{26 \text{ días}} \times \frac{3 \text{ día}}{6 \text{ horas}} = \frac{\$5620}{\text{hora}}$$

$$\$5620 \times 20h \times 4semanas = \$449600$$

Es por esto, que el costo adicional del operario seria aproximadamente de \$449600 (COP).

Es por esto por lo que los costos obtenidos en total están calculados de la siguiente manera.

Ecuación 22. Total, de reactivos, operativo y energía.

$$total = \text{gasto energetico} + \text{gasto operativo} + \text{gasto de productos} = \frac{\$}{\text{mes}}$$

$$total = \$39420 + \$449600 + \$31698 = \frac{\$520.718}{\text{mes}}$$

5.2 COSTOS DEL SISTEMA DESORCIÓN-ABSORCIÓN

En el siguiente apartado se calcularán los costos para el sistema desorción y absorción inicialmente y seguido a esto se realizará un consolidado de los datos obtenidos.

5.2.1 Costos columna desorción. En cuanto a la columna de desorción necesaria para eliminar satisfactoriamente 7 m³/s de amoníaco del sistema, se tiene la necesidad de un controlador, 1 fuente de alimentación, 1 pantalla LCD, 1 sensor de flujo de agua, 1 electroválvula, 1 sensor de flujo de aire, 1 sensor de temperatura, 1 válvula de control de aire y agua, 1 red de agua, 1 red neumática, 1 cilindro envolvente, 1 difusor de aire y empaques esto para unas dimensiones de aproximadamente 2 m de altura y 0.33 m de diámetro. Los costos de dicha columna se ven reflejados en la siguiente tabla.

Tabla 25. Costos generados por la columna de desorción.

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo por unidad	Costo total
	controlador	und	1	\$ 299,000	\$ 299,000
	Fuente de alimentación	und	1	\$ 52,955	\$ 52,955
	Pantalla LCD	und	1	\$ 64,480.00	\$ 64,480
Sistema de control	Sensor de flujo de agua + electroválvula	und	1	\$ 41,583	\$ 41,583
	Cables	und	10	\$ 6,615	\$ 66,150
	Sensor de flujo de aire	und	1	\$ 143,000	\$ 143,000
	Sensor de temperatura	und	1	\$ 70,000	\$ 70,000

Tabla 25. (Continuación)

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo por unidad	Costo total
	Válvulas de control de aire	und	2	\$ 171,500	\$ 343,000
	Válvulas de control de agua	und	5	\$ 120,000	\$ 600,000
	Red para agua	m	25	\$ 5,500	\$ 137,500
Sistema de transporte de líquido y gas	Red neumática	m	250	\$ 6,000	\$ 1,500,000
	Sistema para muestreo	und	1	\$ 70,000	\$ 70,000
	Manguera de aire de ingreso al sistema.	m	12	\$ 8,500	\$ 102,000
Hora hombre	Operario	hora	40	\$ 9,134	\$ 365,360
	Cilindro envolvente	m	2	\$ 100,000	\$ 200,000
	Difusor de aire	und	1	\$ 200,000	\$ 200,000
	Soporte de empaques	und	1	\$ 50,000	\$ 50,000
	Aspersor de agua	und	1	\$ 120,000	\$ 120,000
Elementos representativos de la torre	Eliminador de arrastre de líquido	und	1	\$ 300,000	\$ 300,000
	Empaques anillos Pall	und	2000	\$ 250	\$ 500,000
Total					\$ 5,225,028

Fuente: elaboración propia.

Con los datos anteriores, se tiene que el costo de fabricación de la columna de desorción con las medidas necesarias para remover correctamente el amoniaco es de \$5,225,028 COP (cinco millones doscientos veinticinco mil veintiocho), lo cual es un valor muy inferior con una torre de desorción hecha por una empresa externa a la empresa.

5.2.2 Costos columna de absorción. Para la columna de absorción se tiene que las se necesitaran 4 unidades de válvulas de control, 1 sensor de temperatura, 1 sistema de refrigeración, 1 sensor de presión, 1 sensor de detección de amoniaco, conexiones neumáticas, sistema de manejo de ácido, 1 sistema de almacenamiento para el sulfato de amonio, 1 difusor de aire, 1 cilindro envolvente, 1 torre de platos, 1 compresor, y una bomba; las dimensiones son 1.75 m de alto y 0.33 m de diámetro por lo tanto los costos de lo mencionado anteriormente para una columna se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 26. Costos generados por la columna de absorción.

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo por unidad	Costo total
	Válvulas de control	und	4	\$ 120,000	\$ 480,000
	Sensor de temperatura	und	1	\$ 98,000	\$ 98,000
Sistema de control	Sistema de refrigeración	und	1	\$ 389,000	\$ 389,000
	Sensor de presión	und	1	\$ 100,000	\$ 100,000
	Sensor de detección de amoniaco en el aire	und	1	\$ 163,046	\$ 163,046
	Conexión neumática	m	10	\$ 7,500	\$ 75,000
Sistema de transporte de líquido y gas	Sistema de ingreso de ácido sulfúrico	m	10	\$ 6,500	\$ 65,000
	Almacenamiento del sulfato de amonio	und	1	\$ 100,000	\$ 100,000
	Sistema de muestreo	und	1	\$ 80,000	\$ 80,000
	Difusor de aire	und	1	\$ 120,000	\$ 120,000
Hora hombre	Operario	hora	30	\$ 9,134	\$ 274,020

Tabla 26. (Continuación)

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo por unidad	Costo total
	Cilindro envolvente	m	2	\$ 100,000	\$ 200,000
Elementos representativos de la torre	Platos	und	7	\$ 300,000	\$ 2,100,000
	Compresor	und	1	\$ 174,900	\$ 174,900
	Bomba	und	1	\$ 179,000	\$ 179,000
Total					\$ 4,597,966

Fuente: elaboración propia.

Con los datos anteriores, se tiene que el costo de fabricación de la columna de absorción con las medidas necesarias para remover correctamente el amoniaco es de \$ 4597966 COP (cuatro millones quinientos noventa y siete mil novecientos sesenta y seis), lo cual es un valor muy inferior con una torre de absorción hecha por una empresa externa a la empresa.

5.3 Costos totales de operación y fabricación

Por último, se consolidan todos los valores obtenidos a lo largo de este capítulo con el fin de determinar los valores atribuidos a los costos finales.

Tabla 27. Costos de operación y fabricación.

Ítem	Costo
Costos energéticos	\$ 39,420.00
Costos por compuestos	\$ 31,698.00
Costos por operario	\$ 449,600.00
Costos de fabricación columna desorción	\$ 5,225,028.00
Costos de fabricación columna absorción	\$ 4,597,966.00
Costos totales	\$ 10,343,712.00

Fuente: elaboración propia.

Es importante resaltar que los costos de operación están calculados para un mes de funcionamiento, y que los costos de fabricación es una sola inversión. Es

necesario sobre estimar este total del diseño, debido a la posibilidad de encontrar imprevistos; para ello se estima un 20% de imprevistos, obteniendo un valor total de \$ 12,412,454 COP (doce millones cuatrocientos doce mil cuatrocientos cincuenta y cuatro).

Los resultados obtenidos en estos estudios son dependientes de las composiciones de amoníaco tomadas las fechas de muestreo, las cuales pueden llegar a variar según lo nitrurado; adicional, el compuesto absorbente fue calculado con las mismas composiciones salientes de la desorción lo cual pueden cambiar de acuerdo con la misma función variable, es decir la cantidad de nitrurado o cantidad de amoníaco que se realice.

Este estudio además fue realizado dentro de las instalaciones de Aluica S.A.S. junto con los parámetros establecidos por ellos, además de las muestras enviadas a los laboratorios trabajados por los mismos.

6. CONCLUSIONES

- Se realizó un nuevo prototipo con mejoras físicas y de operación del sistema como el de aspersion de líquido y difusión de gas, un aumento en el diámetro y altura de la torre, mejoras en el sistema de control y sellamiento, y la determinación de una adecuada relación liquido-gas, llevaron a una mejora en la remoción de amoniaco del agua residual del proceso de nitruración del 40% al 60%, esto comparado con el estudio previo realizado por la empresa. Adicionalmente mediante el laboratorio Quimicontrol se realiza la determinación de la concentración de nitrógeno amoniacal en el agua después del tratamiento de desorción lo que permite reconocer una concentración mínima de 445.8 mg/l y un pH 9.67 utilizando una torre empacada, este valor de concentración es menor al obtenido en el estudio previo el cual corresponde a 624.7 mg/l.
- Con el objetivo de dar disposición residual al gas o aire amoniacal y cumplir con la reglamentación colombiana y la NIOSH para exposición de gas amoniacal, se escoge un sistema de absorción para la captación de dicho gas, el absorbente escogido para dicha captación se determina mediante la espontaneidad de la reacción, su capacidad de liberar calor y factores económicos lo cual condujo a la selección del ácido sulfúrico como absorbente, a partir de esto los componentes físicos como materiales y tipo de plato de la columna se determinan basándose en la bibliografía y diferentes factores físico químicos de los reactivos utilizados, lo que conduce a la utilización de acrílico como material principal y un plato de capuchones o borboteo. Mediante un análisis por retroceso y la experimentación a distintas concentraciones de ácido sulfúrico dentro del plato de absorción se llega a la conclusión que el ácido sulfúrico es un absorbente adecuado ya que al reaccionar con el amoniaco presente en el gas se produce sulfato de amonio y aire limpio, lo cual los con lleva a un subproducto seguro y a emisiones casi nulas de amoniaco a la atmosfera.
- Se realiza el balance de masa del sistema desorción - absorción, además se determina la cantidad de calor liberada por la reacción entre ácido sulfúrico y amoniaco, dando como resultado un calor controlable a gran escala mediante un sistema de refrigeración, sin embargo, a escala piloto no se denota la necesidad de contar con ningún tipo de sistema de refrigeración. Se da un dimensionamiento de cada una de las torres para eliminar satisfactoriamente

los contaminantes tanto del agua como del aire, dando como resultado una Torre de desorción empacada con anillos Pall de 2 m y un diámetro de 0.34m: una torre de absorción de platos de capuchón o borboteo de 1.75 m y un diámetro de 0.34m.

- Se determinaron los costos de operación y fabricación de todo el sistema, en cuanto a los costos de operación se calculan para un mes de funcionamiento, mientras que los de fabricación se calculan mediante la cotización a diferentes proveedores de los distintos materiales, es importante resaltar que el costo de fabricación es una inversión que se realiza una sola vez mientras que la de operación es una inversión que se hace mes a mes.

7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda para el nuevo sistema planteado, un intercambiador de calor para enfriar el sistema, debido a que un cambio drástico en la temperatura del agua de salida del nitrurado puede generar alteraciones en el sistema de absorción-desorción, además de esto se sugiere la realización o adquisición de un cristizador con el fin de darle una apariencia comercial al sulfato de amonio resultante del proceso de absorción.
- Es necesario realizar un nuevo estudio para medir la reactividad y velocidad de reacción de la solución planteada, debido a la incertidumbre que existe sobre la concentración ideal para el ácido que es aún medible.
- Es posible encontrar en el método de desorción-absorción una solución al problema, sin embargo, se logró comprobar que teóricamente solo se recupera un 70% del amoniaco, este resultado es inviable cuando existe una concentración superior a 1000 mg/L de amoniaco, debido a que en las normas extranjeras es permitido un máximo de 300mg/L, adicional de encontrar un límite para la NIOSH de 50ppm, se recomienda evaluar diferentes tipos de métodos, entre los cuales se encuentran, sistemas de purificación por resinas, electrocoagulación, o sistema de trampas.
- Para los estudios posteriores sobre este sistema es recomendable manejar condiciones de seguridad suficientes para el manejo de amoniaco y ácido sulfúrico, estos compuestos pueden llegar a ser peligrosos y contaminantes para operarios.
- Se recomienda una división del sistema para así evitar la implementación del intercambiador de calor, para esto, se prefiere realizar dos sistemas de desorción y dos de absorción, estos serán consecutivos, de tal forma que el líquido de salida de la primera desorción sea la entrada de la segunda desorción, de la misma manera para la absorción; esto generaría una disminución de energía necesaria para la operación.
- La empresa Aluica S.A.S. cuenta con permisos especiales para el manejo de sustancias, es por ello por lo que también es ideal evaluar otros tipos de compuestos absorbentes, siempre con el debido manejo y cuidado con dichas sustancias, un buen compuesto absorbente que no sea peligroso para el operario o funcionario será una buena decisión.

BIBLIOGRAFÍA

Ácido Clorhídrico/hcl 32% Min/cas: 7647-01-0 - comprar HCl, Ácido Muriático, Ácido Clorhídrico 32 Producto en Alibaba.com. [Consultado el Nov 10,2019]. Disponible en: [//www.alibaba.com/product-detail/Hydrochloric-acid-HCL-32-Min-CAS_60453546751.html](http://www.alibaba.com/product-detail/Hydrochloric-acid-HCL-32-Min-CAS_60453546751.html)

Ácido Nítrico. [0]. [Consultado el Oct 01.2019]. Disponible en: <http://spanish.alibaba.com/g/price-of-nitric-acid.html>

Alexander Lang. The Answer is 42! Mayo 30, [Consultado el octubre 24, 2019]. Disponible en: <http://langster1980.blogspot.com/2016/05/calibrating-mps20n0040d-d-pressure.html>

Alibaba. [Consultado el octubre 01, 2019]. Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/high-quality-50-35-sulfuric-acid-diluted-and-concentrated-h2so4--62011610786.html?spm=a2700.8699010.normalList.68.1b614ea56ILXmy>

ALUICA. Misión, visión, contenido, quienes somos, Disponible en: <http://aluica.com.co/>

ARL SURA. Julio 27, [Consultado el octubre 10, 2019]. Disponible en: https://www.arsura.com/index.php?option=com_content&view=article&id=739

CASTILLO, Antonio, et al. Absorción. Abril, [Consultado el noviembre 10, 2019]. Disponible en: <https://www.academia.edu/24712516/Absorci%C3%B3n>

CLASE,04/05 and Transporte de Masa. FENÓMENOS DE TRASPORTE EN METALURGIA EXTRACTIVA.

COKER, A. K. Ludwig's Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants, Volume 3 (4th Edition): Elsevier,

Concentraciones de referencia para los vertimientos industriales realizados a la red de alcantarillado y de los vertimientos industriales y domésticos efectuados a cuerpos de agua de la ciudad de Bogotá: Bogotá: 2009.

D'Acqua REGADERA PLAS REDONDA 300MM C/BRAZO 12pl. [Consultado el octubre 1, 2019]. Disponible en: [/homecenter-co/product/320140/REGADERA-PLAS-REDONDA-300MM-C-BRAZO-12pl/320140](#)

Deiana; GRANADOS, Lucia and SARDELLA, fabiana. Capitulo IV, Balance de masa & nbsp; 2018.

DURAND, Alejandro y FLORES, Humberto. Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina. p. 31-39

FM, Yúbal. Qué es Arduino, cómo funciona y qué puedes hacer con uno. [1]. -07-21T10:06:20+00:00. [Consultado el septiembre 5, 2019]. Disponible en: <https://www.xataka.com/basics/que-arduino-como-funciona-que-puedes-hacer-uno>

GREENE, Stanley A. and POHANISH, Richard P. Sittig's Handbook of Pesticides and Agricultural Chemicals. William Andrew Publishing,

GUNT, Hamburg. Ingeniería de procesos térmicos, absorción y desorción. [0]:

Ideplas. FICHA TÉCNICA LAMINA PMMA (ACRILICO) & nbsp. [Consultado el noviembre 10, 2019]. Disponible en: <http://www.ideplas.com/lamina-pmma.pdf>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C. El instituto, 2018. ISBN 9789588585673.

Instituto de Seguridad e Higiene en el Trabajo. ÁCIDO SULFÚRICO. [0]. [Consultado el 6 de abril de 2019]. Disponible en: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/LEP%20_VALORES%20LIMITE/Doc_Toxicologica/capitulos%2091_100/Ficheros%202015/DLEP%20100%20Acido%20sulfurico.pdf

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo. Ficha Internacional de Seguridad Química & nbsp; [Consultado el 6 de Abril de2019]. Disponible en: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/FISQ/Ficheros/101a200/nspn0163.pdf>

Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo. Fichas Internacionales de Seguridad Química. [0]:2005.

International Plant Nutrition Institute. Fuentes de Nutrientes específicos. [0]. [Consultado el 6 abril de2019]. Disponible en: [http://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/1F51C7CDE49DF9E985257BBA0059DB3C/\\$FILE/NSS-ES-22.pdf](http://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/1F51C7CDE49DF9E985257BBA0059DB3C/$FILE/NSS-ES-22.pdf)

IPNI. Fuentes de nutrientes específicas. [0]. Disponible en: [ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/794F6BDB7E84EA4785257BBA0059C154/\\$FILE/NSS-ES-12.pdf](http://ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/794F6BDB7E84EA4785257BBA0059C154/$FILE/NSS-ES-12.pdf)

Kohl and Nielsen. Gas Purification Gulf Publishing company ed. Gas purificación. 40 p.

METADATA, pagina_01 — ocwus. [Consultado el Sep 11,2019]. Disponible en: http://ocwus.us.es/arquitectura-e-ingenieria/operaciones-basicas/contenidos1/tema12/pagina_01.htm

Naylamp. Tutorial sensor de flujo de agua. Abril 13, [Consultado en octubre 24 2019]. Disponible en: https://naylampmechatronics.com/blog/47_tutorial-sensor-de-flujo-de-agua.html

Nitrato de amonio [0]. [Consultado el 6 de abril de2019]. Disponible en: <https://acidoclorhidrico.org/nitrato-de-amonio/>

Oxiqim. Hoja de datos de seguridad de productos. [0]:

PERRY, Hobert H. and GREEN, Don W. Perry: manual del ingeniero químico. Tomo IV (6a. ed.). México, D.F. McGraw-Hill Interamericana, 1992.

Pochteca. Sulfato de Amonio [0]. [Consultado el 6 abril de2019]. Disponible en: <https://www.pochteca.com.mx/productosmp/sulfato-de-amonio/>

POHANISH, Richard P. Sittig's Handbook of Toxic and Hazardous Chemicals and Carcinogens (6th Edition). Elsevier.

Precio De Fábrica Líquido Incoloro 60% Ácido Nítrico 68% - comprar Planta De Ácido Nítrico, Ácido Nítrico 68%, Ácido Nítrico 60% Producto en Alibaba.com. [1]. [Consultado el Nov 10,2019]. Disponible en: [//www.alibaba.com/product-detail/Factory-price-colorless-liquid-60-68_62305879208.html](http://www.alibaba.com/product-detail/Factory-price-colorless-liquid-60-68_62305879208.html)

República de Colombia, Ministerio de Justicia. Control para el manejo de Sustancias Químicas. 2009.

RUEDA LILLO, Francisco Javier. ABSORCIÓN DE CONTAMINANTES INORGÁNICOS DE UN GAS DE GASIFICACIÓN DE RDF MEDIANTE SOSA CÁUSTICA & nbsp;: Sevilla, 2016.

RUIZ MOLINA, Joaquin. Ejemplo de un análisis por retroceso, determinación del sulfato de amonio presente en una muestra comercial & nbsp; Granada, España: 2008.

SARACCO,G. and GENON,G. High temperature ammonia stripping and recovery from process liquid wastes. En: JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS. vol. 37, no. 1, p. 191-206

SENEVIRATNE, Mohan. Practical Approach to Water Conservation for Commercial and Industrial Facilities. Elsevier,

SHERMAN, Peter. Quality progress & nbsp; [0]. Jul,. [Consultado en Agosto 23,2019]. Disponible en: <http://asq.org/quality-progress/2012/07/back-to-basics/volviendo-a-los-fundamentos-grficos-inteligentes.html>

Tecniaguas. Sistemas de flotación. [0]. [Consultado el Agosto2019]. Disponible en: <http://www.tecniaguas.com/index.php/es/productos-tecniaguas/item/sistemas-de-flotacion>

Universidad Nacional Autónoma de México. Hoja de seguridad Amoniac. [0]. México. [Consultado el Nov 25,2019]. Disponible en: <https://quimica.unam.mx/wp-content/uploads/2016/12/18amoniaco.pdf>

Universidad Nacional del Sur. Diseño de equipos e instalaciones & nbsp; [0]. [Consultado el Nov 11,2019]. Disponible en: http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/05___columnas_de_contacto.pdf

URIBE BOTERO, Beatriz. Intervención Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. En: REVISTA DE INGENIERÍA. Diciembre 1, no. 35, p. 52-54

Vadequimica. Compra de ácido clorhídrico. [0]. [Consultado el 01 octubre de2019]. Disponible en: <https://www.vadequimica.com/acido-clorhidrico-salfuman-25-litros.html>

WOOLDRIDGE THRING, Meredith and EDGEWORTH JOHNSTONE, Robert. Pilot Plants, Model's and scale up methods in chemical engineering. McGraw Hill Book Company INC, 1957. 173-190 p.

WYPYCH, George. Knovel Solvents - A Properties Database. ChemTec Publishing, YPF. Sulfate of ammonia & nbsp.

ANEXOS

ANEXO A.
Niosh pocket guide to chemical hazards
 DHHS (NIOSH) Publication No. 2005-149
 DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES
 Centers for Disease Control and Prevention
 National Institute for Occupational Safety and Health

Ammonia	Formula: NH ₃	CAS#: 7664-41-7	RTECS#: BO0875000	IDLH: 300 ppm
Conversion: 1 ppm = 0.70 mg/m ³	DOT: 1005 125 (anhydrous); 2672 154 (10-35% solution); 2073 125 (>35-50% solution); 1005 125 (>50% solution)			
Synonyms/Trade Names: Anhydrous ammonia, Aqua ammonia, Aqueous ammonia [Note: Often used in an aqueous solution.]				
Exposure Limits: NIOSH REL: TWA 25 ppm (18 mg/m ³) ST 35 ppm (27 mg/m ³)			Measurement Methods (see Table 1): NIOSH 3800, 6015, 6016 OSHA ID188	
Physical Description: Colorless gas with a pungent, suffocating odor. [Note: Shipped as a liquefied compressed gas. Easily liquefied under pressure.]				
Chemical & Physical Properties: MW: 17.0 BP: -28°F Sol: 34% Fl.P: NA (Gas) IP: 10.18 eV RGasD: 0.60 VP: 8.5 atm FRZ: -108°F UEL: 28% LEL: 15%	Personal Protection/Sanitation (see Table 2): Skin: Prevent skin contact Eyes: Prevent eye contact Wash skin: When contam (solution) Remove: When wet or contam (solution) Change: N.R. Provide: Eyewash (>10%) Quick drench (>10%)	Respirator Recommendations (see Tables 3 and 4): NIOSH 250 ppm: CcrS*/Sa* 300 ppm: Sa:Cf*/PaprS*/CcrFS/ GmFS/ScbaF/SaF §: ScbaF:Pd,Pp/SaF:Pd,Pp:AScba Escape: GmFS/ScbaE		
[Note: Although NH ₃ does not meet the DOT definition of a Flammable Gas (for labeling purposes), it should be treated as one.]				
Incompatibilities and Reactivities: Strong oxidizers, acids, halogens, salts of silver & zinc [Note: Corrosive to copper & galvanized surfaces.]				
Exposure Routes, Symptoms, Target Organs (see Table 5): ER: Inh, Ing (solution), Con (solution/liquid) SY: Irrit eyes, nose, throat; dysp, wheez, chest pain; pulm edema; pink frothy sputum; skin burns, vesic; liquid: frostbite TO: Eyes, skin, resp sys			First Aid (see Table 6): Eye: Irr immed (solution/liquid) Skin: Water flush immed (solution/liquid) Breath: Resp support Swallow: Medical attention immed (solution)	

ANEXO B.

Cálculos para la realización de la gráfica de control de shewhart

A continuación, se muestra un ejemplo de la información suministrada por la empresa de cada lote de nitruración, es importante resaltar que para los cálculos del gráfico de Shewhart solo se tendrán en cuenta los valores del consumo de amoniaco.

Ejemplo de la información suministrada por lote de nitruración

FECHA	LOTE	OPERARIO	Kg NITRURAD OS	CONSUM O DE AMONIA CO	CONSUM O DE ENERGÍA	CONSUM O DE AGUA	COSTO ACUMULAD O	COSTO POR KILOGRAM O
1/19/18	1	CARLOS USMA B.	0	0.54	0	0	3,240	\$ 0
1/23/18	2	CARLOS USMA B.	0	6.26	0	0	37,560	\$ 0
2/13/18	3	CARLOS USMA B.	0	0.12	0	0	720	\$ 0
3/16/18	4	CARLOS USMA B.	0	12.7	0	0	76,200	\$ 0
4/2/18	5	CARLOS USMA B.	0	8	0	0	48,000	\$ 0
4/30/18	6	CARLOS USMA B.	90	8	286.91	8	227,355	\$ 2,526
5/11/18	7	CARLOS USMA B.	97.82	6.4	256.2	10	217,726	\$ 2,226
5/14/18	8	CARLOS USMA B.	95	39.48	256.01	14	442,966	\$ 4,663
5/21/18	9	CARLOS USMA B.	78.26	7.52	254.55	9	217,012	\$ 2,773
7/5/18	10	JEFFERSON GUTIÉRREZ.	63.9	6.86	276.74	5	203,843	\$ 3,190
7/13/18	11	MADISON RUIZ.	92.1	6.56	310.83	13	272,211	\$ 2,956

Fuente. Aluica S.A.S

Teniendo en cuenta cada uno de los datos suministrados para el consumo de amoniaco se realizaron los siguientes cálculos (Se hizo uso del programa Excel):

- Para el cálculo de la línea central \bar{X} : Esta línea representa el promedio global de la variable analizada, en este caso el consumo de amoníaco, la cual se obtiene con la media de cada consumo de cada lote

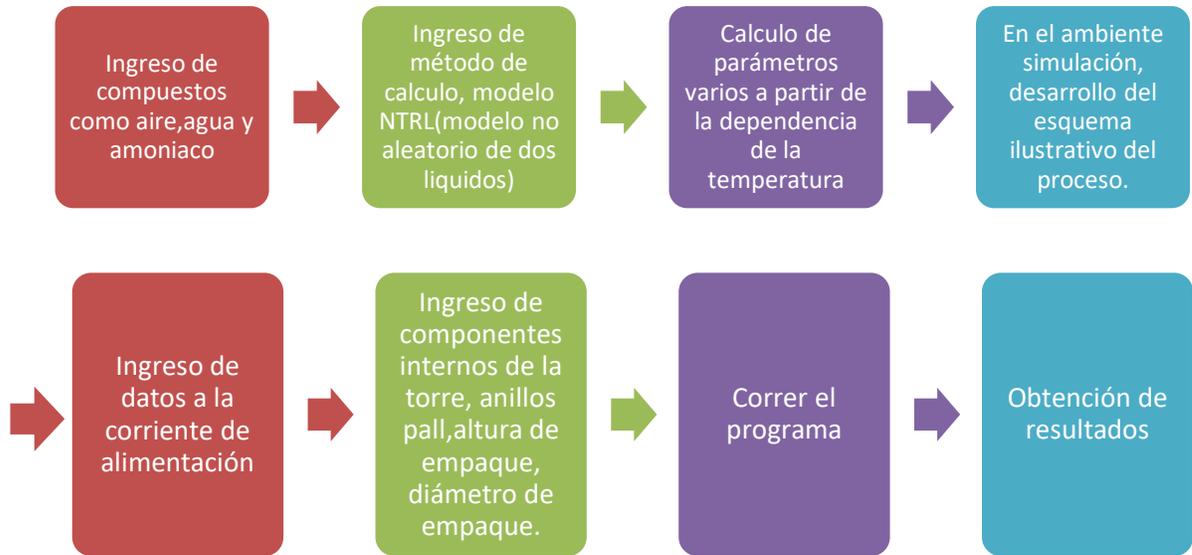
$$\bar{X} = \mu = 7.7691358$$

μ = representa la media del proceso

- Para el cálculo de las líneas superior e inferior las cuales indican los rangos permisibles en los cuales puede variar el proceso, se obtienen sumando la media + 2σ , donde σ corresponde a la desviación del proceso, es decir:

$$LCS = \mu + 2\sigma = 7.7691358 + 2 * 4.489044497 = 16.74722$$
$$LCI = \mu - 2\sigma = 7.7691358 - 2 * 4.489044497 = -1.208953191$$

ANEXO C.
Procedimiento para la realización de la simulación en Aspen V9



Caracterización de la corriente de entrada corrida 1.

Parámetro	Valor	Unidad
Flujo volumétrico	0.0233	L/s
Fracción másica agua	0.89	
Fracción másica amoníaco	0.11	
Temperatura	40	°C
Presión de Mosquera	0.7425	atm
Flujo volumétrico aire	0.1219	L/s

Caracterización de la corriente de entrada corrida 2.

Parámetro	Valor	Unidad
Flujo volumétrico	0.0233	L/s
Fracción másica agua	0.8871	
Fracción másica amoníaco	0.1129	
Temperatura	25	°C
Presión de Mosquera	0.7425	atm
Flujo volumétrico aire	0.1219	L/s

Especificaciones necesarias para el empaque tipo anillo pall

Cabe aclarar que en este caso se agregan empaques desde el plato 5 hasta el plato 15, teniendo en cuenta que el conteo de platos empieza desde la cima de la torre hasta los fondos, teniendo en cuenta que el simulador toma la altura de la torre y la divide en los platos que se agreguen en esta; en este caso anillos "PALL", el tipo de material, en este caso "PLASTIC", así como la dimensión estándar del anillo, en este caso "2-IN or 50 MM", adicionalmente se especifica la altura y diámetro de la torre, la cual se desarrolló con medidas de 50 cm de alto por 15 cm de diámetro

ANEXO D.

Descripción técnica de Arduino

Ficha técnica Placa Arduino Uno

Arduino es una placa con un microcontrolador de la marca Atmel y con toda la circuitería de soporte, que incluye, reguladores de tensión, un puerto USB (En los últimos modelos, aunque el original utilizaba un puerto serie) conectado a un módulo adaptador USB-Serie que permite programar el microcontrolador desde cualquier PC de manera cómoda y también hacer pruebas de comunicación con el propio chip. Un Arduino dispone de 14 pines que pueden configurarse como entrada o salida y a los que puede conectarse cualquier dispositivo que sea capaz de transmitir o recibir señales digitales de 0 y 5 V.

También dispone de entradas y salidas analógicas. Mediante las entradas analógicas

Se logran obtener datos de sensores en forma de variaciones continuas de un voltaje. Las salidas analógicas suelen utilizarse para enviar señales de control en forma de señales PWM.

Arduino UNO es la última versión de la placa, existen dos variantes, la Arduino UNO convencional y la Arduino UNO SMD. La única diferencia entre ambas es el tipo de microcontrolador que montan.

- La primera es un microcontrolador Atmega en formato DIP.
- La segunda dispone de un microcontrolador en formato SMD.

Se opta por la primera porque permite programar el chip sobre la propia placa y después integrarlo en otros montajes.



Arduino UNO con microcontrolador en formato DIP



Arduino UNO con microcontrolador en formato SMD

Entradas y salidas:

Cada uno de los 14 pines digitales se puede usar como entrada o como salida. Funcionan a 5V, cada pin puede suministrar hasta 40 mA. La intensidad máxima de entrada también es de 40 mA. Cada uno de los pines digitales dispone de una resistencia de pull-up interna de entre 20K Ω y 50 K Ω que está desconectada, salvo que se indique lo contrario.

Arduino también dispone de 6 pines de entrada analógicos que trasladan las señales a un

convertor analógico/digital de 10 bits. Pines especiales de entrada y salida:

- RX y TX: Se usan para transmisiones serie de señales TTL.
- Interrupciones externas: Los pines 2 y 3 están configurados para generar una interrupción en el atmega. Las interrupciones pueden dispararse cuando se encuentra un

valor bajo en estas entradas y con flancos de subida o bajada de la entrada.

- PWM: Arduino dispone de 6 salidas destinadas a la generación de señales PWM de hasta 8 bits.
- SPI: Los pines 10, 11, 12 y 13 pueden utilizarse para llevar a cabo comunicaciones SPI, que permiten trasladar información full dúplex en un entorno Maestro/Esclavo.

Alimentación de un Arduino

Puede alimentarse directamente a través del propio cable USB o mediante una fuente de alimentación externa, como puede ser un pequeño transformador o, por ejemplo, una pila de 9V. Los límites están entre los 6 y los 12 V. Como única restricción hay saber que, si la placa se alimenta con menos de 7V, la salida del regulador de tensión a 5V puede dar menos que este voltaje y si se sobrepasa los 12V, probablemente se dañará la placa.

La alimentación puede conectarse mediante un conector de 2,1mm con el positivo en el centro o directamente a los pines Vin y GND marcados sobre la placa.

Hay que tener en cuenta que se logra medir el voltaje presente en el Jack directamente desde Vin. En el caso de que el Arduino esté siendo alimentado mediante el cable USB, ese voltaje no podrá monitorizarse desde aquí.

Resumen de características Técnicas

Microcontrolador: Atmega328

Voltaje de operación: 5V

Voltaje de entrada (Recomendado): 7 – 12V

Voltaje de entrada (Límite): 6 – 20V

Pines para entrada- salida digital: 14 (6 pueden usarse como salida de PWM)

Pines de entrada analógica. 6

Corriente continua por pin IO 40 mA

Corriente continua en el pin 3.3V 50 mA

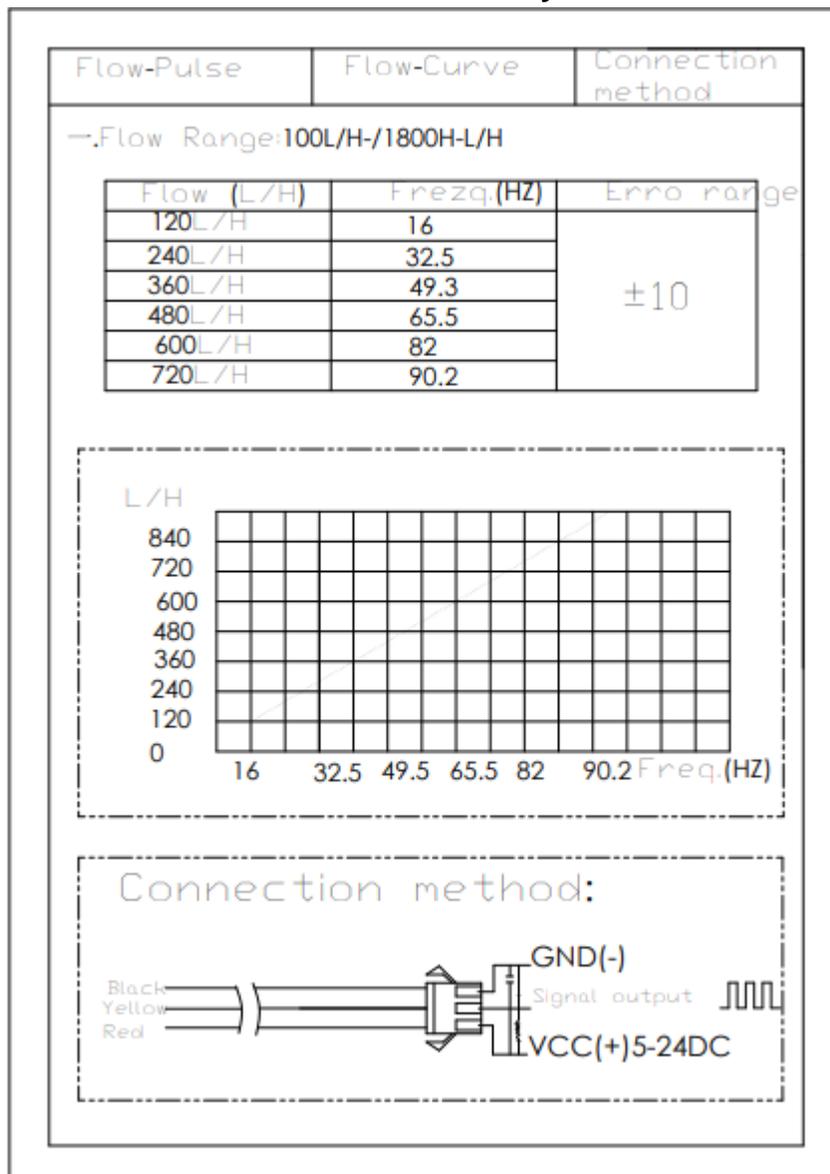
Memoria Flash 32 KB (0,5 KB ocupados por el bootloader)

SRAM 2 KB

EEPROM 1 KB

Frecuencia de reloj 16 MHz.

ANEXO E.
Ficha técnica sensor ys-201



YIFA the plastics Ltd Product Introduction

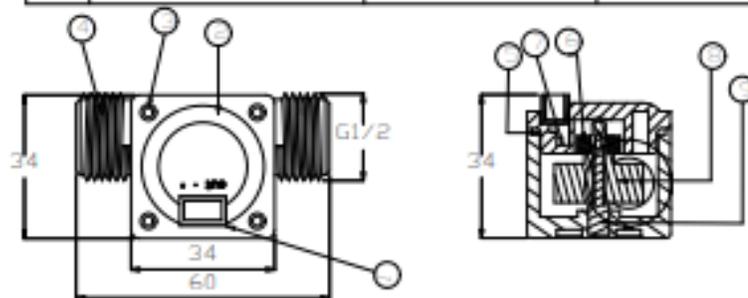
1. Model: YF-21
2. Product Name: Hall sensor
3. Flow Range: 1-30L/MIN
4. (1) Connection Method



- (2) Voltage Range 3.5-24VDC, Pulse Characteristic: $F=7Q(L/MIN)$.
- (3) Extent of error: $\pm 5\%$.
- (4) Flow Pulse
 2L/MIN=16HZ 4L/MIN=32.5HZ 6L/MIN=49.3HZ
 8L/MIN=65.5HZ 10L/MIN=82HZ

5. Bom

No.	Item	Material	Qty.
1	Connection wire		1
2	Bonnet	PA	1
3	Screw		4
4	Valve body	PA	1
5	Leak press valve		1
6	Magnet		1
7	Hall		1
8	Impeller	POM	1
9	Rustless steel axis	SUS304	1
10			
11			



Pressure Sensor MPS20N0040D-S



This datasheet is provided by: e-radionica.com

support@e-radionica.com

<https://e-radionica.com/en/air-pressure-sensor-mps20n0040d-d.html>

Introduction

Pressure range :0-5 .8 psi (40kpa);

Product Features:

Solid, MEMS technology, high reliability

Low cost

Wide monitoring and control media

The application of a wide temperature range

Easy to use, choose from a variety of range. Easy to use, easy to install in OEM equipment

Application areas:

Automotive: tire pressure, car air pump, MAP sensor, diagnostic equipment, automotive sensors.

Industry: Air brake switch, portable pressure gauge, such as digital pressure gauge, environmental monitoring, consumer and sports

Health care: patient monitoring and diagnostic equipment, such as blood pressure monitors, medical instrumentation and monitoring

Range: 40kpa (differential pressure)

Output: mV signal

Electricity supply: 5VDC or constant current 1Ma

Linear accuracy: 0.25% FS

Measure the pressure range of 580 PSIG, 40KPaG

Max pressure capacity of three times the measuring range

Work power supply 5 VDC,

Input impedance of 4 - 6 K Ω

The output impedance of 4 - 6 K Ω

Operating temperature -40 - 85 ° C -40 ° F - +185 ° F

Storage Temperature -40 - 125 ° C -40 ° the F - +257 ° F

Accessible media, clean, dry, non-corrosive gases

Bias voltage \pm 25 mV

Full-scale output voltage 50 - 100 mV

Bridge Resistance to 4 - 6 K Ω

Linearity \pm 0.3% F.S.

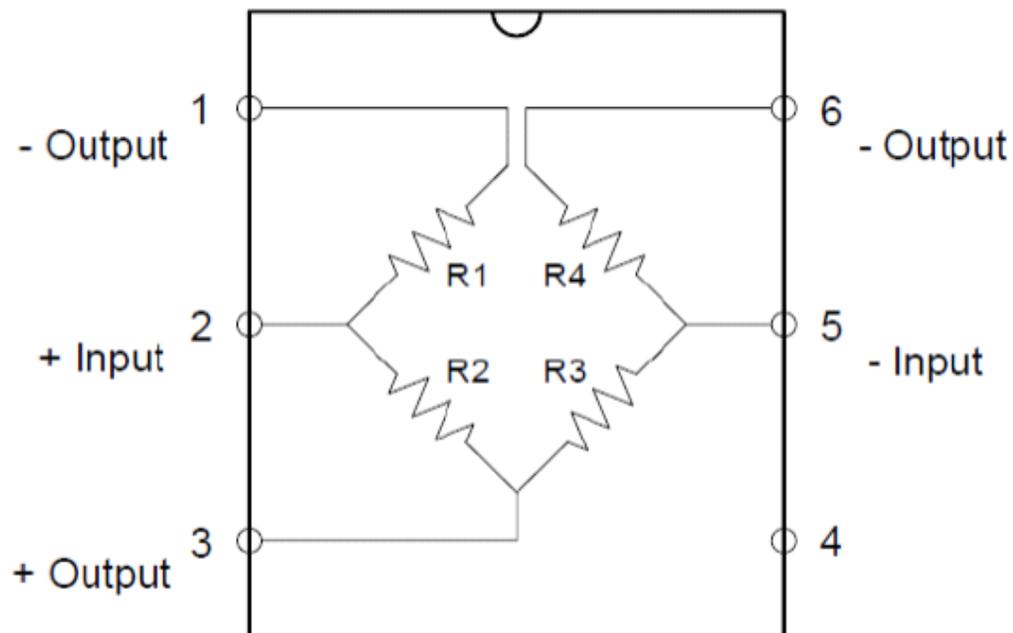
Hysteresis \pm 0.7% F.S.

Bias Temperature coefficient \pm 0.08% of F.S. / °c

Temperature coefficient of sensitivity -0.21 % FS/ °c

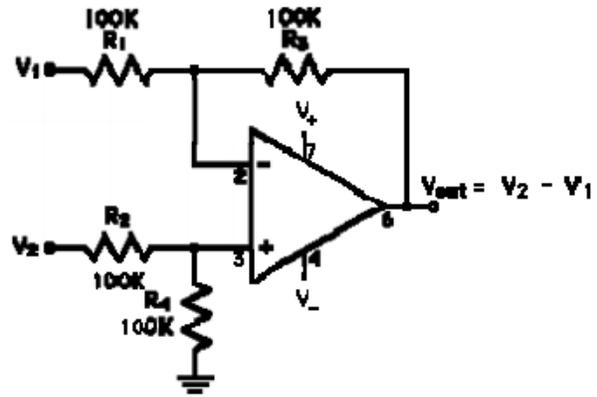
Pressure Sensor MPS20N0040D-S

Circuit

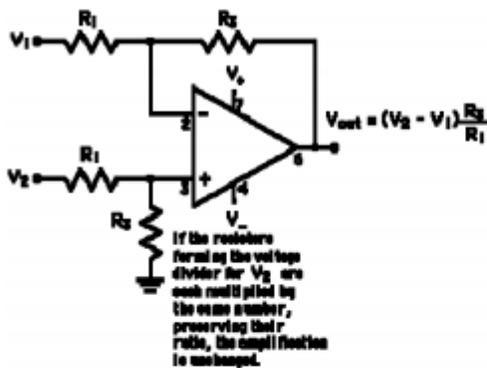


Difference Amplifier

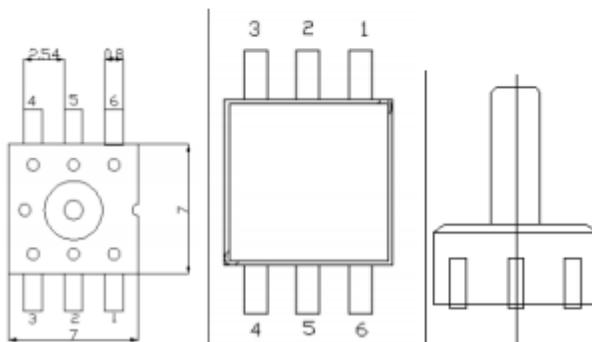
This amplifier uses both inverting and non-inverting inputs with a gain of one to produce an output equal to the difference between the inputs. It is a special case of the differential amplifier. You can also choose the resistances to amplify the difference.



Pressure Sensor MPS20N0040D-S



Dimensions



ANEXO F. Calibración y códigos de programación de los sensores

CALIBRACIÓN SENSOR MPS20N004D

La calibración del sensor MPS20N004D, el cual es un sensor de presión, se realizó teniendo en cuenta la guía para Arduino⁹⁹ para esto se utilizó el siguiente código el cual arroja el valor del sensor a una presión dada:

```
/*  
Pressure Sensor test Code  
*/  
  
const int analogInPin = A0; // Sensor connected to A0  
  
int sensorValue = 0; // value read from the pressure sensor via the amplifier  
stage  
float outputValue = 0; // value output to the Serial port  
  
void setup() {  
  // initialize serial communications at 9600 bps:  
  Serial.begin(9600);  
}  
  
void loop() {  
  // read the analog in value:  
  sensorValue = analogRead(analogInPin);  
  
  // print the results to the serial monitor:  
  Serial.print("sensor = " );  
  Serial.print(sensorValue);  
  
  Serial.println();  
  
  delay(1000);  
}
```

⁹⁹ Alexander Lang. The Answer is 42!! [0]. May 30 ,. [Consultado el 09/24/2019]. Disponible en:
<http://langster1980.blogspot.com/2016/05/calibrating-mps20n0040d-d-pressure.html>

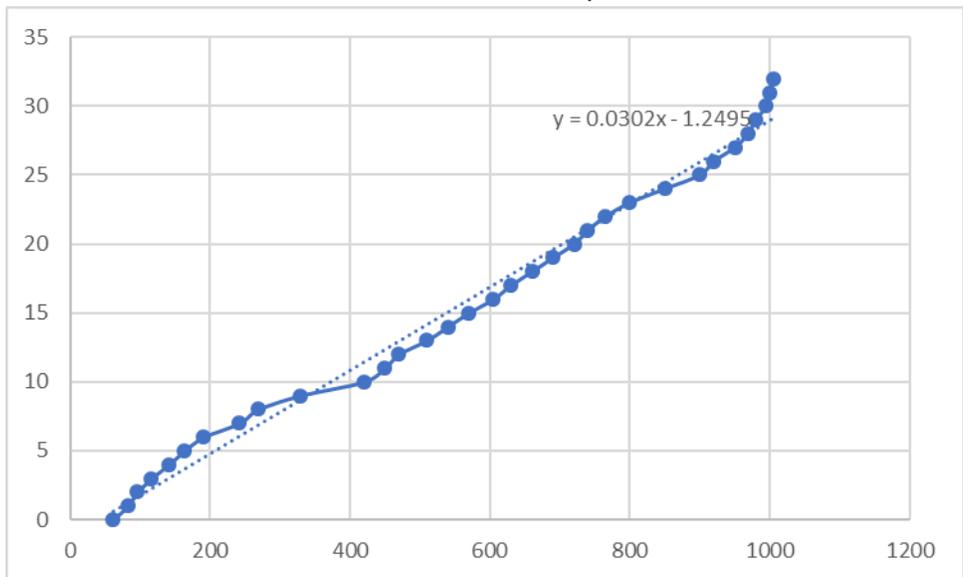
Fuente. Alexander Lang. The Answer is 42!! [0]. May 30 ,. [Consultado el 09/24/2019]. Disponible en: <http://langster1980.blogspot.com/2016/05/calibrating-mps20n0040d-d-pressure.html>

A partir de este código y haciendo uso de una bomba de bicicleta se obtienen los valores de la siguiente tabla, junto con estos valores y la herramienta Excel se realiza una gráfica representativa del comportamiento del sensor y se procede a linealizar:

Presión de entrada (PSI)	ADC (Bits)	ADC voltaje (volts)
0	61	0.283295132
1	82	0.4001820137
2	96	0.4740954967
3	116	0.5620723363
4	141	0.6742689746
5	163	0.7817888563
6	191	0.9386412512
7	242	1.183020528
8	269	1.329648094
9	329	1.632903226
10	420	2.052785924
11	450	2.19941349
12	470	2.2971652
13	510	2.492668622
14	540	2.639296188
15	570	2.785923754
16	605	2.956989247
17	630	3.079178886
18	660	3.225806452

19	690	3.372434018
20	720	3.519061584
21	740	3.616813294
22	765	3.739002933
23	800	3.910068426
24	850	4.154447703
25	900	4.398826979

Grafica. Liberalización de los valores de presión vs bits



Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta que en este caso la variable “Y” se refiere a los psi ejercidos por la bomba y la variable “ X” a los bit obtenidos se procede a realizar el código en el software de Arduino con el fin de obtener en el monitor el valor de presión arrojada por el sensor.

CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN PARA EL SENSOR DE FLUJO DE AGUA

Para la realización de este código se tuvo en cuenta el tutorial sensor de flujo de agua¹⁰⁰, teniendo en cuenta que el sensor de flujo de agua está basado en el efecto hall el proveedor da un factor de conversión el cual equivale a 7.5, el cual será utilizado para efectos de este proyecto. A continuación, se muestra el código obtenido:

```
volatile int NumPulsos; //variable para la cantidad de pulsos recibidos
int PinSensor = 2; //Sensor conectado en el pin 2
float factor_conversion=7.5; //para convertir de frecuencia a caudal

//---Función que se ejecuta en interrupción-----
void ContarPulsos ()
{
  NumPulsos++; //se incrementa la variable de pulsos
}

//---Función para obtener frecuencia de los pulsos-----
int ObtenerFrecuencia()
{
  int frecuencia;
  NumPulsos = 0; //ingresar a 0 el número de pulsos
  interrupts(); //se habilita las interrupciones
  delay(1000); //muestra de 1 segundo
  noInterrupts(); // se deshabilita las interrupciones
  frecuencia=NumPulsos; //Hz(pulsos por segundo)
  return frecuencia;
}

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(PinSensor, INPUT);
  attachInterrupt(0,ContarPulsos,RISING); //(Interrupcion 0(Pin2),funcion,Flanco de
subida)
```

¹⁰⁰ Naylamp. Tutorial sensor de flujo de agua. [0]. Abr 13,2016 [Consultado el 09.24.2019]. Disponible en: https://naylampmechatronics.com/blog/47_tutorial-sensor-de-flujo-de-agua.html

```

}

void loop ()
{
  float frecuencia=ObtenerFrecuencia(); // se obtiene la Frecuencia de los pulsos en
  Hz
  float caudal_L_m=frecuencia/factor_conversion; // se calculan el caudal en L/m
  float caudal_L_h=caudal_L_m*60; // se calculan el caudal en L/h

  //-----se envian por el puerto serie-----
  Serial.print ("FrecuenciaPulsos: ");
  Serial.print (frecuencia,0);
  Serial.print ("Hz\tCaudal: ");
  Serial.print (caudal_L_m,3);
  Serial.print (" L/m\t");
  Serial.print (caudal_L_h,3);
  Serial.println ("L/h");
}

```

CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN PARA EL SENSOR DE PRESIÓN DE AIRE

El código de presión de aire se obtuvo con los datos de la calibración y basados en el tutorial para el sensor¹⁰¹ a continuación se muestra el código obtenido para dicho sensor.

Pressure Sensor test Code

```

*/

const int analogInPin = A0; // Sensor connected to A0

int sensorValue = 0; // value read from the pressure sensor via the amplifier
stage
float outputValue = 0;
float calibracion;// value output to the Serial port

void setup() {
  // initialize serial communications at 9600 bps:

```

¹⁰¹ Alexander Lang. The Answer is 42!! [0]. May 30 ,. [Consultado el 09/24/2019]. Disponible en: <http://langster1980.blogspot.com/2016/05/calibrating-mps20n0040d-d-pressure.html>

```
Serial.begin(9600);  
}  
  
void loop() {  
  // read the analog in value:  
  sensorValue = analogRead(analogInPin);  
  
  // print the results to the serial monitor:  
  Serial.print("sensor = " );  
  Serial.print(sensorValue);  
  calibracion=0.0302*sensorValue-1.2495;  
  
  Serial.print("sensor = " );  
  Serial.print(calibracion);  
  
  Serial.println();  
  
  delay(1000);  
}
```

**ANEXO G.
Ficha técnica anemómetro**

Anemómetro Digital Medidor Velocidad Viento Temperatura ¹⁰²

Elementos de medición

Velocidad del aire (velocidad del viento), la temperatura del aire

Rango de velocidad del aire: 0 ~ 30 m/s, 0 ~ 90 km/h, 0 ~ 5860ft/min, 0 ~ 55 nudos,
0 ~ 65MPH

Precisión de la velocidad del aire: ± 5%

Rango de temperatura del aire: -10-45c (14-113f)

Precisión de la temperatura del aire: ± 2C (3.6f)

Resolución de velocidad del aire: 0.1 m/s, 0.2C

Batería: CR2032 (NO incluida)

Termómetro

Termómetro NTC

Temperatura de funcionamiento: -10-45c (14-113f)

Humedad de funcionamiento: Menos de 90% de humedad relativa

Temperatura del almacén: -40 ~ + 60 (-40 F ~ 140f)

Consumo de corriente

Aprox. MA

Peso: 52g

Dimensión: 40x18x105mm

¹⁰² https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-497588255-anemometro-digital-medidor-velocidad-viento-temperatura-_JM#position=1&type=item&tracking_id=8bacce72-5457-40f5-bedd-5a7a2bc117ac

Anemómetro Digital Medidor Velocidad Viento Temperatura
Anemómetro R2
Model:GM816



ANEXO H.

Paso a paso para la toma de muestras

Para la toma de muestras se realizó el siguiente procedimiento para cumplir con los estándares de las normas **NTC 4783-97-82 del 2000**; adicionalmente se mostrará los datos obtenidos.

Procedimiento

- A) se instala la respectiva torre a escala piloto diseñada previamente
- B) se seleccionan las condiciones de operación determinadas previamente para la toma de muestras, estas condiciones de flujo de aire se ingresarán en la siguiente tabla; adicional se tendrá en cuenta el punto de máxima obtención de amoniaco en el agua; además se realizará una respectiva repetitividad con el proceso de nitruración, obteniendo dos tablas. Ingresando en las "X" los valores respectivos.

Numero de muestra	Flujo de aire entrada	Flujo de aire de salida	Temperatura °C		pH	Burbujeada
			Agua	Aire		
1	salida nitruración	.	32.4	-	10.24	x
	1					
2	6.6 m/s	1.5 m/s	32.1	22	9.76	x
3	6.6 m/s	1.3 m/s	32.3	22	9.72	x
4	salida nitruración	-	33	-	10.2	x
	2					
5	16.62 m/s	3.8 m/s	30.8	27	9.77	x
6	16.62 m/s	3.5 m/s	31.1	28	9.7	x
7	19.2 m/s	4.8 m/s	31.8	27.5	9.85	x
8	19.2 m/s	6 m/s	31.9	27.5	9.74	x
9	salida nitruración	-	34.1	-	9.72	x
	3					
10	Flujo máximo	11 m/s	30	25	9.5	x

Cabe resaltar que se utilizara el máximo flujo de agua debido a que las condiciones de operación serán las máximas, ya que se considera una posterior recirculación de agua.

- C) Se tomarán las muestras de la siguiente manera:

- C.1. Se tendrán los recipientes previamente preparados por el proveedor o laboratorio en el cual se realizarán las muestras.
- C.2. Se entra a operar la torre de desorción.
- C.3. Se toma la primera muestra de agua de salida del de sorbedor a un método escogido (ingresar método) flujo mínimo de aire, (ingresar valor...) por la parte inferior y se ingresa el recipiente a la respectiva nevera dada por el proveedor o laboratorio.
- C.4. Se aumenta el flujo de aire para el mismo método.
- C.5. Se aumenta el flujo de aire a máximo para el mismo método.
- C.6. Los puntos 4, 5 y 6 se repiten para los métodos adicionales.

ANEXO I.

Resultados obtenidos en mejores muestras



INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO



FORME 28 C1039
7 de septiembre de 2019

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

Señor
Juan Sebastián Fernández Murillo
LUICA S.A.S
Teléfono: 8931100 ext. 106
Calle 12 Mz C, Bg6
Bogotá D.C
Email: juan.fernandez@aluica.com.co

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

ORDEN DE SERVICIO: 9022
FECHA RECEPCIÓN MUESTRA: 19 de septiembre de 2019
MATRIZ: AI
FECHA DE MUESTREO: 18 de septiembre de 2019 Dirección: Calle 10A #13B-
TIPO DE MUESTREO: Simple
PUNTO DE MUESTREO: Nitruración 12:22 pm
IDENTIFICACIÓN MUESTRA: 19-AG4666
OBSERVACIONES: Muestra tomada por el cliente y enviada al laboratorio

Variable	Unidad	Método	Fecha Análisis	Resultados	Incertidumbre
Nitrógeno amoniacal, N-NH ₃	mg/L	SM 4500-NH ₃ B, C, Destilación y Volumétrico	2019-09-21	445,8	±15.1572

Nota: "STSM: "STANDARD METHODS For The Examination Of Water And Wastewater" 23RD EDITION, 2017. AI: Agua Industrial.

- OTA 1: Los resultados que se relacionan en este informe corresponden únicamente a la muestra analizada.
- OTA 2: La reproducción total o parcial de este informe deberá ser autorizada por el Laboratorio Quimicontrol Ltda.
- OTA 3: Las muestras serán eliminadas treinta (30) días después de haber sido recibidas.
- OTA 4: Incertidumbre expandida para un nivel de confianza del 95,45 % con un factor K=2.

Este informe NO es válido para impresión ni almacenamiento sin firma original de las personas autorizadas por el Laboratorio.

YINTHIA PAOLA ÁVILA GARAVITO
Química, Matrícula profesional PQ-5002
Coordinadora Técnica

Elaboró: Ninfa Yiseth Martínez Arenal
Revisó: Johan David Quiroga Alarcón

FIN DEL INFORME

ANEXO J. Resultados obtenidos agua amoniacal, dato más alto



INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO



FORME 43 C1039
7 de septiembre de 2019

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

Señor
Juan Sebastián Fernández Murillo
LUICA S.A.S
Teléfono: 8931100 ext. 106
2 Mz C, Bg6 TIPO DE MUESTREO:
MUESTREO: Nitruración 3:17
Cogotá D.C

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

ORDEN DE SERVICIO: 9022
FECHA RECEPCIÓN MUESTRA: 19 de septiembre de 2019
MATRIZ: AI
FECHA DE MUESTREO: 18 de septiembre de 2019 Dirección: Calle 10A #13B-
Simple e-mail: juan.fernandez@aluica.com.co PUNTO DE
IDENTIFICACIÓN MUESTRA: 19-AG4681
OBSERVACIONES: Muestra tomada por el cliente y enviada al laboratorio

Variable	Unidad	Método	Fecha Análisis	Resultados	Incertidumbre
Nitrógeno amoniacal, N-NH ₃	mg/L	SM 4500-NH ₃ B, C, Destilación y Volumétrico	2019-09-21	1065,4	±36.2236

VI: "STANDARD METHODS For The Examination Of Water And Wastewater" 23RD EDITION, 2017. AI: Agua Industrial.

- OTA 1: Los resultados que se relacionan en este informe corresponden únicamente a la muestra analizada.
OTA 2: La reproducción total o parcial de este informe deberá ser autorizada por el Laboratorio Quimicontrol Ltda.
OTA 3: Las muestras serán eliminadas treinta (30) días después de haber sido recibidas.
OTA 4: Incertidumbre expandida para un nivel de confianza del 95,45 % con un factor K=2.

Este informe NO es válido para impresión ni almacenamiento sin firma original de las personas autorizadas por el Laboratorio.

YNTHIA PAOLA ÁVILA GARAVITO
Química, Matrícula profesional PQ-5002
Coordinadora Técnica

Elaboró: Ninfa Yiseth Martínez Areval
Revisó: Johan David Quiroga Alarcón

FIN DEL INFORME

ANEXO K.

Resultados obtenidos agua amoniacal, dato más bajo



INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO



FORME 41 C1039
7 de septiembre de 2019

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

Señor
Juan Sebastián Fernández Murillo
LUICA S.A.S
Teléfono: 8931100 ext. 106
2 Mz C, Bg6 TIPO DE MUESTREO:
MUESTREO: Nitruración 2:52
Cogotá D.C

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

ORDEN DE SERVICIO: 9022
FECHA RECEPCIÓN MUESTRA: 19 de septiembre de 2019
MATRIZ: AI
FECHA DE MUESTREO: 18 de septiembre de 2019 Dirección: Calle 10A #13B-
Simple e-mail: juan.fernandez@aluica.com.co PUNTO DE
IDENTIFICACIÓN MUESTRA: 19-AG4679
OBSERVACIONES: Muestra tomada por el cliente y enviada al laboratorio

Variable	Unidad	Método	Fecha Análisis	Resultados	Incertidumbre
Nitrógeno amoniacal, N-NH ₃	mg/L	SM 4500-NH ₃ B, C, Destilación y Volumétrico	2019-09-21	1002,3	±34.0782

VI: "STANDARD METHODS For The Examination Of Water And Wastewater" 23RD EDITION, 2017. AI: Agua Industrial.

- OTA 1: Los resultados que se relacionan en este informe corresponden únicamente a la muestra analizada.
OTA 2: La reproducción total o parcial de este informe deberá ser autorizada por el Laboratorio Quimicontrol Ltda.
OTA 3: Las muestras serán eliminadas treinta (30) días después de haber sido recibidas.
OTA 4: Incertidumbre expandida para un nivel de confianza del 95,45 % con un factor K=2.

Este informe NO es válido para impresión ni almacenamiento sin firma original de las personas autorizadas por el Laboratorio.

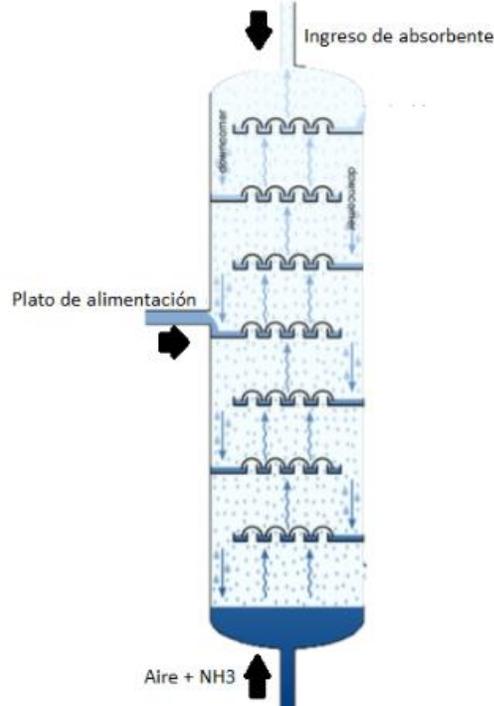
YNTHIA PAOLA ÁVILA GARAVITO
Química, Matrícula profesional PQ-5002
Coordinadora Técnica

Elaboró: Ninfa Yiseth Martínez Areval
Revisó: Johan David Quiroga Alarcón

FIN DEL INFORME

ANEXO L. Modelamiento de condiciones de operación de compuestos absorbentes.

Imagen de posible torre de platos con sus respectivos accesorios.

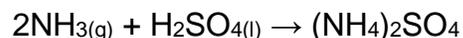


Fuente. Elaboración propia. Basado en: Hopp, Vollrath. Fundamentos de tecnología química para formación profesional (1994), pág. 395.

Para la elaboración del modelamiento matemático, es necesario comenzar con el estudio de las posibles reacciones que se va a realizar y compuestos absorbentes, es por eso por lo que se ha decidido y con ayuda de la bibliografía, encontrar compuestos capaces de absorber o retener el compuesto indeseado; en este caso residuos de amoniaco, para esto se realiza el estudio de energía libre de Gibbs, conversión de reacción a partir de estequiometria y cálculo de calor de reacción.

Para la primera reacción encontrada se observa que el absorbente es el ácido sulfúrico para producir Sulfato de amonio.

Reacción para producir sulfato de amonio.



A partir de la reacción, es necesario conocer la energía de formación de reacción para confirmar que tan instantánea es a las condiciones de operación obtenidas; para ello se busca la energía libre de Gibbs de cada compuesto.

Energía libre de Gibbs para sulfato de amonio.

GIBBS				
Sustancia	Fórmula	Tmin (K)	Tmáx (K)	Gibbs (298K) (kJ/mol)
Amoníaco	NH3	298.15	1500	-16.367
Ácido sulfúrico	H2SO4	298.15	368.3	-653.366
Sulfato amonio	de (NH4)2SO4	298.15	320.2	-596

Fuente. Yaws' Handbook of Thermodynamic Properties for Hydrocarbons and Chemicals.

A partir de esta información se determina la constante de equilibrio a la temperatura ideal para el sistema.

Energía Libre de Gibbs en reacción 1.

$$\Delta G = (NH_4)_2SO_4 - 2NH_3 - H_2SO_4$$

A partir de la teoría se encuentra que existe una relación para Gibbs con la constante de equilibrio, la cual se encuentra expresada en la siguiente ecuación.

Relación Constante de equilibrio-Gibbs.

$$\ln Ka = \frac{-\Delta G}{RT}$$

Relación Constante de equilibrio-Gibbs reemplazado.

$$\ln Ka = - \frac{(G(NH_4)_2SO_4 - 2NH_3 - H_2SO_4)}{RT}$$

Relación Constante de equilibrio-Gibbs resultado.

$$\ln Ka = - \frac{(-596000 - 2(-16367) - (-653366))}{8.314 * 298} = 259.49$$

Este procedimiento se realiza para todas las temperaturas de operación que se realiza actualmente en ALUICA S.A.S. a partir de estos valores, se halla la conversión del sulfato de amonio en equilibrio, para esto se supone una reacción ideal.

Constante de equilibrio reacción 1.

$$Ka = \frac{p((NH_4)_2SO_4)}{p(NH_3)^2 * p(H_2SO_4)}$$

Adicionalmente se emplea la definición de presiones parciales para así dejar en términos del compuesto a obtener, en este caso, sulfato de amonio.

Presiones parciales.

$$Pi = yi * P$$

Constante de equilibrio en términos de presión parcial reacción 1.

$$Ka = \frac{y((NH_4)_2SO_4)}{y(NH_3)^2 * y(H_2SO_4)} * P^{-1}$$

A partir de esta se realizó una tabla estequiométrica para determinar la conversión, en este caso (x) son consideradas como las moles reaccionantes para cada compuesto.

Estequiometria de reacción a sulfato de amonio

	NH₃	H₂SO₄	(NH₄)₂SO₄
MOLES INICIALES	2	1	0
MOLES EN EQUILIBRIO	2-2X	1-X	X

FRACCIÓN MOLAR EN EQUILIBRIO	$(2-2X)/(3-X)$	$(1-X)/(3-X)$	$X/(3-X)$
------------------------------------	----------------	---------------	-----------

Fuente: elaboración propia.

Se reemplaza en la ecuación de fracción molar en equilibrio para hallar los valores de conversión para el compuesto deseado a temperaturas aproximadas de trabajo en la empresa.

Reemplazando en los valores.

Fracción molar en equilibrio en constante de equilibrio reacción 1.

$$Ka = \frac{\frac{x}{3-x}}{\frac{1-x}{3-x} * \frac{2-2x^2}{3-3x}}$$

Simplificando

Fracción molar en equilibrio en constante de equilibrio, simplificado reacción 1.

$$Ka = \frac{x(3-x)^2}{4(1-x)^3}^{103}$$

Resolviendo los valores de Ka obtenidos, se obtiene un valor de conversión de:

Fracción molar en equilibrio, resuelto a T=298K reacción 1.

$$Ka = \ln 259.49 = \frac{x(3-x)^2}{4(1-x)^3}$$

$$x = 1$$

A partir de esto, se halla la composición de la torre para alcanzar el equilibrio:

Fracción molar en equilibrio para $(NH_4)_2SO_4$.

$$para (NH_4)_2SO_4 = \frac{x}{3-x}$$

¹⁰³Wolfram Research, Inc. (www.wolfram.com), Mathematica Online, Champaign, IL (2018). Disponible en: [https://www.wolframalpha.com/input/?i=\(\(x%2F\(3-x\)\)%2F\(\(\(1-x\)%2F\(3-x\)\)*\(2-2x\)%2F\(3-x\)\)\)%5E2](https://www.wolframalpha.com/input/?i=((x%2F(3-x))%2F(((1-x)%2F(3-x))*(2-2x)%2F(3-x)))%5E2)

A partir de estos cálculos, y a diferentes temperaturas, se obtuvieron los resultados descritos en la siguiente tabla.

Resultados a diferentes temperaturas sulfato de amonio.

Temperatura(K)	Ko	Ln Ka	Ka	Conversión
100	3.6763E+108	259.4900168	4.9554E+112	1
300	1.54338E+36	86.49667228	3.67306E+37	1
315	2.91885E+34	82.37778312	5.97333E+35	1
350	1.04398E+31	74.14000481	1.57977E+32	1
400	1.38469E+27	64.87250421	1.49201E+28	1
450	1.33551E+24	57.66444819	1.10497E+25	1
500	5.16515E+21	51.89800337	3.45953E+22	1
550	5.48487E+19	47.18000306	3.0904E+20	1
600	1.24233E+18	43.24833614	6.06057E+18	1

Fuente: elaboración propia.

Como se puede ver, la reacción en condiciones planteadas es considerada viable, a partir de la energía libre de Gibbs y de la conversión de la reacción.

De la misma manera se realizó el procedimiento para verificar la efectividad de la reacción con el ácido clorhídrico; así como también se realizó su respectivo paso a paso, en donde se encontrará la viabilidad de esta reacción.

Reacción para producir cloruro de amonio.



Energía libre de Gibbs para Cloruro de amonio.

GIBBS				
Sustancia	Fórmula	Tmin (K)	Tmáx (K)	Gibbs (298K) (kJ/mol)
Amoníaco	NH3	298.15	1500	-16.367
Ácido Clorhídrico	HCl	298.15	1500	-95.3

Cloruro de amonio	NH₄Cl	298.15	298.15	-
				203.092

Fuente. Yaws' Handbook of Thermodynamic Properties for Hydrocarbons and Chemicals.

A partir de esta información se determina la constante de equilibrio a la temperatura ideal para el sistema.

Energía Libre de Gibbs en reacción 2.

$$\Delta G = NH_4Cl - NH_3 - HCl$$

Se utiliza la ecuación de Relación Constante de equilibrio-Gibbs y así mismo se reemplaza en la relación constante de equilibrio-Gibbs, realizando así este para todas las temperaturas de operación que se realiza actualmente en ALUICA S.A.S. a partir de estos valores, se halla la conversión del cloruro de amonio en equilibrio, para esto se supone una reacción ideal.

Constante de equilibrio reacción 2.

$$K_a = \frac{p(NH_4Cl)}{p(NH_3) * p(HCl)}$$

Utilizando la ecuación de Presiones parciales, se sustituye en la constante de equilibrio para obtener la ecuación en términos de esta presión.

Constante de equilibrio en términos de presión parcial reacción 2.

$$K_a = \frac{y(NH_4Cl)}{y(NH_3) * y(HCl)} * P^{-1}$$

Se realizó una tabla estequiométrica para determinar la conversión, en este caso (x) son consideradas como las moles reaccionantes para cada compuesto.

Estequiometria de reacción a cloruro de amonio.

	NH₃	HCl	NH₄Cl
MOLES INICIALES	1	1	0

MOLES EN EQUILIBRIO	1-X	1-X	X
FRACCIÓN MOLAR EN EQUILIBRIO	$(1-X)/(2-X)$	$(1-X)/(2-X)$	$X/(2-X)$

Fuente: elaboración propia.

Se reemplaza en la ecuación de fracción molar en equilibrio para hallar los valores de conversión para el compuesto deseado a temperaturas aproximadas de trabajo en la empresa.

Reemplazando en los valores.

Reemplazando en los valores.

Fracción molar en equilibrio en constante de equilibrio reacción 2.

$$Ka = \frac{\frac{x}{2-x}}{\frac{1-x}{2-x} * \frac{1-x}{2-x}}$$

Simplificando.

Fracción molar en equilibrio en constante de equilibrio, simplificado reacción 1.

$$Ka = \frac{x(2-x)}{(1-x)^2}^{104}$$

Resolviendo los valores de Ka obtenidos, se obtiene un valor de conversión de:

Fracción molar en equilibrio, resuelto a T=298K reacción 2.

$$Ka = \ln 50.909 = \frac{x(2-x)}{(1-x)^2}$$

$$x = 1$$

A partir de esto, se halla la composición de la torre para alcanzar el equilibrio:

¹⁰⁴ Wolfram Research, Inc. (www.wolfram.com), Mathematica Online, Champaign, IL (2018). Disponible en: [https://www.wolframalpha.com/input/?i=\(\(x\)/\(2-x\)\)/\(1-x\)^2](https://www.wolframalpha.com/input/?i=((x)/(2-x))/(1-x)^2)

Fracción molar en equilibrio para (NH₄)₂SO₄.

$$\text{para NH}_4\text{Cl} = \frac{x}{2 - x}$$

A partir de estos cálculos, y a diferentes temperaturas, se obtuvieron los resultados descritos en la siguiente tabla.

Resultados a diferentes temperaturas cloruro de amonio.

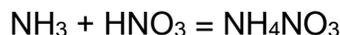
Temperatura(K)	Ko	Ln Ka	Ka	Conversión
300	1.53237E+16	50.90977735	1.28776E+22	1
315	2.59796E+15	48.48550224	1.14021E+21	1
350	7.4674E+13	43.63695201	8.93897E+18	1
400	1.37728E+12	38.18233301	3.82276E+16	1
450	61693994210	33.93985157	5.49402E+14	1
500	5143024575	30.54586641	1.8446E+13	1
550	673566602	27.76896946	1.14792E+12	1
600	123789031.8	25.45488868	1.1348E+11	1

Fuente: elaboración propia.

Como se puede ver, la reacción en condiciones planteadas es considerada viable, a partir de la energía libre de Gibbs y de la conversión de la reacción.

De la misma manera se realizó el procedimiento para verificar la efectividad de la reacción con el nitrato de amonio; así como también se realizó su respectivo paso a paso, en donde se encontrará la viabilidad de esta reacción.

Reacción para producir Nitrato de amonio



Energía libre de Gibbs para nitrato de amonio.

GIBBS				
Sustancia	Fórmula	Tmin (K)	Tmáx (K)	Gibbs (298K) (kJ/mol)
Amoníaco	NH ₃	298.15	1500	-16.367
Ácido nítrico	HNO ₃	298.15	1.50E+03	-73.941

Nitrato de amonio	NH4NO3	298.15	298.15	-183.9
--------------------------	---------------	--------	--------	--------

Fuente. Yaws' Handbook of Thermodynamic Properties for Hydrocarbons and Chemicals

A partir de esta información se determina la constante de equilibrio a la temperatura ideal para el sistema.

Energía Libre de Gibbs en reacción 3.

$$\Delta G = NH_4NO_3 - NH_3 - HNO_3$$

Se utiliza la ecuación de la relación Constante de equilibrio-Gibbs y así mismo se remplazan en la relación constante de equilibrio-Gibbs, realizando así este para todas las temperaturas de operación que se realiza actualmente en ALUICA S.A.S. a partir de estos valores, se hallan la conversión del nitrato de amonio en equilibrio, para esto se supone una reacción ideal.

Constante de equilibrio reacción 3.

$$K_a = \frac{p(NH_4NO_3)}{p(NH_3) * p(HNO_3)}$$

Utilizando la ecuación de Presiones parciales, se sustituye en la constante de equilibrio para obtener la ecuación en términos de esta presión.

Constante de equilibrio en términos de presión parcial reacción 3.

$$K_a = \frac{y(NH_4NO_3)}{y(NH_3) * y(HNO_3)} * P^{-1}$$

Se realizó una tabla estequiométrica para determinar la conversión, en este caso (x) son consideradas como las moles reaccionantes para cada compuesto.

Estequiometria de reacción a nitrato de amonio.

	NH3	HNO3	NH4NO3
MOLES INICIALES	1	1	0

MOLES EN EQUILIBRIO	1-X	1-X	X
FRACCIÓN MOLAR EN EQUILIBRIO	(1-X)/(2-X)	(1-X)/(2-X)	X/(2-X)

Fuente. Elaboración propia.

Se reemplaza en la ecuación de fracción molar en equilibrio para hallar los valores de conversión para el compuesto deseado a temperaturas aproximadas de trabajo en la empresa.

Reemplazando en los valores.

Reemplazando en los valores.

Fracción molar en equilibrio en constante de equilibrio reacción 3.

$$K_a = \frac{\frac{x}{2-x}}{\frac{1-x}{2-x} * \frac{1-x}{2-x}}$$

Simplificando. Fracción molar en equilibrio en constante de equilibrio, simplificado reacción 1.

$$K_a = \frac{x(2-x)}{(1-x)^2}^{105}$$

Resolviendo los valores de Ka obtenidos, se obtiene un valor de conversión de:

Fracción molar en equilibrio, resuelto a T=298K reacción 3

$$K_a = \ln 37.523 = \frac{x(2-x)}{(1-x)^2}$$

$$x = 1$$

A partir de esto, se hallan la composición de la torre para alcanzar el equilibrio:

Fracción molar en equilibrio para NH4Cl

$$para NH_4Cl = \frac{x}{2-x}$$

¹⁰⁵Wolfram Research, Inc. (www.wolfram.com), Mathematica Online, Champaign, IL (2018). Disponible en: [https://www.wolframalpha.com/input/?i=\(\(x\)/\(2-x\)\)/\(\(\(1-x\)/\(2-x\)\)*\(\(1-x\)/\(2-x\)\)\)](https://www.wolframalpha.com/input/?i=((x)/(2-x))/(((1-x)/(2-x))*((1-x)/(2-x))))

A partir de estos cálculos, y a diferentes temperaturas, se obtuvieron los resultados descritos en la siguiente tabla.

Resultados a diferentes temperaturas cloruro de amonio.

Temperatura(K)	Ko	Ln Ka	Ka	Conversión
300	1.56092E+17	37.52385534	1.97881E+16	1
350	5.45989E+14	32.16330458	9.29706E+13	1
400	7.85301E+12	28.14289151	1.66841E+12	1
450	2.89904E+11	25.01590356	73159188109	1
500	20702792607	22.51431321	5995728924	1
550	2388955828	20.46755746	774367759.8	0.999928
600	395085213.7	18.76192767	140670055.2	0.99983201

Fuente: elaboración propia.

Guía para selección y evaluación de componentes internos

	Selection Guide for Distillation-Column Internals (after King, 1980)					
	Trays			Packed		
	Sieve, Valve	Bubble-Cap	Counter-Flow	Random	Stacked	Disk& Donut
Pressure:						
Low, <100 mm Hg	2	1	0	2	3	1
Medium	3	2	1	2	1	1
High, >50% P _c	3	2	2	2	0	0
Low DP*	1	0	0	2	2	3
High turndown	2	3	0	1	2	1
Liquid flow rate:						
Low	1	3	0	1	2	0
High	2	1	3	3	0	2
Expanded column capacity	2	0	2	2	3	0
Diameter:						
Small	1	1	1	3	2	1
Medium(3-9 m)	3	2	2	2	2	1
Large	3	1	2	2	1	1
Foaming system	2	1	2	3	0	1
Suspended solids	2	1	3	1	0	1
Dirty or polymerizing	2	1	3	1	0	2
Corrosive	2	1	2	3	1	2
Viscous	2	1	1	3	0	0
Multiple feeds or sidestreams	3	3	2	1	0	1
Internal cooling	2	3	1	1	0	0
Low cost*	2	1	3	2	1	3
Reliable design	3	2	1	2	1	1

* Efficiency or performance unimportant

Legend: 0 = Do not use
1 = Evaluate carefully
2 = Usually applicable
3 = Best choice

FIG 9.01

Fuente. CHEMICAL ENGINEERING DESIGN. Coulson & R. Ch. E. Vol 6.

ANEXO M.
Matriz de selección paso a paso

Se realizó una tabla en la que se declaran cuáles son los criterios más importantes para su separación, adicional, se calificó de acuerdo con lo considerado más importantes a menos importante.

La Tabla siguiente muestra los porcentajes dados a cada criterio para seleccionar la matriz, para esta calificación se recurrió a la ayuda del coordinador del proceso de nitruración.

Porcentajes de criterios de evaluación.

Criterio	%
Costo	35
Viabilidad	20
Eficiencia	30
Tiempo	15

Fuente: elaboración propia

Las diferentes selecciones se realizarán mediante una valoración, considerando los valores de 4 hasta 5 como muy adecuado; un valor de 2 a 3 como adecuado y 1 como poco adecuado.

Calificación para las alternativas.

Estándar	Valoración
Muy adecuado	5 a 4
Adecuado	2 a 3
Poco adecuado	1

Fuente. Elaboración propia.

Según Kepner & Tregoe¹⁰⁶, la matriz es dividida en dos etapas, en la primera se deben comprender y analizar de manera individual los criterios; la segunda etapa se asigna una calificación a las alternativas de 1 a 5, y se multiplica por el porcentaje que equivale al peso sobre el total de los criterios. Finalmente se organizan las

¹⁰⁶ SÁNCHEZ GUERRERO, Gabriel de las Nieves. Técnicas participativas para la planeación. Procesos breves de intervención. Fundación ICA. 2003. p. 197

alternativas aprobadas de acuerdo con el valor obtenido. Para esto, se deben clasificar los componentes a escoger; para esto, se le da un nombre a cada una.

Nomenclatura de componentes.

Compuesto	Nomenclatura
Sulfato de amonio	SO4
Cloruro de amonio	Cl
Nitrato de amonio	NO3

Fuente: elaboración propia.

Para el siguiente proceso se debe realizar la sumatoria calificativa de las alternativas planteadas; en estas se ordenan los resultados, utilizando la Ecuación (...) que es la relación para el método Kepner & Tregoe

Relación para el método Kepner & Tregoe.

$$\Sigma = C * Ca$$

Siendo:

Σ : Resultado total.

C: Peso, es decir, % de cada criterio de selección.

Ca: Calificación asignada para cada alternativa.

A continuación, se muestra El **cuadro (...)** en el cual se muestran los criterios mínimos (SI/NO) que se deben cumplir.

Matriz de cumplimiento de los criterios mínimos (SI/NO).

Criterio	Alternativas		
	SO4	Cl	NO3
Costo	SI	SI	SI
Viabilidad	SI	SI	SI
Eficiencia	SI	SI	SI
Tiempo	SI	SI	SI

Fuente. Elaboración propia.

A partir de esto, se encuentra que, al necesitar y depender de todos los criterios, se decide evaluar a partir de cuál es el mejor compuesto o con mayor puntaje; se mostrará la matriz de selección de alternativas adaptada a la teoría planteada por Kepner & Tregoe.

El primer criterio a evaluar es el costo, se tiene una diferencia significativa, debido a que la empresa Aluica S.A.S. ya cuenta con un permiso llamado “control para el manejo de productos y sustancias químicas”, como lo son el ácido clorhídrico, ácido sulfúrico y ácido nítrico; se hizo un análisis de manera general de los equipos o accesorios que deberían ser empleados en cada una de estas alternativas, dependen de la cantidad del calor desprendido de la reacción, así como de su efectividad al momento de convertirse en el compuesto deseado; dicho esto, se dio la valoración, para los compuestos mencionados; se determinó que a partir de los cálculos realizados de calor desprendido, el diseño puede ser el mismo para cada uno de los compuestos, entonces, este costo dependerá del valor del mercado hoy en día; se le da una calificación mayor a la variable de costo de ácido clorhídrico ya que, aunque el precio del reactivo en el mercado es de alrededor de US\$ 220.00 – US\$400.00¹⁰⁷ para 6 galones, en comparación con el ácido sulfúrico y el ácido nítrico que tienen un valor de alrededor US\$ 250.00 – 380.00¹⁰⁸ para los mismos 6 galones¹⁰⁹.

De otra parte, el valor del subproducto formado por el gas amoniacal y el ácido clorhídrico es de mayor valor en comparación con los otros, sin embargo, se tiene uno de los ácidos actualmente en uso en la empresa, esto generaría un costo acumulado para 2 de los procesos con un mismo reactivo; es por esto por lo que se le dio los valores de $H_2SO_4 = 3$, $HCl = 3.5$ y $HNO_3 = 2$.

Para desarrollar el siguiente criterio de viabilidad, es importante revisar las condiciones de seguridad, así como el calor generado por la reacción, a partir de esto se le da el mayor valor al ácido sulfúrico debido a que en la empresa ya se utiliza este compuesto; Aluica S.A.S. no considera muy necesario una inversión que

¹⁰⁷ Anónimo, Ácido Clorhídrico/hcl 32% Min/cas: 7647-01-0 – Hcl, Ácido Muriático, Ácido Clorhídrico 32 Producto de Alibaba.com. [Consultado el 10 de noviembre 2019]. Disponible en:

[//www.alibaba.com/product-detail/Hydrochloric-acid-HCL-32-Min-CAS_60453546751.html](http://www.alibaba.com/product-detail/Hydrochloric-acid-HCL-32-Min-CAS_60453546751.html)

¹⁰⁸ Precio De Fábrica Líquido Incoloro 60% Ácido Nítrico 68% - Planta De Ácido Nítrico, Ácido Nítrico 68%, Ácido Nítrico 60% Producto de Alibaba.com. [Consultado el 10 de noviembre 2019]. Disponible en:

[//www.alibaba.com/product-detail/Factory-price-colorless-liquid-60-68_62305879208.html](http://www.alibaba.com/product-detail/Factory-price-colorless-liquid-60-68_62305879208.html)

¹⁰⁹ Ácido Clorhídrico/hcl 32% Min/cas: 7647-01-0 - Hcl, Ácido Muriático, Ácido Clorhídrico 32 Producto de Alibaba.com. [Consultado el 10 de noviembre 2019]. Disponible en: [//www.alibaba.com/product-detail/Hydrochloric-acid-HCL-32-Min-CAS_60453546751.html](http://www.alibaba.com/product-detail/Hydrochloric-acid-HCL-32-Min-CAS_60453546751.html)

supere los \$15´000.000 COP límite establecido por las directivas de la empresa; la implementación de un nuevo reactivo aumentaría estos costos; a partir de esto, y considerando el producto que genere menos costos, así como el de mejor velocidad, a condiciones actuales de la empresa, es considerado la siguiente clasificación: $H_2SO_4 = 4.5$, $HCl = 4.3$ Y $HNO_3 = 4.0$

Para el criterio de eficiencia, con el fin de verificarlos se realizó la comprobación de la energía libre de Gibbs junto a la conversión, desarrollada anteriormente (ver grafica 4 y 5) con esto, pudimos verificar que a las temperaturas de operación del nitrurado, principalmente la temperatura de salida del agua (aproximadamente 42°C) manejan una conversión lo suficientemente alta, considerando que los rangos de temperatura manejada en el proceso (20°C a 500 °C) dando como conclusión que el único reactivo que es más negativo en la energía libre de Gibbs (más efectiva la reacción) es el ácido sulfúrico pero no significativamente; es por esto que se decidió dar una calificación a este de 4.5, mientras que al ácido clorhídrico y nítrico se les do calificación de 4.

Para el ultimo criterio de tiempo, es considerado el tiempo de gestión para la obtención del producto en la empresa, debido a que el ácido sulfúrico y ácido clorhídrico dependen de permisos especiales a nivel nacional; permiso llamado “control para el manejo de productos y sustancias químicas”¹¹⁰ ; para el uso de estas sustancias; se les dio la siguiente calificación, $H_2SO_4 = 3$, $HCl = 3$ Y $HNO_3 = 4$.

Criterio	C (%)	Alternativas Consideradas		
		SO ₄	Cl	NO ₃
Costo	35	3	3.5	2
Viabilidad	20	4.5	4.3	4.0
Eficiencia	30	4.5	4	4
Tiempo	15	3	3	4
Promedio		4.1	3.735	3.3

¹¹⁰ Resolución 0009 de 1987, por el cual el Consejo Nacional de Estupefacientes reglamenta en el territorio nacional la importación, fabricación distribución, transporte y consumo de dieciocho (18) sustancias químicas, [consultado el de oct. 29, 2019] disponible en:

<http://www.minjusticia.gov.co/Portals/0/Ciudadano/Tramites/Control%20de%20Administraci%C3%B3n%20para%20el%20manejo%20de%20sustancias%20qu%C3%ADmicas.pdf>

ANEXO N.
Cálculo ácido sulfúrico teórico adecuado para el plato teórico

Solución de platos teóricos

Para la solución de los platos teóricos, se utilizó el balance realizado anteriormente, se utilizó la tabla 18, con los flujos estequimétricos.

Reacción: $2\text{nh}_3(\text{g}) + \text{h}_2\text{so}_4(\text{l}) \rightarrow (\text{nh}_4)_2\text{so}_4$			
Compuesto	Peso (g/mol)	Flujo estequiométrico (kg/s)	
2nh_3	34.062	3.0209e-06	Flujo entrada
H_2so_4	98.079	8.6985e-06	Flujo entrada
$(\text{nh}_4)_2\text{so}_4$	132.14	1.1719e-05	

Adicionalmente se utilizó la ecuación 8 correspondiente a los flujos másicos a molares, obteniendo los siguientes valores

$$\begin{aligned} \text{Para amonio: } (H_2SO_4): & 3.0209e - 06 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 34.02 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \times \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}} \\ & = 1.0277E - 07 \frac{\text{mol}}{\text{s}} NH_3 \end{aligned}$$

$$\text{Para acido: } 8.6985e - 06 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 98.079 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \times \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}} = 8.53$$

Se realizó entonces el correspondiente análisis de flujos por moles entrantes y salientes.

Flujo de aire de entrada	1.236e-5
Flujo de amoniaco de entrada	1.7739e-7
Flujo aire de salida	1.236e-5
Flujo amoniaco de salida	1.0277e-7

A partir de estos flujos se determinó los porcentajes de entrada y salida de cada uno, con respecto al amoniaco, obteniendo entonces

Flujo de aire de entrada	0.014
Flujo de amoniaco de entrada (ácido)	0
Flujo aire de salida	
Flujo amoniaco de salida	0.0083

A partir de la ecuación 10.6-2 del libro Procesos de transporte y principios de procesos de separación, Geankoplis, edición 2007, encontramos que:

$$L' \left(\frac{XO}{1 - XO} \right) + V' \left(\frac{YN + 1}{1 - YN + 1} \right) = L' \left(\frac{XN}{1 - XN} \right) + V' \left(\frac{Y1}{1 - Y1} \right)$$

Obtenemos que $X_N=0.090218$; con este valor se calculan varios puntos intermedios entre la meta de diseño y el valor obtenido, para obtener la línea de operación. Tomando que $Y_{n+1}=0.01$ y 0.012

$$L' \left(\frac{X0}{1 - X0} \right) + V' \left(\frac{YN + 1}{1 - YN + 1} \right) = L' \left(\frac{XN}{1 - XN} \right) + V' \left(\frac{Y1}{1 - Y1} \right)$$

Obteniendo la gráfica 7.

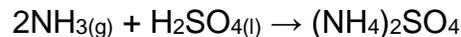
Para el ácido sulfúrico

En primera instancia se realiza el cálculo de la concentración teórica de la salida del aire junto con amoníaco, el cual se encuentra en la siguiente ecuación y se tiene como resultado una concentración de amoníaco a la salida en el aire de 593.3 mg/L lo cual será el dato inicial para el proceso de absorción. Cálculo de concentración de amoníaco a la salida del proceso de desorción

$$\begin{aligned} \text{concentración } NH_3(g) &= \text{Concentración de } NH_3(aq)_{in} - \text{Concentración de } NH_3(g)_{out} \\ \text{concentración } NH_3(g) &= 1015.1 \frac{mg}{l} - 445.8 \frac{mg}{l} = 569.3 \frac{mg}{l} \end{aligned}$$

Con el dato anterior y teniendo en cuenta la reacción se procede a realizar el cálculo de la concentración de ácido sulfúrico a la entrada de la columna a partir de la estequiometría.

Reacción para producir sulfato de amonio.



Como se muestra en la ecuación siguiente se calculará los gramos de amoníaco presentes a partir de la relación de molaridad.

Cálculo de la concentración molar de amoníaco a la entrada.

$$\text{Molaridad} = \frac{\text{gr de soluto}}{\text{l de la solución}}$$

$$0.5933 \frac{gr}{l} = \frac{\text{gr de soluto}}{1 L \text{ de solución}}$$

$$\text{gr de soluto} = 0.5933 \text{ gramos.}$$

Con este valor y con el peso molecular del amoníaco se calcula el número de moles, este valor será determinante para calcular la cantidad de moles necesarios para el ácido sulfúrico. En la ecuación siguiente se muestra el cálculo realizado para tal fin.

Determinación de moles para amoníaco.

$$\text{Moles de } NH_3 = 0.5933 \text{ gr} * \frac{1 \text{ mol}}{17.031 \text{ gr}} = 0.0348 \text{ mol}$$

Teniendo el valor de los moles del amoníaco se procede a calcular los moles de ácido sulfúrico a partir de estequiometría. A continuación, se muestra el cálculo.

$$0.0348 \text{ mol } NH_3 * \frac{1 \text{ mol de } H_2SO_4}{2 \text{ mol de } NH_3} = 0.0174 \text{ mol de } H_2SO_4$$

Cabe resaltar que el cálculo siempre se ha realizado en base de 1L de solución sin embargo para esta práctica la disolución solo se hará con 0,1L, por esto se utiliza el siguiente cálculo para hallar el equivalente.

$$\begin{aligned} C_a V_a &= C_B V_B \\ 0.0174 \text{ mol } H_2SO_4 * 1L &= C * 0.1L \\ C_B &= 0.174 \text{ mol} \end{aligned}$$

Teniendo el valor equivalente para una dilución de 100 ml se procede a pasar esta concentración a gr, sin embargo, el ácido sulfúrico disponible está en fase líquida, por tal motivo se utiliza el peso molecular y la densidad para calcular el equivalente en ml.

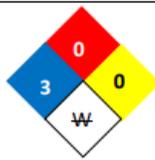
$$0.174 \text{ mol de } H_2SO_4 * 98.079 \frac{\text{gr}}{\text{mol}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1840 \text{ kg}} * \frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} * \frac{1000 \text{ ml}}{\text{l}} = 9.2748 \text{ ml}$$

Sin embargo, es importante decir que el cálculo hecho anteriormente se asume que el ácido sulfúrico se encuentra en un 100% p/p, en la empresa se tiene disponible el ácido sulfúrico a un 50% p/p por lo cual se requiere el siguiente cálculo.

$$\begin{aligned} C_a V_a &= C_B V_B \\ 100 * 9.274 &= C * 4.637 \\ C_B &= 4.637 \text{ ml} \end{aligned}$$

El valor de 4.637 ml será el valor óptimo para la realización de la reacción entre amoníaco y ácido sulfúrico para producir sulfato de amonio.

ANEXO O. Ficha de seguridad ácido sulfúrico

 Facultad de Química Coordinación de Protección Civil	HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DE SUSTANCIAS QUÍMICAS		ÁCIDO SULFÚRICO Elaboración: 06/10/2016 Revisión: N.A.
SECCIÓN I. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA Y DATOS GENERALES DE LA EMPRESA			
1. Nombre de la sustancia química: Ácido Sulfúrico.			
2. Uso recomendado y restricciones de la sustancia: Se utiliza para la fabricación de otros ácidos, fertilizantes, explosivos, pinturas, lacas y barnices entre otros.			
3. Nombre del fabricante o importador: N.D.		5. EN CASO DE EMERGENCIA COMUNICARSE A:	
4. Distribuidor: N.D.		SETIQ: 5559-1588 ó 01-800-00214-00	
		BOMBEROS UNAM: 5616-1560 / 5622-0565 / 5622-0566	
		PROTECCIÓN CIVIL UNAM: 5622-2440	
SECCIÓN II. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS			
Pictograma de peligro:		Palabra de Advertencia:	
		PELIGRO	
		Indicación de Peligro:	
		H290. Puede ser corrosivo para los metales.	
		H314. Provoca graves quemaduras en la piel y lesiones oculares.	
SECCIÓN III. INFORMACIÓN DE LA SUSTANCIA QUÍMICA.			
1. Nombre químico: Ácido sulfúrico 96%		2. Nombre comercial: Ácido Sulfúrico.	
Fórmula: H ₂ SO ₄			
3. Porcentaje y nombre de los componentes:		4. Sinónimos: Aceite de vitriolo, sulfato de dihidrógeno, ácido de baterías.	
Azufre: 32.69%, Oxígeno: 65.25%, Hidrógeno: 2.06%		5. No. CAS: 7664-93-9	
		6. No. de ONU: 1830	
7. Impurezas y aditivos estabilizadores: Agua, óxidos de nitrógeno y algunos metales pesados.			
SECCIÓN IV. PRIMEROS AUXILIOS.			
1. Vía de Entrada		2. Primeros auxilios	
Oral	NO INDUCIR EL VÓMITO ya que existe riesgo de perforación de esófago y quemadura química en cavidad bucal. Nunca dé nada por la boca a una víctima que esté perdiendo la consciencia, inconsciente o con convulsiones. Haga que la víctima se enjuague la boca con abundante agua. Si está consciente darle a tomar de 60 a 240 ml de agua. Si no se puede evitar el vómito, haga que la víctima se incline hacia adelante para reducir el riesgo de aspiración.		
Cutánea	Retirar la ropa y calzado contaminados tan pronto como sea posible. Lavar la zona afectada con abundante agua y jabón al menos durante 20 minutos. Buscar atención médica inmediata.		
Ocular	Lavar los ojos con abundante agua corriente al menos durante 20 minutos. Levantar y separar los párpados para asegurar la eliminación completa de la sustancia química. Buscar atención médica inmediata (oftalmólogo).		
Respiratoria	Retire a la víctima lejos de la fuente de exposición hacia un área ventilada. Si no respira administrar respiración artificial. Si respira con dificultad administrar oxígeno. Buscar atención médica inmediata.		
Efectos por exposición aguda: Irritación de la garganta, nariz y ojos. Los labios, uñas y piel se tornan azulados. Puede provocar tos, mareo, fiebre, problemas del habla, vómito, náusea, aumento precipitado o disminución de presión arterial, edema pulmonar, pérdida de la visión, dificultad para respirar, debilidad corporal y dolor en el pecho. Riesgo de ceguera.			
Efectos por exposición crónica: La exposición a altas concentraciones de neblina ácida causa dermatitis, erosión y decoloración de los dientes, así como trastornos respiratorios.			
Indicaciones médicas: Es necesaria la revisión por un médico especialista en toxicología.			
EN CUALQUIERA DE LOS CASOS BUSQUE ATENCIÓN MÉDICA INMEDIATAMENTE			
SECCIÓN V. MEDIDAS CONTRA INCENDIOS.			
1. Medio de extinción:			
Agua <input type="checkbox"/> Espuma <input type="checkbox"/> CO ₂ <input checked="" type="checkbox"/> Polvo químico <input checked="" type="checkbox"/> Otros medios <input checked="" type="checkbox"/>			
Otros: Usar el agente de extinción adecuado según sea el tipo de incendio alrededor. NO AGREGAR AGUA DIRECTAMENTE AL ÁCIDO.			
2. Productos tóxicos de la combustión: Óxidos de azufre, hidrógeno, anhídrido sulfuroso y sulfúrico.			
3. Equipo de protección personal: Equipo de respiración autónoma (SCBA), guantes, botas, lentes de seguridad, y traje completo de protección de bomberos.			
4. Condiciones que conducen a otro riesgo especial: En contacto con metales puede formarse hidrógeno gaseoso con riesgo de explosión. La reacción genera calor.			
5. Procedimiento y precauciones especiales durante el combate de incendios: 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 adecuado a la sustancia. Si usa agua para apagar el fuego de los alrededores evitar que haga contacto con el ácido. Si es posible, retire del fuego los contenedores de ácido.			
SECCIÓN VI. MEDIDAS EN CASO DE DERRAME O FUGA ACCIDENTAL			
1. Procedimiento y precauciones especiales: Evacuar o aislar el área de peligro. Usar equipo de protección personal y respiratoria, evitando respirar los vapores, la neblina o el gas. Evitar el acceso a personas sin equipo de protección personal. Ubicarse a favor del viento. Ventilar el área. Eliminar toda fuente de ignición. No tocar ni caminar sobre el material derramado. No adicionar agua al ácido.			
2. Equipo de Protección: Equipo de respiración autónoma (ERA), guantes, botas y lentes de seguridad. En caso de incendio, traje completo de protección de bomberos.			
3. Precauciones relativas hacia el medio ambiente: Evitar que el ácido llegue al alcantarillado o cualquier fuente de agua.			
4. Métodos y materiales para la contención: Contener el derrame con diques hechos de arena, tierra de diatomea, arcilla u otro material inerte para evitar que entre en alcantarillas, sótanos y corrientes de agua. Neutralizar lentamente con ceniza de sosa, cal u otra base.			
SECCIÓN VII. MANEJO Y ALMACENAMIENTO			
1. Precauciones para garantizar un manejo seguro: Usar siempre protección personal así sea corta la exposición o la actividad que realice con el producto. Usar la menor cantidad posible. Evitar la formación de vapores o neblinas del ácido. Al diluirlo, adicione el ácido al agua lentamente ya que reacciona de manera violenta.			
2. Condiciones de almacenamiento seguro: Mantener ventilada el área de almacenamiento y uso. Mantener estrictas normas de higiene, no fumar, no comer en el sitio de trabajo. Conocer la ubicación del equipo para la atención de emergencias. Leer la etiqueta de seguridad antes de usar el producto.			

SECCIÓN VIII. CONTROL DE EXPOSICIÓN Y PROTECCIÓN PERSONAL					EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL		
1. VLE-PPT: 1 mg/m ³	2. VLE-CT: N.D.	3. VLE-P: N.D.	4. IPVS: N.D.	5. Grados de Riesgo	B 		
6. Equipo de Protección Personal: Guantes, botas y lentes de seguridad.				Salud			3
7. Control técnico: Ventilación local y general, para asegurar que la concentración no exceda los límites de exposición ocupacional (OSHA PEL: TWA = 0.1 mg/m ³ , ACGIH = 0.2 mg/m ³). Control exhaustivo de las condiciones de proceso. Debe disponerse de duchas y estaciones lavaojos.				Inflamabilidad			0
				Reactividad	0		
SECCIÓN IX. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS							
1. Estado físico, color y olor: Líquido aceitoso, inodoro e incoloro a condiciones normales. Toma un ligero olor picante en caliente.			2. Umbral de olor:		1 mg/m ³		
3. pH (solución acuosa al 1 N): 0.3			4. Temperatura de fusión (a 1 atm, al 93%):		-32°C		
5. Masa molar: 98.08 g/mol			6. Temperatura de ebullición (a 1 atm, al 95%):		290 °C		
7. Temperatura de inflamación: N.D.			8. Velocidad de evaporación (butilacetato = 1):		N.D.		
9. Porcentaje de volatilidad: N.D.			10. Presión de vapor (a 146°C):		1 mmHg		
11. Densidad de vapor (aire=1): 3.4			12. Densidad de líquido (agua=1):		1.84 (a 98%)		
13. Solubilidad en agua: 100%			14. Coeficiente de Partición n-octanol/agua:		N.D.		
15. Temperatura de autoignición: N.D.			16. Temperatura de descomposición:		30 °C		
17. Viscosidad (a 55°C al 98%): 25 cps.			18. Otros datos relevantes: Reacciona violentamente con el agua.				
19. Límites de inflamabilidad (%):			Inferior: N A . - - -		Superior: N A . - - -		
SECCIÓN X. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD							
1. Sustancia: Estable <input checked="" type="checkbox"/> Inestable <input type="checkbox"/>			2. Incompatibilidad (sustancias a evitar): Agua, nitruros, nitratos, cloratos, carburos, polvos metálicos, picratos, ácido acético, ácido clorhídrico y amoníaco.				
3. Productos peligrosos de la descomposición: Óxidos de azufre, hidrógeno y ácido sulfhídrico.							
4. Polimerización espontánea: Puede ocurrir <input type="checkbox"/> No puede ocurrir <input checked="" type="checkbox"/>			Condiciones a evitar: Al contacto con agua reacciona violentamente, polimeriza violentamente con acetaldehído. Alejar de fuentes de calor o humedad.				
SECCIÓN XI. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA.							
1. Vía	2. Síntomas				3. Corrosión/Irritación		
Cutánea	Enrojecimiento, ampollas, quemaduras severas, profundas y dolorosas.				Si		
Ocular	Enrojecimiento. Dolor. Lesiones de la córnea.				Si		
Oral	Quemaduras en el tracto digestivo con perforación en esófago y estómago. Dolor abdominal. Dificultad para comer, náuseas, sed, vómito con sangre y diarrea. Shock y colapso.				Si		
Respiratoria	Sensación de quemazón. Dolor de garganta. Tos. Dificultad respiratoria. Jadeo. Síntomas no inmediatos. Edema pulmonar.				Si		
1. Sustancia química considerada como:							
Carcinogénica <input checked="" type="checkbox"/>			Mutagénica <input type="checkbox"/>		Teratogénica <input type="checkbox"/>		
CL ₅₀ : 18 mg/m ³ (conejo), 510 mg/m ³ (rata), 2 hrs			DL ₅₀ : 2140 mg/Kg (rata) (solución al 25%)				
2. Otros riesgos o efectos a la salud: Efectos mutagénicos y teratogénicos solo se han reportado en animales.							
SECCIÓN XII. INFORMACIÓN ECOTOXICOLÓGICA.							
1. Toxicidad: Es considerado altamente tóxico para la vida acuática.							
2. Persistencia y degradabilidad: Los métodos para la determinación de la degradabilidad biológica no son aplicables para las sustancias inorgánicas.							
3. Potencial de bioacumulación: No se espera bioacumulación.							
4. Movilidad en el suelo: En el suelo puede disolver algunos minerales, deteriorando las características de éste.							
SECCIÓN XIII. INFORMACIÓN RELATIVA A LA ELIMINACIÓN DE LOS PRODUCTOS.							
Método de desechos de desperdicios: Neutralizar la sustancia con carbonato de sodio o cal apagada. Una alternativa de eliminación es considerar la técnica para cancerígenos, la cual consiste en hacer reaccionar dicromato de sodio con ácido sulfúrico concentrado (la reacción dura aproximadamente 1-2 días). Debe ser realizado por personal especializado. La incineración química en incinerador de doble cámara de combustión, con dispositivo para tratamiento de gases de chimenea es factible como alternativa de eliminación.							
SECCIÓN XIV. INFORMACIÓN DE TRANSPORTE							
Precauciones especiales: No transportar con sustancias explosivas, comburentes, peróxidos orgánicos, materiales radiactivos ni alimentos. En contacto con agua pueden desprender gases inflamables (hidrógeno).			INFORMACIÓN DEL TRANSPORTE				
			Etiqueta: Líquido Corrosivo. No. ONU: 1830 No. de identificación de peligro: 8 Nombre de expedición: Ácido Sulfúrico (98%). No. en Guías de RE: 137				
SECCIÓN XV. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA							
Listado de actividades altamente riesgosas relativo a sustancias tóxicas (DOF 28/mar/90): Cantidad de reporte en estado líquido, como Oleum, a partir de 10,000 kg. Listado de actividades altamente riesgosas relativo a sustancias explosivas e inflamables (DOF): No aparece. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales: NOM-001-SEMARNAT-1996.							
SECCIÓN XVI. OTRA INFORMACIÓN							
Sin información.							

<https://quimica.unam.mx/wp-content/uploads/2017/05/HDS-Acido-sulfurico-NOM-018-2015-MARY-MEAG-Hoja-de-datos.pdf>

ANEXO P.
Ficha de seguridad sulfato de amonio

SULFATO DE AMONIO HOJA DE SEGURIDAD

1.- Identificación del producto y de la empresa

Nombre del producto: Sulfato de Amonio

Descripción: Fertilizante en cristales

Usos: Fertilizante

Importador: LA FORJA S.A.

Ruta 101 km 24.500

Canelones - Uruguay

www.tafirel.com Tel:

(00598 2) 683 88 15

Fax: (00598 2) 683 86 26

2.- Identificación de los Ingredientes Activos.

Principios activos:

Sulfato de amonio

Nombre químico: Sulfato de amonio

Fórmula química del principio activo: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

Peso molecular del principio activo: 132.14

Número de CAS del principio activo: 7783-20-2

Concentración de activo: Nitrógeno Total (N): 21.0 % de Nitrógeno
Amoniacal (p/p)

Azufre Total (S): 24.0 % de Azufre en forma de Sulfato (p/p)

3.- Identificación de peligros

Carcinogénesis: Ninguno de los componentes de la formulación figura en la lista de los cancerígenos.

Resumen de riesgos: Este es un formulado de baja toxicidad. El contacto con la piel, ojos y vías respiratorias puede causar irritación. La ingestión puede causar irritación de la membrana mucosa y malestares gastrointestinales, náuseas, vómitos, diarrea.

Órganos afectados: Ojos, piel, tracto respiratorio y gastrointestinal.

Forma de entrada: Principalmente por inhalación y contacto, menos probable, por ingestión.

4.- Medidas de primeros auxilios

En todos los casos consultar al médico llevando el envase y/o la etiqueta del producto **Ojos:** En caso de salpicaduras lavarlos abundantemente durante 15 minutos con agua limpia.

Consultar inmediatamente al médico.

Piel: Rápidamente quitar la ropa contaminada. Lavar la zona de contacto con abundante agua y jabón.

Inhalación: Remover a la persona afectada al aire libre. Si los síntomas persisten llamar al médico.

Ingestión: En caso de ingestión no inducir el vómito.

Teléfonos de Emergencia:

TOXICOLOGÍA HOSPITAL DE CLÍNICAS TEL.: 1722

5.- Medidas de extinción

Si el producto está involucrado en un incendio, utilizar agua (niebla) espuma de CO₂, químico seco o dióxido de carbono.

- * Usar equipos de agua (autónomos) con presión positiva y ropa impermeable para todo el cuerpo (protección total).
 - * Evacuar al personal a un área segura.
 - * Mantenerse frente al incendio, de espaldas al viento.
 - * Usar equipo de respiración autónoma.
 - * Utilizar máscara de protección facial completa.
 - * Retirar los recipientes lejos del fuego. Enfriar con agua los recipientes expuestos al fuego.
 - * Pueden formarse Gases tóxicos irritantes.
-

6.- Medidas de fugas accidentales

En caso de derrames y / o envases con pérdidas. Evitar el contacto con los ojos, piel o ropas. Recoger la pérdida, colocándola en recipientes apropiados para desechos. Evitar el ingreso a cursos de agua y desagües.

7.- Manipuleo y Almacenamiento

Guardar el producto en su envase original etiquetado, bien cerrado, en lugar fresco, ventilado, seco y seguro (bajo llave). El depósito debe ser exclusivo para agroquímicos y estar aislado de los recintos usado como vivienda, almacenaje de alimentos, bebidas, raciones, fertilizantes, u otros similares. Debe estar claramente señalizado con un cartel que indique "Cuidado-veneno (calavera)".

8.- Control de exposición / Protección personal

Máscaras: En trabajos de rutina utilizar antiparras. Evitar el uso de lentes de contacto en el manipuleo del producto, ya que las lentes blandas pueden absorber sustancias y todas las lentes las concentran.

Protección respiratoria: Tapabocas, máscara para vapores orgánicos.

Otros elementos: Usar guantes, botas, delantales y ropa protectora de material impermeable para evitar el contacto con la piel.

Ventilación: No se requiere una ventilación especial para el manipuleo y uso normal de este producto, si se siguen las indicaciones de la etiqueta.

Dispositivos de Seguridad: Disponer en el área de lava ojos, lluvias de seguridad. Separar y lavar la ropa contaminada, antes de volver a usar.

Nunca comer, beber o fumar en áreas de trabajo. Lavarse siempre las manos, cara y brazos antes de comer, beber o fumar.

Precauciones para evitar daños a las personas que lo aplican o manipulan y a terceros:

Evitar la ingestión, inhalación y el contacto con la piel y los ojos.

No comer, beber o fumar durante la manipulación, preparación y aplicación del producto. No pulverizar contra el viento.

Evitar la deriva.

Luego de la aplicación, lavar con abundante agua y jabón todas las partes del cuerpo que hayan estado expuestas al producto.

Lavar cuidadosamente los elementos empleados con el producto.

Lavar el equipo protector luego de cada aplicación. No lavar los equipos de aplicación en lagos, ríos u otras fuentes de agua.

No destapar los picos de la pulverizadora con la boca.

No contaminar lagos, ríos u otra fuente de agua o corrientes de agua con restos del producto.

9.- Propiedades físicas y químicas

Presentación Física: Cristales sólidos finos de color blanco.

Humedad máxima: 0.3% (en peso) = 0.05%

Acidez libre (expresada en ácido sulfúrico) = 0.05 máx.

Tamaño de cristales:

Entre 0.25 mm y 2 mm: 75%

min. Entre 0.25 mm y 0.5 mm:

Balance Menos de 0.25 mm:

5% máx.

10.- Estabilidad y reactividad

Estabilidad: Este producto es estable en condiciones normales de almacenamiento y manipuleo.

Evitar reacciones con ácido o álcalis fuertes.

Reactividad: No reactivo con el material del envase.

Incompatibilidad química: Hipoclorito de sodio, potasio + nitrato de amonio, clorato de potasio, polvo de sodio-potasio + nitrato de amonio y otros oxidantes fuertes

11.- Información toxicológica

Toxicidad aguda oral: LD50 (rata, ratón): 640-4,250 mg/kg

Toxicidad aguda dermal: LD50 (rata, ratón): > 2,000 mg/kg

Toxicidad aguda por inhalación: No efectos significantes

2 mg/m³ en conejo

INGESTIÓN: Ardor de garganta, dolor estomacal náusea. Causa irritación en las vías gastrointestinales, Causa vómito y diarrea.

INHALACIÓN Ardor de garganta, tos, deficiencia respiratoria. Causa irritación en las vías respiratoria

PIEL: Causa Irritación, Inflamación, picazón, enrojecimiento y dolor

OJOS: Causa Inflamación, irritación, enrojecimiento y dolor

12.- Información eco toxicológica

Toxicidad aguda en peces: 96 horas LC50: 13.6 . 159.8 total NH₃/L

Toxicidad aguda en Daphnia: 96 horas LC50: > 27.0 mg total

NH₃/L **Toxicidad en plantas acuáticas:** concentraciones de

amonio no afectaron significadamente las tasas de crecimiento hasta 150 ug-atom NH₄-N/

13.- Consideraciones sobre disposición

Evitar el drenaje a desagües, ríos o cursos de agua. Está prohibido el descarte o quemado al aire libre de este producto o sus envases.

Deben observarse los métodos de eliminación y disposición aprobados por las autoridades nacionales y locales. Disposición final de envases:

Una vez vaciado el contenido del envase haga el "Triple lavado" del mismo volcando el líquido resultante en el tanque de la pulverizadora. Luego perfore el envase para evitar su reutilización como tal

14.-Información sobre el transporte

Transporte terrestre

Transporte por carretera

Clase: 8

Nº ONU: ND

Etiqueta de riesgo: 8

Transporte ferroviario

Clase: 8

Nº ONU: ND

Etiqueta de riesgo: 8

Transporte fluvial

Clase: 8

Nº ONU: ND

Etiqueta de riesgo: 8

Transporte Marítimo

Clase: 8

Nº ONU: ND

Etiqueta de riesgo: 8

Polución marina: Sí

Transporte Aéreo

Clase: 8

Nº ONU: ND

Etiqueta de riesgo: 8

15.- Información regulatoria

Categoría Toxicológica: III Ligeramente

Peligroso Xn Peligroso.

Frases R

R-20 peligroso por inhalación.

R-22 Peligroso si se ingiere.

R-350 Muy tóxico para organismos acuáticos.

Frases de seguridad

S-02 Manténgase fuera del alcance de los niños.

S-13 Manténgase lejos de alimentos, bebidas y alimento para animales.

S-20/21 No comer, ni beber, ni fumar durante su utilización.

S-36/37 Vestir ropa de protección y guantes.

Ninguno de los componentes de la formulación figura en los listados de cancerígenos. No figura con número específico en el listado del Anexo Mercosur - Reglamento General de Transporte de Mercancías Peligrosas.

<http://www.tafirel.com/Docs/es/HojaSeguridad/sulfatodeamonio.pdf>

ANEXO Q.
Resultados estudios previos

Tabla 8. Resultados de mejores relaciones de flujo volumétrico de aire – agua

Torre de desorción	Torre empacada	Torre empacada	Torre por microburbujeo	Torre por microburbujeo
No. Nitruración	1	2	1	2
Flujo volumétrico de agua (L/s)	0.0233	0.0233	0.0233	0.0233
Flujo volumétrico de aire (L/s)	0.2656	0.2571	0.6423	0.8172
pH entrada de agua	10.34	10.36	10.34	10.36
pH salida de agua	10.10	10.08	10.20	10.18
Disminución de pH	0.24	0.28	0.20	0.18

Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, reproduciendo los diseños con las relaciones que permitieron la mayor disminución del pH, se mide el flujo volumétrico de aire real y se toman las muestras correspondientes para el análisis de nitrógeno amoniacal (destilación titulométrica, descrita en la sección 2.6.1), los resultados se ilustran en la tabla 9.

Tabla 9.Detalle de resultados de análisis de nitrógeno amoniacal.

Torre de desorción	Torre empacada	Torre empacada	Torre por microburbujeo	Torre por microburbujeo
No. Nitruración	1	2	1	2
Flujo volumétrico de aire previo (L/s)	0.2656	0.2571	0.6423	0.8172
Flujo volumétrico de aire real (L/s)	0.1219	0.1260	0.1154	0.1066
Disminución de flujo volumétrico de aire en la torre (%)	54.09%	51.00%	82.00%	86.95%
Concentración de NH ₃ (mg/L) en corriente líquida de entrada	1100	1129.9	1076.9	1119
Concentración de NH ₃ (mg/L) en corriente líquida de salida	624.7	634.0	884.3	906.8
Eficiencia de remoción de amoniacal (%)	43.21%	43.89%	17.88%	18.96%

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO R. Uso de las eficiencias de Murphree para un absorbedor.

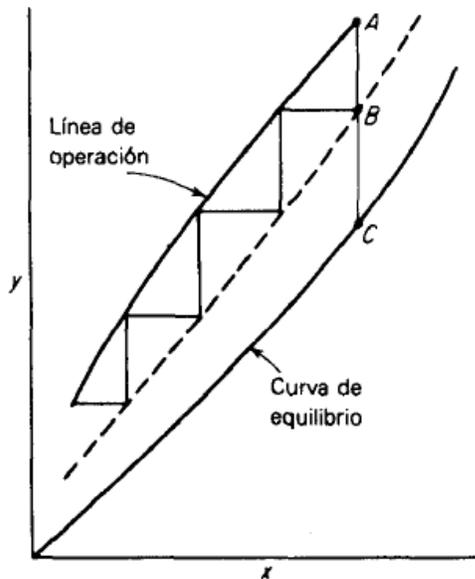
Para poder determinar la eficacia se debe tener en cuenta las siguientes funciones:

- Diseño de los platos. Propiedades del fluido. Modelo de flujo.

Si los platos están bien diseñados y la velocidad del flujo esta aproximada al límite de la capacidad entonces la eficacia depende principalmente de las propiedades físicas de los fluidos. Se suelen seguir los siguientes métodos para estimar la eficacia de una determinada columna:

Por comparación de datos con otras columnas que se encuentren en operaciones en plantas industriales que contengan los mismos sistemas o que sean similares. Utilizando modelos empíricos obtenidos a partir de los datos obtenidos. Utilizando modelos semiteóricos basados en la transferencia de materia y de calor.

Por lo tanto, la eficacia se puede definir como la aproximación fraccionaria etapa en el equilibrio que se obtiene con un plato real.



Fuente. TREYBAL, ROBERT E. Operaciones con Transferencia de Masa. Edición Revolucionaria, La Habana, 1985. Págs. 331-332