

PROPUESTA PARA EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL
PROCESO DE NITRURACIÓN EN LA EMPRESA ALUICA S.A.S.

JUAN SEBASTIÁN FERNÁNDEZ MURILLO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D. C.
2018

PROPUESTA PARA EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL
PROCESO DE NITRURACIÓN EN LA EMPRESA ALUICA S.A.S.

JUAN SEBASTIÁN FERNÁNDEZ MURILLO

Proyecto integral de grado para optar el título de:
INGENIERO QUÍMICO

Director:
Felipe Correa Mahecha
Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D. C.
2018

Nota de aceptación:

Ing. Sandra Liliana Mesa Espitia

Ing. Juan Camilo Cely Garzón

Bogotá D. C., Noviembre del 2018

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro.

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos.

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrados.

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Decano de Facultad de Ingeniería.

Ing. Julio César Fuentes Arismendi

Director de Programa Ingeniería Química

Ing. 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.

Dedico éste trabajo a mi mamá y mis hermanas, las mujeres de mi vida, que siempre me han apoyado, acompañado y brindado su sabiduría, conocimiento, experiencia y fortaleza para lograr mis metas y alcanzar mis sueños.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por todas las bendiciones que me ha regalado hasta hoy y por permitirme concluir una meta más.

Agradezco infinitamente a mi madre que, con su esfuerzo, su amor incondicional y su entrega, me ayudaron a culminar mi carrera universitaria y me dieron el apoyo suficiente para no decaer cuando todo parecía complicado e imposible; contribuyendo además a mi formación como ser humano dotándome de valores y principios los cuales permitieron alcanzar este gran sueño.

Merece un reconocimiento especial mis hermanas, por su amor, sus consejos, su acompañamiento, sus palabras, sus llamadas de atención, todo esto que al final siempre me hacían sentir orgulloso de lo que he logrado y de lo que soy.

Ellas tres, mi mamá y mis hermanas, se han convertido en mi fuerza para poder avanzar en mi camino, para poder lograr mis metas, para seguir volando y soñando.

De igual manera mis agradecimientos a la Fundación Universidad América, a mis profesores, y en especial a los ingenieros Felipe Correa Mahecha, director de tesis, y Sandra Liliana Mesa, orientadora de investigación, quienes con sus enseñanzas y valioso conocimiento permitieron enriquecer la investigación, por su acompañamiento y orientación en cada una de las etapas del proyecto.

Finalmente, al señor Juan Diego Valencia, gerente estratégico y de operaciones de la empresa Aluica, quien facilitó mi investigación, su colaboración desinteresada en el desarrollo técnico y experimental del proyecto, sus consejos laborales.

Hoy, puedo sentirme dichoso y contento por lo que he logrado hasta este punto de mi vida, por el conocimiento que he obtenido, por la experiencia que he tomado en la empresa Aluica SAS, por el desarrollo en mi formación profesional, por las habilidades intelectuales, manuales, analíticas y técnicas que he recogido bajo estos seis años de vida académica.

Hoy me siento orgulloso de ser Ingeniero Químico.

¡GRACIAS!

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	23
OBJETIVOS	25
1. GENERALIDADES	26
1.1 EL AMONIACO	26
1.2 LA NITRURACIÓN	26
1.3 GRÁFICOS DE CONTROL DE SHEWHART	28
1.4 TÉCNICAS DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS EN INGENIERÍA	29
1.4.1 Método PUGH.	29
1.4.2 Sumas ponderadas.	30
1.4.3 ELECTRE.	30
1.4.4 Matriz de prioridades.	30
1.5 MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL PARA ELIMINACIÓN DE AMONIACO	31
1.5.1 Extracción de amoniaco por arrastre de aire.	31
1.5.2 Tratamiento electroquímico de amoniaco en aguas residuales.	32
1.5.3 Nitrificación y desnitrificación.	33
1.5.4 Eliminación de amoniaco a través membranas.	35
1.5.5 Precipitación con estruvita.	36
1.5.6 Intercambio iónico.	37
1.5.7 Destilación por membrana.	39
1.5.8 Adsorción de amoniaco.	39
1.5.9 Cloración de punto de interrupción.	40
1.5.10 Otros métodos.	41
1.6 DISEÑOS DE EXTRACCIÓN DE AMONIACO POR ARRASTRE DE AIRE	41
1.6.1 Torre de platos.	41
1.6.2 Torre empacada.	42
1.6.3 Sistema de pulverización.	43
2. DIAGNÓSTICO DEL PROCESO DE NITRURACIÓN	44
2.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	44
2.2 DESCRIPCIÓN DE PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE LA EMPRESA	45
2.3 MATRICES DE EXTRUSIÓN Y SU RELACIÓN CON LA NITRURACIÓN	46
2.4 EL AGUA EN LA EMPRESA Y LOS VERTIMIENTOS	47
2.5 LA NITRURACIÓN EN LA EMPRESA ALUICA	48
2.5.1 Equipo de nitruración de la empresa.	48
2.5.2 Historial del proceso de nitruración en la empresa.	49
2.5.3 Mantenimiento e inspección del horno de nitruración.	51
2.5.4 Actualización de protocolo de proceso de nitruración.	52

2.6 EL AGUA EN EL PROCESO DE NITRURACIÓN	54
2.6.1 Compuestos posibles presentes en el agua del proceso de nitruració	54
2.6.2 Plan de muestreo de agua residual.	56
2.6.3 Ejecución de plan de muestreo.	58
2.6.4 Caracterización del agua residual de nitruración.	61
3. MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	65
3.1 TÉCNICAS PARA LA TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO	65
3.2 ALTERNATIVAS Y CRITERIOS DE EVALUACIÓN	65
3.3 MATRIZ DE SELECCIÓN	68
4. EXTRACCIÓN DE AMONIACO POR ARRASTRE DE AIRE	71
4.1 SELECCIÓN DEL TIPO DE DISEÑO DE EXTRACCIÓN DE AMONIACO A EVALUAR	71
4.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL	73
4.2.1 Descripción de prototipo de torre de desorción.	73
4.2.2 Compuestos en el proceso de desorción.	77
4.2.3 Variables en el proceso de desorción.	77
4.2.4 Protocolo de experimentación.	79
4.3 EJECUCIÓN EXPERIMENTAL	86
4.4 RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	88
5. ANÁLISIS FINANCIERO	91
5.1 PROPUESTA TÉCNICA	91
5.2 DISEÑO DE TORRE DE DESORCIÓN.	93
5.2.1 Determinación de características de la corriente líquida de entrada a torre.	94
5.2.2 Determinación de características de la corriente líquida de salida.	95
5.2.3 Equilibrio para el sistema de amoniaco – agua a 40°C.	95
5.2.4 Determinación de características de la corriente gaseosa de entrada y de salida.	96
5.2.5 Determinación de la caída de presión.	99
5.2.6 Determinación de área y diámetro de torre.	102
5.2.7 Determinación de altura de la torre.	103
5.2.8 Aspectos de diseño adicionales.	105
5.3 PROPUESTA ECONÓMICA.	106
6. CONCLUSIONES	112
7. RECOMENDACIONES	114
8. BIBLIOGRAFÍA	115
ANEXOS	123

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Diagrama esquemático de horno de nitruración de la empresa ALUICA	124
Anexo B. Cálculos para el desarrollo de la gráfica de control de Shewhart.	126
Anexo C. Informe de mantenimiento e inspección de horno de nitruración desarrollado por la empresa Soluciones Electro industriales	128
Anexo D. Nuevo protocolo de proceso de nitruración.	133
Anexo E. Certificación de inspección del acero H13 de matrices de extrusión	134
Anexo F. Hoja de datos de seguridad del gas amoníaco.	135
Anexo G. Protocolo de muestreo de agua residual.	136
Anexo H. Informe de resultados de análisis de agua de laboratorio	138
Anexo I. Ficha de técnica de los anillos de Pall.	141
Anexo J. Formato para registro de datos de experimentación	142
Anexo K. Costo de Anillos de Pall: cotización	143

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Análisis de laboratorio.	56
Cuadro 2. Muestras para la medición de parámetros in-situ y compuestos y elementos a medir por el laboratorio Quimicontrol.	59
Cuadro 3. Método de calificación de criterios para evaluación de alternativas.	66
Cuadro 4. Resumen de variables de proceso de torre de desorción.	79

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Sumas ponderadas.	30
Ecuación 2. Cálculo de flujo másico de la corriente líquida de entrada a la torre.	95
Ecuación 3. Cálculo de la fracción másica de la corriente líquida de entrada a la torre.	95
Ecuación 4. Cálculo de flujo molar en la corriente líquida de entrada sin la sustancia de interés a la torre.	95
Ecuación 5. Cálculo del flujo molar de la corriente líquida de salida de la torre	95
Ecuación 6. Ecuación de ley de Henry.	96
Ecuación 7. Ecuación Gibb para cálculo de constante de Henry adimensional	96
Ecuación 8. Fracción molar de la corriente gaseosa de salida en punto de equilibrio	96
Ecuación 9. Cálculo de flujo molar gaseoso mínimo.	96
Ecuación 10. Fracción molar real de la corriente gaseosa de entrada a la torre.	97
Ecuación 11. Flujo molar real de la corriente gaseosa de entrada a la torre.	97
Ecuación 12. Parámetro de flujo.	100
Ecuación 13. Parámetro de capacidad.	100
Ecuación 14. Presión en el punto de inundación.	101
Ecuación 15. Velocidad de masa de gas en punto de inundación.	101
Ecuación 16. Relación entre velocidad de masa de líquido y de gas.	102
Ecuación 17. Determinación de área de la torre.	102
Ecuación 18. Determinación de diámetro de la torre.	102
Ecuación 19. Difusividad del amoníaco en aire.	103
Ecuación 20. Difusividad del amoníaco en agua	103
Ecuación 21. Número de Schmidt.	104
Ecuación 22. Altura de unidad de transferencia basada en una película de gas	104
Ecuación 23. Coeficiente de película de transferencia de masa de gas.	104
Ecuación 24. Altura de unidad de transferencia basada en la película de líquido.	105
Ecuación 25. Coeficiente de película de transferencia de masa de líquido.	105
Ecuación 26. Cálculo de altura # 1.	105
Ecuación 27. Media logarítmica para el cálculo de la altura.	105
Ecuación 28. Cálculo de altura # 2.	105
Ecuación 29. Media logarítmica para el cálculo de la altura.	105
Ecuación 30. Cálculo de altura.	105
Ecuación 31. Pendiente punto PM.	105
Ecuación 32. Relación costo-beneficio.	111

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema ilustrativo de una gráfica de control de Shewhart.	29
Figura 2. Sustancias que intervienen en el proceso de nitruración.	54
Figura 3. Diseños para la extracción de amoníaco por arrastre de aire.	71
Figura 4. Esquema ilustrativo de prototipo de la torre de desorción diseñada.	74
Figura 5. Proceso de nitruración y su vertimiento de agua residual junto al sistema de tratamiento de agua residual propuesto (prototipo).	75
Figura 6. Aplicaciones de un filtro cerámico	76
Figura 7. Esquema de torre de desorción del sistema agua – amoníaco - aire	77
Figura 8. Descripción gráfica de experimentación.	80
Figura 9. Relaciones de flujo volumétrico de aire – agua.	81
Figura 10. Evaluación de relaciones de flujo mediante la comparación de pH de agua de entrada y salida.	82
Figura 11. Toma de muestras en el desarrollo experimental para análisis de nitrógeno amoniacal.	83
Figura 12. Diagrama de flujo de experimentación	85
Figura 13. Esquema de sistema de recirculación de agua en el proceso	91
Figura 14. Proceso de nitruración actual	92
Figura 15. Proceso de nitruración con torre de desorción.	93
Figura 16. Esquema ilustrativo de torre de desorción y la representación de sus variables.	93
Figura 17. Balance global de proceso de desorción.	99
Figura 18. Esquema de representación de los costos actuales	110
Figura 19. Esquema de representación de los costos de la propuesta técnica del tratamiento de agua.	111
Figura 20. Diagrama de evaluación financiera	111
Figura 21. Diagrama de cuerpo de horno de nitruración de la empresa Aluica SAS	124
Figura 22. Diagrama esquemático de gabinete de control de equipo	125

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	pág.
Fotografía 1. Horno de nitruración de la empresa Alucia SAS	49
Fotografía 2. Prototipo de torre de desorción construida.	74
Fotografía 3. Fotografía de anillo de Pall utilizado	75
Fotografía 4. Fotografía de difusor de aire utilizada en la torre empacada.	76

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Gráfica de control de Shewhart de la operación de nitruración del año 2014 y 2015.	50
Gráfica 2. Resultado de pH del agua residual del proceso de nitruración.	60
Gráfica 3. Resultado de temperatura del agua residual del proceso de nitruración.	60
Gráfica 4. Resultado de flujo volumétrico del agua residual del proceso de nitruración.	61
Gráfica 5. Resultados de concentración de nitrógeno amoniacal.	63
Gráfica 6. Relación porcentual amoniaco – ion amonio y su efecto en el pH.	80
Gráfica 7. Disminución de pH en la torre empacada en nitruración # 1	86
Gráfica 8. Disminución de pH en la torre por microburbujeo en nitruración # 1.	87
Gráfica 9. Disminución de pH en la torre empacada en nitruración # 2	87
Gráfica 10. Disminución de pH en la torre por microburbujeo en nitruración # 2	88
Gráfica 11. Línea de operación para el flujo de gas mínimo y real.	98
Gráfica 12. Correlación de caída de presión para empaques aleatorios de Strigle.	100
Gráfica 13. Evaluación de caída de presión en parámetros de diseño.	102

LISTA DE REACCIONES

	pág.
Reacción 1. Disociación térmica de amoniaco.	27
Reacción 2. Formación de nitruros con hierro.	27
Reacción 3. Formación de nitruros con hierro.	28
Reacción 4. Formación de hidrogeno molecular.	28
Reacción 5. Conversión del ión amonio amoniaco gaseoso.	31
Reacción 6. Oxidación de amoniaco directa.	33
Reacción 7. Oxidación de amoniaco con uso de iones cloruro.	33
Reacción 8. Formación de estruvita.	36
Reacción 9. Formación de monocloramina.	39
Reacción 10. Formación de dicloramina.	39
Reacción 11. Formación de tricloruro de nitrógeno.	39
Reacción 12. Reacción de carbón activado con residuo de cloro.	40
Reacción 13. Reacción de carbón activado con residuo de dicloramina	40
Reacción 14. Reacción entre el cloro libre y las cloramina en gas nitrógeno.	40

LISTA DE SIGLAS

- X_0 , Fracción másica de amoníaco de la corriente líquida de entrada.
- T_0 , Temperatura de la corriente líquida de entrada en °C.
- $[]_0$, Concentración de amoníaco de la corriente líquida de entrada en mg/L.
- L_{v0} , Flujo volumétrico de la corriente líquida de entrada en L/s.
- L_{m0} , Flujo másica de la corriente líquida de entrada en kg/s.
- L_{mol0} , Flujo molar de la corriente líquida de entrada en kmol/s.
- x_0 , Fracción molar de amoníaco de la corriente líquida de entrada.
- L'_{mol} , Corriente líquida sin la sustancia de interés en kmol/s.
- $[]_N$, Concentración de amoníaco de la corriente líquida de salida en mg/L.
- L_{mN} , Flujo másica de la corriente líquida de salida en kg/s.
- L_{molN} , Flujo molar de la corriente líquida de salida en kmol/s.
- x_N , Fracción molar de amoníaco de la corriente líquida de salida.
- X_N , Fracción másica de amoníaco de la corriente líquida de salida.
- H' , Constante de Henry adimensional.
- y_{1max} , Fracción molar de amoníaco de la corriente gaseosa de salida en punto de equilibrio.
- $V'_{mol\ min}$, Corriente gaseosa sin la sustancia de interés en kmol/s en el punto de equilibrio.
- V_{mN+1} , Flujo másica de la corriente gaseosa de entrada en kg/s.
- V_{molN+1} , Flujo molar de la corriente gaseosa de entrada en kmol/s.
- Y_{N+1} , Fracción másica de amoníaco de la corriente gaseosa de entrada.
- y_{N+1} , Fracción molar de amoníaco de la corriente gaseosa de entrada.
- $y_{1\ real}$, Fracción molar de amoníaco de la corriente gaseosa de salida real.
- $V_{mol\ 1\ real}$, Flujo molar de la corriente gaseosa de salida real en kmol/s.
- V_{m1} , Flujo másica de la corriente gaseosa de salida en kg/s.
- V_{mol1} , Flujo molar de la corriente gaseosa de salida real en kmol/s.
- Y_1 , Fracción másica de amoníaco de la corriente gaseosa de salida.
- y_1 , Fracción molar de amoníaco de la corriente gaseosa de salida.
- G_L , Velocidad de masa de líquido en $\text{lbm}/(\text{s} \cdot \text{pie}^2)$.

G_G , Velocidad de masa de gas en $\text{lb}_m/(\text{s}\cdot\text{pie}^2)$.
 ρ_G , Densidad del gas en lb_m/pie^3 .
 ρ_L , Densidad del líquido en lb_m/pie^3 .
 F_p , Factor de empaque en pie^{-1} .
 ν , Viscosidad cinemática en centistokes.
 $\Delta P_{\text{inundación}}$, Caída de presión en el punto de inundación.
 \dot{m}_L , Flujo másico de la corriente líquida de entrada en kg/s .
 \dot{m}_G , Flujo másico de la corriente gaseosa de entrada en kg/s .
 $G_G \text{ inundación}$, Velocidad de masa de gas en el punto de inundación en $\text{lb}_m/(\text{s}\cdot\text{pie}^2)$.
 A , Área de la torre en m^2 .
 D , Diámetro de la torre en cm .
 $D_{\text{NH}_3 \rightarrow \text{aire}}$, Difusividad de amoníaco en el aire en m^2/s .
 $D_{\text{NH}_3 \rightarrow \text{agua}}$, Difusividad de amoníaco en el agua en m^2/s .
 N_{Sc} , Número de Schmidt.
 f_p , Proporción relativa del área total de interfase definida por el empaque seleccionado.
 $H_G(m)$, Altura de una unidad de transferencia basada en la película de gas en m .
 μ_G , Viscosidad dinámica de la mezcla gaseosa.
 $k'_y a$, Coeficientes de película de transferencia de masa de gas.
 $k'_x a$, Coeficientes de película de transferencia de masa de líquido.
 $V_{\text{mol promedio}}$, Flujo molar promedio de la fase gaseosa en kmol/s .
 $L_{\text{mol promedio}}$, Flujo molar promedio de la fase líquida en kmol/s .
 Z_{promedio} , Altura de la torre en m .

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Resultados de análisis de muestra de agua residual.	62
Tabla 2. Valoración de criterios para evaluación de alternativas.	67
Tabla 3. Jerarquía por importancia de criterios para evaluación de alternativas.	67
Tabla 4. Definición de escala de evaluación por criterio.	68
Tabla 5. Matriz de selección de alternativas: SUMAS PONDERADAS	69
Tabla 6. Listado de alternativas por puntuación.	70
Tabla 7. Flujos volumétricos de agua y aire utilizados en la experimentación	81
Tabla 8. Resultados de mejores relaciones de flujo volumétrico de aire – agua	89
Tabla 9. Detalle de resultados de análisis de nitrógeno amoniacal.	89
Tabla 10. Características de la corriente líquida de entrada.	94
Tabla 11. Características de la corriente líquida de salida.	95
Tabla 12. Características de la corriente gaseosa de entrada	97
Tabla 13. Características de la corriente gaseosa de salida	97
Tabla 14. Propiedades de la fase líquida y fase gaseosa en la torre de desorción	101
Tabla 15. Informe de costos de nitruración externa del 2017.	106
Tabla 16. Costos de producción promedio del proceso de nitruración en la empresa (dato obtenido a partir de la base de datos del año 2014 – 2015)	107
Tabla 17. Costo de inversión de la torre de desorción.	108
Tabla 18. Ejemplo de información suministrada por lote de nitruración.	126
Tabla 19. Formato para registro de datos de experimentación.	142

GLOSARIO

DESORCIÓN: operación unitaria donde un gas disuelto en un líquido es arrastrado por un gas inerte, siendo eliminado del líquido¹.

ELECTRE: técnica de selección de alternativas en ingeniería. Valora y califica numéricamente diferentes alternativas a partir de criterios y atributos, determinando la alternativa de mayor impacto frente a un problema.

ELEMENTO TRAZA: elemento que se encuentran en una concentración de menor de cien partes por millón en una muestra².

EMPAQUE: elemento plástico, metálico o cerámico de diferentes tamaños y geométricas que se distribuye al azar o uniformemente sobre una torre de absorción o desorción el cual permite maximizar el contacto entre las fases líquida y gaseosa³.

ESTIBA: se denomina estiba, pallet o tarima a aquella herramienta que tiene como finalidad de movilizar, proteger y organizar productos y mercancías dentro de las cadenas de almacenamiento y logística⁴.

FILTRO CERÁMICO: elemento filtrante con estructura porosa muy fina, compuesta por arcilla con aserrín o cascara de arroz, utilizado para la purificación del agua, su potabilización y garantía de seguridad bacteriológica⁵.

HRC: unidad de medición de dureza, corresponde a la dureza Rockwell, esta permite determinar la resistencia de un material al ser penetrado⁶.

MATRIZ DE EXTRUSIÓN: también conocida como molde de extrusión, es una pieza metálica en aceros de herramientas, aceros aleados o carburos cementados, que promueve la transformación de un tocho en un perfil de aluminio, al obligar al tocho a fluir sobre cavidades de la matriz que presentan la forma y geometría del perfil a diseñar.

MICROBURBUJA: burbuja fina definida como una cavidad llena de gas suspendida en un medio líquido que tiene un diámetro entre 10 a 50 μ m, tamaño menor a las burbujas convencionales⁷.

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

² SARDANS, Jordi; MONTES, Fernando & PEÑUELAS, Josep. Siguiendo la traza a los elementos traza. En: CENTRE DE RECERCA ECOLÒGICA I D'APLICACIONS FORESTALS.

³ MCCABE, Warren L. Operaciones unitarias en ingeniería química. Sexta ed. MCGRAW-HILL, 2007. 589 p. ISBN 9789701061749

⁴ SoliPlast. Estiba: ¿Qué es una estiba? – Soluciones Logísticas. [Consultado el 10/10/2018]. Disponible en: <http://soliplast.com.co/estiba-una-estiba-soluciones-logisticas/>

⁵ DELGADO, Gabriela. Estudio de filtros cerámicos para el diseño y desarrollo de sistemas domésticos de bajo costo.

⁶ Técnicas de Medida y Metalografía, S. A. Dureza Rockwell. [0]:2015.

⁷ 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/>

PERFIL DE ALUMINIO: pieza de aluminio extruida utilizada en áreas como la construcción, arquitectura e industria con los que es posible producir estructuras como paneles solares y plataformas de trabajo, fabricar marcos de puertas y ventanas, desarrollar sistemas de canales para aire acondicionado, disipadores de calor, cables, etc.⁸

PERFIL EN BRUTO: perfil de aluminio obtenido mediante extrusión que no cuenta con ningún proceso adicional que le ofrezca el mejoramiento de propiedades mecánicas, químicas o estéticas.

PUGH: técnica de selección de alternativas en ingeniería. Valora y califica numéricamente diferentes alternativas a partir de criterios y atributos, determinando la alternativa de mayor impacto frente a un problema.

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 pieza⁹.

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 pieza¹⁰.

SIGMA: desviación estándar de una población o una muestra, definida como una medida de dispersión de una distribución respecto de su media¹¹.

TOCHO: lingote cilíndrico de aluminio utilizado como materia prima en el proceso de extrusión para la producción de perfiles de aluminio¹².

⁸ Gestión de compras. Perfiles de aluminio. Disponible en: <http://www.gestiondecompras.com/es/productos/conformado-de-tubos-y-perfiles/perfiles-de-aluminio>

⁹ Infas Control. Repetibilidad y reproducibilidad. [0]:2018.

¹⁰ Infas Control. Repetibilidad y reproducibilidad. [0]:2018.

¹¹ Universidad Autónoma del Estado de México. Medidas de variación: Rango, desviación estándar y coeficiente de variación. [0]:

¹² Extrusión del aluminio. [0]. Disponible en: <http://www.alcati.es/extrusion-aluminio.html>

RESUMEN

En este trabajo se realiza una propuesta para el tratamiento y recirculación del agua residual del proceso de nitruración de la empresa Aluica SAS, con el fin de promover nuevamente la reactivación formal del proceso luego de ser custodiada por entidades ambientales de control debido a la generación de vertimientos de aguas no domésticas no controladas.

Inicialmente se realizó el diagnóstico del proceso de nitruración y su relación con las aguas residuales emitidas, esto requirió un análisis histórico de proceso, evaluación técnica del proceso y caracterización física y química de las aguas residuales. Como resultado, se comprobó la necesidad de desarrollar el tratamiento a estas aguas al obtener un pH fuertemente alcalino de 10.62 y una temperatura de 40.4°C, valores fuera de los límites permisibles emitidos en la Resolución 0631 del 2015, además de una concentración de amoniaco de hasta 1333 mg/L.

Enseguida se evaluaron diferentes alternativas para el tratamiento de las aguas residuales dentro de las que se identificaron nueve (9) métodos. Estos métodos fueron valorados mediante una matriz de selección a partir de la evaluación de diferentes criterios técnicos, económicos y ambientales. La extracción de amoniaco por arrastre de aire, la eliminación de amoniaco a través de membranas y la destilación a vacío, fueron los métodos que obtuvieron los mejores resultados, definiendo que la mejor alternativa para solucionar el problema del proceso de nitruración corresponde a la “Extracción de amoniaco por arrastre de aire” al obtener un resultado de 3.9612 dentro de la evaluación correspondiente.

Este método presenta diferentes diseños dentro de los que destaca la torre empacada con empaques aleatorios, pero además, a través de la consulta bibliográfica se identificó que las torres de extracción mediante microburbujeo ofrecen resultados prometedores. De esta manera, se evaluó experimentalmente una torre empacada con anillos de Pall y una torre inundada por microburbujeo a partir de un prototipo. Los resultados mostraron una eficiencia de 43.55% en la eliminación de amoniaco en la torre empacada, mayor a la obtenida en la torre por microburbujeo que obtuvo una eficiencia de 18.42%.

Definido el tipo de torre: “Torre empacada con anillos de Pall”, se realizó el diseño conceptual del proceso, donde se demostró que a partir de una concentración de amoniaco en el agua residual de aproximadamente 15,445.92 mg/L y para una eficiencia de tan solo 7% se requiere una torre empacada de 4.33 m de altura y 24.70cm de diámetro. Finalmente, se expone la viabilidad económica de la propuesta mediante la determinación del costo - beneficio, que obtuvo un resultado satisfactorio de 10.29.

Palabras claves: nitruración, amoniaco, extracción de amoniaco por arrastre de aire, torre empacada con anillos de Pall.

INTRODUCCIÓN

La empresa Aluica S.A.S., anteriormente conocida como Aceros y Aluminios Cía. S.A.S., ubicada en el municipio de Mosquera Cundinamarca, elabora y comercializa productos extruidos en aluminio para el área industrial y arquitectónica. Los procesos de producción realizados en la empresa están representados en la fundición de aluminio, la extrusión para la obtención de perfilería y el recubrimiento con pintura electrostática para obtener acabados con diferentes gamas de colores.

Uno de los procesos complementarios en la extrusión, es la nitruración, un procedimiento termoquímico al cual se someten las matrices (moldes de extrusión) para obtener un endurecimiento superficial que le permita a la pieza aumentar su resistencia a la fricción y desgaste, brindándole protección durante los continuos ciclos de presión a las que es sometida en extrusión¹³. Este proceso consiste en incorporar nitrógeno a la superficie de las matrices, mediante el calentamiento en una atmósfera de amoniaco.

Las aguas residuales del proceso de nitruración no cuentan con un tratamiento y son vertidas directamente al alcantarillado, esto genera un problema ambiental debido a que el amoniaco es un contaminante nocivo que daña seriamente el medio ambiente generando la disminución de oxígeno disuelto necesario para la vida acuática, efectos tóxicos en los peces, la eutrofización de aguas superficiales, etc.¹⁴ Además se ha convertido en un problema económico que debe resolver la empresa, ya que entidades reguladoras tal como la CAR (Corporación Autónoma Regional), custodian el proceso. Así, en caso de realizar el proceso de nitruración sin efectuar el tratamiento del agua residual, se puede incurrir en multas.

La empresa tomo la decisión de detener el proceso internamente desde el año 2016 hasta la fecha, donde actualmente la nitruración se realiza en empresas externas, tal como Ferrotérmicos¹⁵, generando un gasto de 6800 pesos por kilogramo de matriz para el año 2018, con un costo promedio semanal de 2'040,000 pesos (300kg procesados).

Si no se soluciona este problema, se impide a la empresa desarrollar el proceso formalmente, lo cual acarreará en gastos cada vez mayores, debido a los pronósticos indicados en el aumento de producción de la empresa, que demuestra el aumento en la capacidad de producción de hasta el 100%.

¹³ FERNANDEZ, Jhonatan. Desarrollo de procesos termoquímicos para el tratamiento simultáneo de envejecimiento y nitruración en plasma de aceros Maraging. Pamplona.: Universidad Pública Navarra, 2015.p.13 -14.

¹⁴ MEDINA, Nedila. Elaboración de un plan de manejo ambiental para la conservación de la subcuenca del río san pablo en el cantón la maná, provincia de COTOPAXI. Universidad de Colima, 2002. p. 25-26.

¹⁵ Ferrotérmicos. Tratamientos térmicos. Disponible en: <http://ferrotermicos.com/nuestros-tratamientos/tratamientos-termicos/>

Para desarrollar el proceso internamente también existe otra alternativa, donde las aguas residuales del proceso se recolectan en isotanques y se entregan a una empresa que realice la disposición final de estas, pero el costo de esta operación es de 938 pesos por kilogramo de agua entregada (dato actualizado al 2018, cotización de Distribuciones ambientales: gestión integral de residuos y consultoría ambiental¹⁶), donde semanalmente se obtendría un costo promedio de 5'227.200 pesos, sin tener en cuenta los gastos operacionales del proceso de nitruración tal como: el costo de agua y energía, consumo de amoníaco y hora hombre trabajada.

Así, con una sección de cinco capítulos, el proyecto definirá paso a paso el desarrollo de una propuesta para el tratamiento y recirculación del agua residual del proceso de nitruración. El primero capítulo, muestra los conceptos generales que le permitirá al lector recibir información sobre los temas relevantes del proyecto de investigación, en el segundo capítulo se evalúa el proceso de nitruración a partir de un diagnóstico y se determinan las características físicas y químicas del agua residual del proceso contrastando los resultados frente a los reglamentos estatales ambientales, en seguida, en un tercer capítulo, se valoran diferentes alternativas donde se define mediante una matriz de selección la mejor alternativa para el tratamiento del agua residual, alternativa que se estudia en el cuarto capítulo, en el cual se evalúan diferentes diseños donde la experimentación fue un elemento esencial, finalmente en el capítulo cinco se realiza la propuesta formal técnica para el tratamiento del agua residual y la determinación de la viabilidad económica de esta.

¹⁶ D3A Distribuidores Ambientales S.A.S. Transporte y disposición final adecuada de Residuos Peligrosos y especiales. [0]. Disponible en: <https://d3adistribuidoresambientales.blogspot.com/>

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta para el sistema de tratamiento de agua residual del proceso de nitruración en la empresa Aluica S.A.S.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar el proceso de nitruración y relacionarlo con las características del agua residual generada en el mismo.
- Seleccionar un método para el desarrollo del tratamiento de agua residual del proceso de nitruración.
- Relacionar el efecto de las principales variables de operación del método seleccionado sobre la calidad del agua.
- Evaluar la viabilidad financiera del método seleccionado.

1. GENERALIDADES

El desarrollo del tratamiento del agua residual del proceso de nitruración, como solución del problema ambiental y económico actual generado por los vertimientos no controlados de este proceso, requiere previamente describir aspectos generales tal como el amoníaco, materia prima utilizada en la nitruración; la nitruración, proceso generador de las aguas residuales y los gráficos de control de Shewhart, técnica para la verificación de control estadístico del proceso, aspectos que se detallan en este capítulo. También se realiza un recopilado bibliográfico en relación a las técnicas para la selección de alternativas y se detallan las alternativas disponibles para el tratamiento de agua residual para el proceso de nitruración.

1.1 EL AMONIACO

La materia prima utilizada en el proceso de nitruración es el amoníaco (NH₃), también conocido como gas amonio, R - 717 y espíritu de Hartshorn. En condiciones de temperatura y presión ambiente es un gas incoloro, sofocante, irritante y tóxico categorizado con clase de peligro 2.3 (gases tóxicos)¹⁷, que pueden producir efectos críticos en medio cutáneo, ocular o de tracto respiratorio de manera aguda, crónica, o incluso hasta la muerte¹⁸. El amoníaco es más liviano que el aire, higroscópico (capaz de absorber humedad del medio) y se disuelve fácilmente en agua. Algunas otras características del amoníaco se muestran a continuación^{19,20}

- Se produce naturalmente por descomposición de la materia orgánica y también se fabrica industrialmente.
- Intenso olor debido a un umbral de olor de tan solo 5ppm.
- La solubilidad del amoníaco en agua incrementa con la disminución del pH.
- Los productos de combustión son principalmente nitrógeno y agua.
- En la oxidación de amoníaco se obtiene óxido nítrico y óxido nitroso.
- El amoníaco 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 amoníaco al agua genera gran desprendimiento de calor.

Nota: en este trabajo no se tendrán en cuenta las características toxicológicas del amoníaco, únicamente serán consideradas sus características físicas y químicas.

1.2 LA NITRURACIÓN

El proceso de nitruración es un tratamiento termoquímico que mejora las propiedades mecánicas como la dureza, resistencia y elasticidad de materiales de

¹⁷ ICONTEC. Norma Técnica Colombiana NTC 1692: Transporte de mercancías peligrosas. Bogotá: 2005.

¹⁸ Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades. Resumen de salud pública: Amoníaco. 2004.

¹⁹ Instituto Nacional de seguridad e higiene en el trabajo. Amoníaco. 2011.

²⁰ IDEAM. AMONIACO p. 98-112

acero que son sometidos a altos esfuerzos de trabajo. La nitruración se desarrolla mediante calentamiento hasta una temperatura objetivo, mantenimiento de esta temperatura un tiempo determinado y enfriamiento controlado, lo cual genera cambios estructurales en el material y por ende, modifica las propiedades mecánicas, obteniendo propiedades específicas adecuadas para la conformación y uso final del material²¹. Pero este tratamiento además de calentar y enfriar adecuadamente, modifica la composición química superficial de la pieza recubriendo con nitrógeno²².

El aporte de nitrógeno se realiza mediante absorción y difusión a la superficie del acero, el cual forma nitruros con los que se consiguen aumentar la dureza superficial del acero y mejorar la resistencia al desgaste, fricción, abrasión, agarrotamiento y fatiga de la pieza²³. Es importante indicar que las propiedades mecánicas del núcleo de la pieza quedan inalteradas y serán las mismas luego del tratamiento²⁴.

Los métodos más comunes para desarrollar la nitruración son la nitruración en baños de sales, la nitruración gaseosa y la nitruración por plasma²⁵. Se estudiará únicamente la nitruración gaseosa al ser el método utilizado en la empresa.

Este proceso se realiza en una atmósfera de amoníaco gaseosa a temperaturas entre 500 a 570°C (proceso desarrollado en vacío, es por ello que es necesario extraer el aire de la cámara de trabajo), donde el nitrógeno que se incorpora al acero alcanza profundidades de capa entre 0,20 a 0,70 mm y durezas de hasta 70 HRC²⁶.

La nitruración gaseosa se produce en cuatro etapas²⁷:

1. Disociación térmica del amoníaco

Reacción 1. $NH_3 \leftrightarrow N^* + 3H^*$, (*) Simboliza un átomo libre.

2. Absorción de nitrógeno elemental por el Hierro.

3. Difusión de nitrógeno hacia el interior del acero.

4. Formación de nitruros con hierro y con los aleantes presente en la pieza.

Reacción 2. $N^* + xFe \leftrightarrow Fe_xN$, pudiendo ser Fe_4N , Fe_3N o Fe_2N .

Únicamente una pequeña proporción del nitrógeno reacciona con el acero, otra parte se disuelven en el agua de refrigeración el cual se dirige al alcantarillado y el

²¹ Federación de enseñanza de Andalucía. Tratamientos termoquímicos. En: TEMAS PARA LA EDUCACIÓN. Mayo 14, vol. 1989 - 4023, p. 1-10

²² VTN. Vacío y Termoquímica Navarra (VTN). [0]. [Consultado el 07/10/2017]. Disponible en: <http://www.vtn.es/tratamientos-termoquimicos/>

²³ Bilbaina de tratamientos. Nitruración: Antidesgaste y anticorrosión sin deformación; [0]. [Consultado el 21/10/2017]. Disponible en: <http://biltra.es/>

²⁴ FERRERO, Lisandro. Procesos termoquímicos de enriquecimiento superficial. [0]:2012.

²⁵ GROOVER, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna. McGraw-Hill España, 2007. ISBN 9789701062401

²⁶ FERRERO, Lisandro. Procesos termoquímicos de enriquecimiento superficial. [0]:2012.

²⁷ Universidad Tecnológica Nacional. Cátedra: Metalografía y Tratamientos Térmicos: Material didáctico. Argentina: Capítulo 13 Nitruración.

restante se transforman rápidamente en nitrógeno e hidrogeno molecular inerte (véase ecuación 14 y 15)²⁸.



1.3 GRÁFICOS DE CONTROL DE SHEWHART

Los gráficos de control de Shewhart fueron desarrollados por Walter A. Shewhart en 1931, como un método estadístico para el control de procesos. El gráfico de control describe una magnitud (longitud, resistencia, contenido de impurezas, dureza, etc.) o un atributo que posee o no el producto (correcto, defectuoso, número total de defectos, etc.). Estas gráficas son una herramienta que permiten establecer la variabilidad de la magnitud o el atributo estudiado con respecto al tiempo, lotes de producción, número de muestras, etc., es decir, reconocer la dispersión entre resultados²⁹.

En el gráfico se muestra una línea central que representa el valor medio de la característica bajo estudio, y dos líneas límites de control de la variable, superior e inferior, líneas que si se sobrepasan indican que el proceso ha perdido su estabilidad estadística y, está por tanto, fuera de control³⁰.

Un proceso puede estar fuera de control por causas aleatorias, como resultado del azar, siendo inherentes a cualquier esquema de producción tal como variabilidad en la materia prima, precisión de las máquinas y los instrumentos de medida, destreza de los operarios; o causas no aleatorias, generadas por variables externas tal como materias primas defectuosas, desgaste de herramientas o preparación del operario. Se dice que el proceso se encuentra en estado de control cuando no le afecta ninguna causa no aleatoria³¹.

De esta manera, el gráfico de control es una técnica que permite la detección rápida de causas no aleatorias, las cuales deben ser descubiertas y corregidas. También es utilizada para la obtención de información para la mejora del proceso y la estimación de parámetros del proceso de producción³².

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 u ocho puntos consecutivos de la gráfica están en el mismo lado de la línea

²⁸ Universidad Tecnológica Nacional. Cátedra: Metalografía y Tratamientos Térmicos: Material didáctico. Argentina: Capítulo 13 Nitruración.

²⁹ RIU, Jordi. Gráficos de control de Shewhart, Universitat Rovira i Virgili:

³⁰ Kailean consultores. Los gráficos de control de Shewhart: principios básicos. [0]:2017.

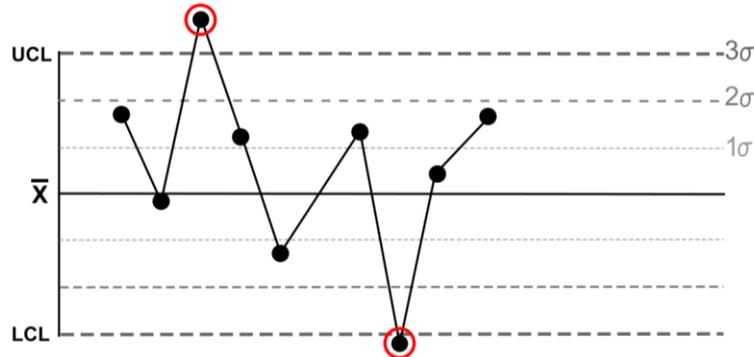
³¹ ARVELO, Ángel Francisco. Gráficas de control. [0]:2006.

³² HUERGA, Carmen; BLANCO, Pilar and GONZALEZ, Julio. Aplicación de los gráficos de control en el análisis de la calidad textil p. 125-148

central, aspectos que generan la comprobación que el proceso se encuentra fuera de control³³.

En la figura 1 se muestra una gráfica ilustrativa de la gráfica de control de Shewhart. Esta gráfica muestra la línea central \bar{X} , la línea superior e inferior con 1, 2 y 3 sigma y el comportamiento de la variable evaluada. Los puntos rojos superan los límites de control lo cual indica que este proceso no está bajo control estadístico.

Figura 1. Esquema ilustrativo de una gráfica de control de Shewhart³⁴



Fuente: The Shewhart control chart - tests for special causes. En: Journal of Quality Technology. pág. 237-239

1.4 TÉCNICAS DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS EN INGENIERÍA

Seleccionar el método más apropiado y ajustado a las necesidades de la empresa en relación al tratamiento de agua residual del proceso de nitruración requiere la toma de decisión a partir de varias alternativas de las cuales hay que decidir a favor de una alternativa. Para ello, se comparan las alternativas, con medios que las valoran y califican, a partir de diferentes criterios y atributos. Las técnicas de toma de decisión multicriterio estructuran el proceso de decisión, selecciona las alternativas, formula criterios, establece los compromisos entre criterios, determina los pesos, aplica el juicio de valor, evalúa y toma la decisión³⁵.

1.4.1 Método PUGH. Utilizado para seleccionar la mejor opción frente a un problema, se consigue ver cuáles son los puntos fuertes y las limitaciones que presentan las posibles alternativas al problema, con base en una alternativa raíz con la que se compara el resto, optando por el de mayor impacto³⁶. La matriz se construye colocando en la primera columna las variables a evaluar y en las

³³ EPIFANIO, Irene. Tema 3: Control de calidad. [0]: España: 2018. 73-84

³⁴ NELSON, Lloyd. The Shewhart Control Chart—Tests for Special Causes. En: JOURNAL OF QUALITY TECHNOLOGY. p. 237-239

³⁵ Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 6. ANALISIS Y SELECCION DE ALTERNATIVAS. 8. [Consultado el 14/05/2018]. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/003/v8490s/v8490s08.htm>

³⁶ Rodrigo González González. Matriz de Pugh: Ayuda a la toma de decisiones. [Consultado el 13/02/2018]. Disponible en: <https://www.pdcahome.com/2569/matriz-de-pugh-ayuda-a-la-toma-de-decisiones/>

columnas restantes las alternativas al problema, donde la primera alternativa debe corresponder a la alternativa base con la que se comparan las demás. Cada variable se evalúa con +1, -1 o 0, dependiendo si el cumplimiento es superior, inferior o es igual al criterio base a partir del “brainstorming” (tormenta de ideas). La alternativa con mayor puntuación corresponde a la alternativa de mayor impacto³⁷.

1.4.2 Sumas ponderadas. La matriz se construye colocando en la primera columna todos los criterios o variables a evaluar y en las siguientes columnas cada alternativa. Es necesario convertir los criterios en valores numéricos, definiendo una escala de valoración. A cada criterio se le asigna un peso dependiendo la importancia de este en relación con los demás, por ejemplo. La suma de los pesos de los criterios debe corresponder a 1. Cuando un criterio tiene la misma o casi la misma calificación para todas las alternativas se elimina ese criterio ya que no brinda información relevante para la toma de decisión. Luego de calificar las alternativas, se realiza la suma de productos en los diferentes criterios, multiplicados por los pesos de ponderación de los criterios (ecuación 1). La alternativa con mayor puntuación corresponde a la de mayor preferencia³⁸.

$$\text{Ecuación 1. } M_i = \sum_{j=1}^m a_{i,j} \times w_j$$

Donde M_i corresponde a la calificación ponderada por alternativa, $a_{i,j}$ es la calificación de alternativa i en el criterio j y w_j es el peso de ponderación del criterio j .

1.4.3 ELECTRE. La comparación se efectúa entre todos los pares posibles de alternativas. Cada criterio cuenta con un peso que refleja la importancia de este en relación con los demás criterios, tal como el método de sumas ponderadas. Este método usa una relación de superación la cual indica hasta qué punto una alternativa resalta sobre las restantes. Para ello establece dos matrices, una de concordancia y una de discordancia, matrices que normalizan las calificaciones y permiten evaluar el grado de dominancia entre alternativas. El resultado es el ordenamiento del conjunto de alternativas y la selección de la alternativa considerada como la mejor solución de compromiso³⁹.

1.4.4 Matriz de prioridades. Este método se utiliza cuando se necesita seleccionar y ubicar las opciones en forma prioritaria. Para ello se establece el objetivo principal a alcanzar y las opciones que ayuden a alcanzarlo, generando criterios. Estos criterios se juzgan contra todos los demás por pares mediante una matriz comparando la importancia de cada uno de ellos. Seguido a esto se comparan las opciones frente a todas las demás creando una matriz de pares por

³⁷ GONZALEZ, Rodrigo. Matriz de Pugh: Ayuda a la toma de decisiones. [Consultado el 14/05/2018]. Disponible en: <https://www.pdcahome.com/2569/matriz-de-pugh-ayuda-a-la-toma-de-decisiones/>

³⁸ ARCE, Enrique. Introducción al diseño básico de los procesos químicos. México: Instituto Politécnico Nacional, 2011. 135-146 p.

³⁹ PALLARES RUIZ, Jaime. Métodos de decisión multicriterio ELECTRE y TOPSIS aplicados a la aplicación de elección de dispositivos móvil. Universidad de Sevilla, 2015. p. 24-27.

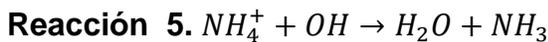
criterio. Por último, se selecciona la opción de mayor puntaje al relacionar las dos matrices anteriormente desarrolladas⁴⁰.

1.5 MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL PARA ELIMINACIÓN DE AMONIACO

A continuación se describen los métodos más conocidos de tratamiento de aguas residuales enfocado a la eliminación de amoniaco.

1.5.1 Extracción de amoniaco por arrastre de aire. Es un proceso de desorción que se utiliza para reducir el contenido de amoniaco en una corriente de agua residual.⁴¹ La torre de extracción se rige bajo un fenómeno de transferencia de masa donde el amoniaco 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 aire⁴².

Para efectuar el proceso, el amoniaco se debe encontrar en su forma no iónica, es decir, como NH_3 . Para ello, se añade soda cáustica hasta que el agua residual alcanza un pH fuertemente alcalino, logrando la conversión de los iones de amonio a amoniaco gaseoso como se refleja en la siguiente reacción⁴³:



Hay dos sistemas de extracción de aire normalmente utilizados: las torres de extracción y el sistema de aireación de burbuja por lotes. Usualmente se usan torres de extracción porque permite obtener un área de transferencia de masa mayor, sin embargo, el sistema de aireación es utilizado al ser simple, económico y no requerir ninguna construcción sofisticada. Así, los dos sistemas son eficientes, pero las torres de extracción son más efectiva⁴⁴.

De esta manera, la extracción por aire es un procedimiento mecánico sencillo que no se ve afectado por la fluctuación del agua residual, si el pH y la temperatura del aire se mantienen constantes. Además, no produce retrolavados o materiales

⁴⁰ JIMENEZ, Daniel. Matriz de prioridades Herramientas para implementar ISO 9001. [0]. [Consultado el 14/05/2018]. Disponible en: <https://www.pymesycalidad20.com/matriz-de-prioridades-iso-9001.html>

⁴¹ DE SILVA, Frank. Folletos Informativos de Tecnología de Aguas Residuales de la EPA: Extracción de Amoniaco por Arrastre de Aire. [Consultado el 09/04/2018]. Disponible en: <https://www.estrucplan.com.ar/Producciones/imprimir.asp?IdEntrega=1875>

⁴² BASAKCILARDAN, Sibel; IPEKOGLU, Nursen and TALINLI, Ilhan. Recovery of Ammonia from Human Urine by Stripping and Absorption. En: ENVIRONMENTAL ENGINEERING SCIENCE. p. 615-624

⁴³ VIOTTI, Paolo & GAVASCI, Renato. Scaling of ammonia stripping towers in the treatment of groundwater polluted by municipal solid waste landfill leachate: study of the causes of scaling and its effects on stripping performance. En: AMBIENTE & AGUA. p. 240-252

⁴⁴ OZYONAR, Fuat; KARAGOZUGLU, Bunyamin & KOBYA, Mehmet. Air stripping of ammonia from coke wastewater. En: JESTECH. p. 85-91

regenerados ni se ve afectada por compuestos tóxicos⁴⁵. La extracción de aire tiene como desventajas el bombeo que requiere mantenimiento y consumo de energía, la imposibilidad de remover nitratos y nitrógeno orgánico, la reducción de la eficiencia del proceso en condiciones de helada (a menos que se cuente con suficiente aire caliente) y la generación de problemas de operación por el uso de soda cáustica⁴⁶.

Dentro de las torres de extracción existen, las de flujo transversal, donde el aire entra y fluye por en dirección paralela al agua, que cae al fondo de la torre, y las de flujo a contracorriente, donde el aire entra a través de orificios en el fondo de la misma, mientras que el agua se bombea de la parte superior de la torre para ser distribuida por el material de empaque, método más eficiente⁴⁷.

En algunos sistemas, el aire se recolecta para la absorción de amoníaco en un tratamiento posterior, un absorbedor, donde los gases cargados de amoníaco se tratan con ácido sulfúrico, obteniendo como producto final una solución concentrada de sulfato de amonio que puede ser utilizada como fertilizante⁴⁸.

Es posible que los gases de salida se recirculen para ahorrar en costos de energía, permitiendo que la temperatura del agua dentro de la columna se mantenga dentro del rango de 25 - 38°C, incluso durante el invierno. En ocasiones esto causa una disminución gradual del pH debido a las características ácidas del aire proveniente de la torre de absorción de amoníaco⁴⁹.

Existe otra metodología que desarrolla la extracción por aire desarrollado en un lecho compacto rotativo de flujo continuo. Los resultados indican que este método exhibe un mayor rendimiento de transferencia de masa en comparación con los de los tanques de extracción, torres empacadas y otros contactores gas líquido avanzado. Las variables de control en este proceso son la velocidad de rotación, velocidad de flujo de líquido, velocidad de flujo de gas y temperatura de separación. El lecho compacto rotativo tienen un potencial notable para reducir el tamaño de la torre empacada, debido a la transferencia de masa intensificada en la interfaz gas - líquido generada a través de una alta fuerza centrífuga, sin embargo, este método aún sigue siendo estudio en escala laboratorio⁵⁰.

1.5.2 Tratamiento electroquímico de amoníaco en aguas residuales. La

⁴⁵ Center for Public Environmental Oversight. Air Stripping. [0]. [Consultado el 09/04/2018]. Disponible en: <http://www.cpeo.org/techtree/ttdescript/aistr.htm>

⁴⁶ DE SILVA, Frank. Folletos Informativos de Tecnología de Aguas Residuales de la EPA: Extracción de Amoníaco por Arrastre de Aire. [Consultado el 09/04/2018]. Disponible en: <https://www.estrucplan.com.ar/Producciones/imprimir.asp?IdEntrega=1875>

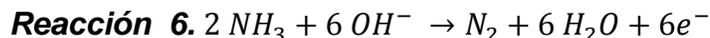
⁴⁷ HARRIOT, Peter; MCCABE, Warren L. & SMITH, Julian C. Operaciones unitarias en ingeniería química (7a. ed.). México, D.F: McGraw-Hill Interamericana, 2007.

⁴⁸ TASK Environmental Engineering. NH3 stripping tower absorber. [Consultado el 09/04/2018]. Disponible en: <http://task.be/en/content/nh3-stripping-tower-absorber>

⁴⁹ CAPODAGLIO, Andrea; HLAVINEK, Petr & RABONI, Massimo. Physico chemical technologies for nitrogen removal from wastewater: a review. En: AMBIENTE Y AGUA. Mayo 21,2015.

⁵⁰ YUAN, Min Hao, et al. Ammonia removal from ammonia rich wastewater by air stripping using rotating packed bed. En: PROCESS SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION. p. 777-785

eliminación de amoníaco de aguas residuales también se puede desarrollar por medios electroquímicos, donde los electrodos de titanio recubiertos con rutenio e iridio RuO_2 - IrO_2 - TiO_2 / Ti son los más usados. La oxidación del amoníaco puede ser directa o indirecta. La oxidación directa es expresada como⁵¹:



La eficacia de la oxidación anódica directa del amoníaco es inferior al 5%⁵², esta se aplica con éxito como una etapa final de pulido, o como un método alternativo a la nitrificación biológica. El otro método es la oxidación indirecta, que se aplica a las aguas residuales que contienen una alta concentración de iones cloruro. El cloro libre, un fuerte agente oxidante, reacciona con el amoníaco para producir como producto final nitrógeno. Sin embargo, la eficiencia de la oxidación de amoníaco con baja concentración de iones cloruro es baja (menos del 10%). La reacción general se puede expresar de la siguiente manera⁵³:



Hoy se utilizan electrodos de platino y otros metales nobles y sus aleaciones que permiten la oxidación de amoníaco con baja concentración de iones cloruro, en donde el proceso sigue un mecanismo de adsorción y deshidrogenación del amoníaco a bajo potencial, debido a que a potenciales altos los electrodos son desactivados por el nitrógeno absorbido donde el platino se oxida y se forman óxidos de nitrógeno como nitratos y nitritos⁵⁴. La demanda de energía de este método es más alta en comparación con un reactor biológico aeróbico para los mismos resultados de tratamiento, sin embargo, el proceso electroquímico ocupa menos área, es más fácil de operar, controlar y mantener, no produce biomasa residual y tiene una alta resistencia a las variaciones de entrada⁵⁵.

1.5.3 Nitrificación y desnitrificación. El proceso de nitrificación - desnitrificación es un proceso microbiológico que tiene como objetivo básico la eliminación del nitrógeno que hay en un residuo⁵⁶.

⁵¹ DONG, Cheng Di, et al. Synthesis, characterization, and application of CuO - modified TiO₂ electrode exemplified for ammonia electro-oxidation. En: PROCESS SAFETY & ENVIRONMENTAL PROTECTION. p. 243-253

⁵² CHEN, Jinluan; SHI, Hanchang & LU, Jinghua. Electrochemical treatment of ammonia in wastewater by RuO₂-IrO₂-TiO₂/Ti electrodes. En: JOURNAL OF APPLIED ELECTROCHEMISTRY. Oct. vol. 37, no. 10, p. 1137-1144

⁵³ CHEN, Jinluan; SHI, Hanchang & LU, Jinghua. Electrochemical treatment of ammonia in wastewater by RuO₂-IrO₂-TiO₂/Ti electrodes. En: JOURNAL OF APPLIED ELECTROCHEMISTRY. Oct. vol. 37, no. 10, p. 1137-1144

⁵⁴ AMSTUTZ, Veronique, et al. Effects of carbonate on the electrolytic removal of ammonia and urea from urine with thermally prepared IrO₂ electrodes. En: JOURNAL OF APPLIED ELECTROCHEMISTRY. p. 787-795

⁵⁵ FENG, Chuanping, et al. Registro detallado Título: Electrochemical Technology Applied in Treatment of Wastewater and Ground Water. 2012. 2-5 p. ISBN 9781612097725. 9781620816820.

⁵⁶ CHEN, Xiaofeng, et al. Nitrification and denitrification by algae - attached and free living microorganisms during a cyanobacterial bloom in Lake Taihu, a shallow Eutrophic Lake in China. En: BIOGEOCHEMISTRY. p. 135-146

En la primera etapa del proceso, el amoníaco es oxidado por bacterias Nitrosomas, a nitrito, quien a su vez se oxida rápidamente a nitrato por la acción de las bacterias autótrofas conocidas como Nitrobacter, en un ambiente con presencia de oxígeno y carbono inorgánico (bicarbonato o dióxido de carbono). En la segunda parte, la desnitrificación, este nitrato es reducido por bacterias heterótrofas a nitrógeno molecular gaseoso, en un ambiente ausente de oxígeno y con presencia de carbono orgánico⁵⁷. El sistema tiene como entrada el agua residual y como salida el efluente líquido y los fangos, último que debe gestionarse. El nitrógeno no eliminado en forma de nitrógeno molecular se distribuirá entre estas dos salidas⁵⁸.

Este proceso tiene un coste de inversión elevado y un control riguroso a causa de la gran cantidad de variables que intervienen: composición de residuo, cargas aplicadas, diferentes poblaciones bacterianas, temperatura, disponibilidad de materia orgánica, entre otras⁵⁹.

Es importante indicar, que la nitrificación se inhibe por la toxicidad de las aguas residuales (presencia de tóxicos e inhibidores) y por la variación de la temperatura. Además, la competencia por los sustratos entre las diferentes poblaciones de microorganismos provoca la disminución de la eficiencia del proceso⁶⁰. Sin contar que también requiere energía en la nitrificación para la aireación y en la desnitrificación una fuente externa de carbono (metanol, acetato, etc.) lo cual lo hace bastante costosa para aguas con altas concentraciones de amoníaco, donde el proceso convencional se utiliza para tratar aguas residuales con concentraciones bajas de amoníaco (inferior a 100 mg/L)⁶¹.

Existe un tratamiento que permite una reducción del 63% del consumo de energía por aireación, que no necesita un donante orgánico para la desnitrificación y permite una reducción del 90% de los costos en la manipulación y transporte de lodos, además de obtener una mayor tasa de eliminación de nitrógeno siendo competitivo en términos de simplicidad e inversión del proceso. Este método es el proceso en una sola etapa⁶².

Este proceso se basa en la interacción entre bacterias aerobias y anaerobias oxidantes de amonio que realizan dos reacciones secuenciales de nitrificación

⁵⁷ Hanna Instruments SAS, Nitrificación / desnitrificación. [Consultado el 15/04/2018]. Disponible en: <http://www.hannainst.es/blog/nitrificacion-desnitrificacion/>

⁵⁸ CHAMORRO, Jorge. Nitrificación-desnitrificación. Fangos activos. [0]. [Consultado el 14/05/2018]. Disponible en: <https://www.iaqua.es/blogs/jorge-chamorro/depuracion-principiantes-v-4-nitrificacion-desnitrificacion-fangos-activos>

⁵⁹ Guía de los tratamientos de las deyecciones ganaderas: Nitrificación y desnitrificación. [Consultado el 09/04/2018]. Disponible en: <http://www.arc-cat.net>

⁶⁰ CARRERA, Julián. Eliminación biológica de nitrógeno en un efluente con alta carga. Estudio de los parámetros del proceso y diseño de una depuradora industrial. Universidad Autónoma de Barcelona,

⁶¹ ABBAS, Ghulam, et al. Ammonia Nitrogen Removal by Single - stage Process: A Review. En: JOURNAL OF THE CHEMICAL SOCIETY OF PAKISTAN. p. 775-782

⁶² ABBAS, Ghulam, et al. Ammonia Nitrogen Removal by Single - stage Process: A Review. En: JOURNAL OF THE CHEMICAL SOCIETY OF PAKISTAN. p. 775-782

parcial y oxidación de amoníaco simultáneamente en el mismo reactor con oxígeno limitado, resultando en una conversión casi completa de amoníaco o nitrógeno gaseoso junto con pequeñas cantidades de nitrato. Es importante indicar que este nuevo método no se encuentra incluido dentro de los alcances de la investigación actual, ya que aún se necesita más conocimiento científico para extender su aplicabilidad y promover sus aplicaciones industriales⁶³.

1.5.4 Eliminación de amoníaco a través membranas. Una membrana puede definirse como una barrera física semipermeable que separa dos fases (gas – líquido o líquido – líquido) y restringe el movimiento de las moléculas a través de ella de forma selectiva⁶⁴.

Las membranas pueden ser microporosas, estructura porosa con una estrecha distribución de tamaño de poro; densas, estructura sin poros donde los componentes se disuelven en la membrana y posteriormente se difunden a través de ella; cargadas eléctricamente, que pueden ser porosas o densas con restos aniónicos o catiónicos fijos en la estructura de la membrana; o anisótropas, estructuras tubulares donde el tamaño del poro, la porosidad y/o la composición de la membrana cambian a lo largo del espesor⁶⁵.

En la eliminación de amoníaco, se utiliza membranas de fibras huecas microporosas, donde la membrana está dispuesta alrededor de un tubo central dentro de una carcasa, en el cual el agua residual fluye por la cubierta (parte externa) mientras que en el lado del lumen (parte interna) se aplica un gas barrido o vacío, o ambos, de forma combinada. En otro caso, puede usarse solución de ácido sulfúrico como absorbente, fluyendo al lado del lumen (parte interna)⁶⁶. El pH del agua residual, su velocidad de circulación y la concentración inicial de amoníaco son variables de operación que influyen en la eficiencia del proceso de remoción⁶⁷.

Las ventajas de este proceso se ven reflejadas en el poco lugar que ocupan, bajos costos de instalación, no perjudicar al medio ambiente al no utilizar productos químicos, eliminar contaminantes que se encuentran a baja concentración, alto rendimiento por el área/volumen de superficie el cual es maximizado y el diseño modular de los sistemas lo cual reduce la instrumentación y el mantenimiento,

⁶³ AOI, Y., et al. Single-stage autotrophic nitrogen-removal process using a composite matrix immobilizing nitrifying and sulfur-denitrifying bacteria. En: APPLIED MICROBIOLOGY & BIOTECHNOLOGY. p. 124-130

⁶⁴ FERNANDEZ, Antonio, *et al.* Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. [0]:Madrid:

⁶⁵ JEON, Jong Woo & LEE, Dong Hoon. Gas Membranes for CO₂/CH₄ (Biogas) Separation: A Review. En: ENVIRONMENTAL ENGINEERING SCIENCE. p. 71-85

⁶⁶ Soluciones para desgasificación y gasificación de líquidos. [0]:2012.

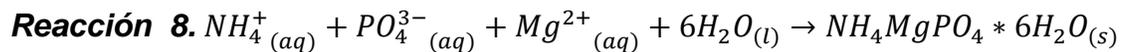
⁶⁷ KARTOHARDJONO, Sutrasno, et al. The removal of dissolved ammonia from wastewater through a polypropylene hollow fiber membrane contactor. En: INTERNACIONAL JOURNAL OF TECHNOLOGY. p. 116-1152

además de acoplarse fácilmente y poderse expandir para satisfacer las necesidades de capacidad⁶⁸.

Sin embargo, la operación puede dar caso de incompatibilidades entre el contaminante y la membrana, problemas de ensuciamiento de la membrana, deficiente escalado y ruido generado por los equipos necesarios al adquirir altas presiones⁶⁹.

1.5.5 Precipitación con estruvita. La estruvita (fosfato de magnesio y amonio hexahidratado) es un mineral cristalino blanco aplicable como base en biofertilizantes en suelos y bioestimulantes en plantas, de liberación lenta y poco soluble en agua neutras o alcalinas, pero fácilmente soluble en ambientes ácidos, que ha sido ampliamente utilizada en el campo de la depuración de efluentes y aguas residuales para la recuperación de NH_4^+ y/o PO_4^{3-} ⁷⁰. La estruvita no contiene metales pesados. Además, permite una entrega de nutrientes lenta, donde las plantas consumen el producto de acuerdo a sus requerimientos, lo cual evita la lixiviación de los nutrientes y por ende, su recepción en masas hídricas, como puede ocurrir cuando se aplican fertilizantes sintéticos⁷¹.

Esta sal se obtiene por la combinación de magnesio, fosfato y amonio en iguales cantidades molares tal como se muestra en la siguiente reacción de precipitación:



Este método tiene como ventaja la recuperación de forma simultánea de nitrógeno y fósforo obteniendo un rendimiento que supera al 90% del contenido inicial de estos dos elementos. Sin embargo, la utilización de las sales de magnesio para efectuar la reacción encarece notablemente el proceso, debido al elevado precio de estos productos comerciales puros⁷². Además, se sabe que la estruvita obstruye las tuberías en los tratamientos de aguas residuales⁷³, y es un compuesto térmicamente inestable, en el cual se presenta pérdida de masa alrededor de los 55°C⁷⁴.

Son varios los factores que influyen en la precipitación de estruvita: la composición química del efluente residual de partida, el tipo de fuente de magnesio, el pH, la

⁶⁸ Los contactores de membrana Liqui-Cel mejoran la calidad del agua y el rendimiento de la ED: 2005.

⁶⁹ FERNANDEZ, Antonio, *et al.* Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. [0]:Madrid:

⁷⁰ HIGALGO, Dolores. Estruvita: Ese oro blanco procedente de los residuos. 2014. 1-4

⁷¹ DARWISH, Mohamad, *et al.* Ammonium - Nitrogen recovery from wastewater by Struvite crystallization technology. En: SEPARATION & PURIFICATION REVIEWS. p. 261-274

⁷² DAGUERRE, Silvana. Recuperación de amoniaco mediante membranas semipermeables a partir de residuos ganaderos. Escuela Politécnica Superior de Orihuela, 2015.

⁷³ WANG, Shunli, *et al.* Struvite precipitation as a means of recovering nutrients and mitigating ammonia toxicity in a two-stage anaerobic digester treating protein - rich feedstocks. En: MOLECULES.

⁷⁴ DARWISH, Mohamad, *et al.* Ammonium - Nitrogen recovery from wastewater by Struvite crystallization technology. En: SEPARATION & PURIFICATION REVIEWS. p. 261-274

relación molar Mg:P:N, la temperatura y la presencia de iones extraños como el calcio⁷⁵.

La cristalización de estruvita se da en un pH óptimo de 9, la presencia de calcio puede perturbar la morfología y pureza del producto final, el cloruro de magnesio hexahidratado y ácido fosfórico son los tipos de fuente más eficiente para la eliminación de amoníaco además que una relación molar de 1:1:1 es suficiente ya que el exceso de iones magnesio y fosfato son poco beneficiosos en la formación de estruvita⁷⁶.

1.5.6 Intercambio iónico. El intercambio iónico como método de eliminación de amoníaco se puede desarrollar a partir de zeolitas. Las zeolitas son un grupo diverso de silicatos de aluminio inorgánicos, alcalinos e hidratados cristalinos que forman una estructura de panal tridimensional abierta y estable en la cual pueden acomodar una amplia variedad de cationes. Entre las zeolitas naturales más usadas se encuentra la clinoptilolita y la mordenita⁷⁷.

La clinoptilolita permite remover 13,62mg de amonio por gramo. El intercambio en esta zeolita se desarrolla por sustitución de iones sodio o hidrógeno por cationes de otros tamaños y otra carga. De esta manera el intercambio iónico se puede definir como una reacción química reversible entre un sólido y una solución acuosa que intercambian iones de una solución a otra⁷⁸.

Existe también la posibilidad de utilizar zeolitas sintéticas, donde se encuentra zeolitas de baja y alta relación Si/Al, tamices moleculares como óxido de silicio, fosfato de aluminio y aluminofosfato con silicio (SAPO) y con metales (MeAPO)⁷⁹. Estas resinas son más costosas, por ello económicamente resulta más factible el uso de zeolitas naturales, sin embargo, las resinas sintéticas presentan un tamaño de partícula que puede llegar a ser seis veces más pequeño que el de la zeolita natural, obteniendo un rendimiento mayor debido a que los tamaños de partícula más pequeños tienen una mayor capacidad de intercambio gracias a la mayor superficie disponible (área específica)⁸⁰.

⁷⁵ SHALABY, Marwa & EL-RAFIE, Shadia. Struvite precipitation and phosphorous removal from urine synthetic solution: Reaction Kinetic Study. En: BULLETIN OF CHEMICAL REACTION ENGINEERING & CATALYSIS. p. 88-97

⁷⁶ ZAIXING, Li, et al. Struvite precipitation for ammonia Nitrogen removal in 7 - Aminocephalosporanic Acid wastewater & nbsp; En: MOLECULES. p. 2126-2139

⁷⁷ CAPODAGLIO, Andrea; HLAVINEK, Petr & RABONI, Massimo. Physico chemical technologies for nitrogen removal from wastewater: a review. En: AMBIENTE Y AGUA. Mayo 21, 2015.

⁷⁸ GARCIA, María del Carmen. Regeneración de Zeolita Clinoptilolita empleada para la remoción de amonio. Universidad Autónoma del Estado de México, 2002.

⁷⁹ DEMIRKIRAN, AR; FULLEN, M. & WILLIAMS, C. Physicochemical and oil adsorption characteristics of zeolites clinoptilolites Review. En: OXIDATION COMMUNICATIONS. p. 2704-2721

⁸⁰ HALBINGER, Christian; RAMIREZ, Rosa and DURAN, Alfonso. Eliminación de amoníaco en aguas residuales clarificadas por el proceso de intercambio iónico con zeolitas. En: INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM. México.

Este método se puede desarrollar por lote o en columna, último según se trate de lecho fijo o móvil, donde los lechos fijos se desarrollan a partir de regeneración en contracorriente o co-corriente.

En el primer caso, método por lotes, se coloca la resina y el líquido a tratar en un tanque, se mezcla permitiendo llegar al equilibrio, luego la solución es filtrada y la resina separada para ser usada nuevamente. En el segundo caso, método por columna, el líquido fluye a través del lecho de resina de manera continua, la cual es mantenida en su sitio por medio de un soporte, el agua tratada es evacuada por un colector en la parte inferior del recipiente⁸¹.

Terminado el ciclo de tratamiento de agua en el método por columna, se procede a la regeneración de las resinas agotadas (saturación por acumulación de iones), que puede ser en co-corriente, donde los líquidos pasan de arriba a abajo tanto en la etapa de agotamiento, como en la etapa de regeneración, o en contracorriente, donde los fluidos pasan de arriba abajo y de abajo arriba alternadamente entre fases de agotamiento y de regeneración. El proceso a co-corriente es menos eficiente debido a que requiere una cantidad excesiva de regenerante para una limpieza completa⁸². Las zeolitas eliminadoras de amoníaco se regeneran usualmente con soluciones con ácido clorhídrico o ácido sulfúrico para intercambiadores catiónicos que utilicen iones de hidrógeno o cloruro de sodio⁸³.

Los efectos más relevantes de este método son la temperatura, la cual al ser mayor permite una eficiencia de eliminación mejor de amoníaco; el pH, donde la capacidad de eliminación es constante entre 4 y 8 disminuyendo rápidamente fuera de este rango y la alta concentración catiónica, lo cual está gobernado por la valencia y el peso de los mismos iones. Otras variables son la velocidad de flujo, tamaño y forma de las partículas del intercambiador y tipo de regenerante usado⁸⁴.

Este proceso es favorable al medio ambiente, proporciona una alta velocidad de flujo de agua tratada, tiene un bajo costo de mantenimiento y tienen la habilidad de recuperación de la capacidad original de la resina mediante el tratamiento con el regenerante. Sin embargo, para este tratamiento el agua residual debe estar libre de turbidez y materia particular debido a que la resina podría trabajar como un filtro y llegar a taparse, entre los problemas típicos se encuentra el ensuciamiento con hierro, adsorción de materia orgánica, contaminación bacteriana e incrustaciones de sulfato de calcio, además que la descarga de los químicos de regeneración debe ser tratada previamente a su vertido⁸⁵. Este método también es efectivo para eliminar nitratos, lo cual se desarrolla a partir de resinas de intercambio aniónico

⁸¹ IDRECO SUDAMERICANA S.A. Generalidad sobre el intercambio iónico. Conceptos introductorios. En: Seminario de agua y energía. 25 y 26 de Septiembre de 1990.

⁸² François de Dardel's. Métodos de regeneración de una columna de intercambio iónico. 2017.

⁸³ MONTES GARIBALDI, José Aurelio. Capítulo III: Tipos de regeneración y selección de regenerantes. p. 64-81.

⁸⁴ CAPODAGLIO, Andrea; HLAVINEK, Petr & RABONI, Massimo. Physico chemical technologies for nitrogen removal from wastewater: a review. En: AMBIENTE Y AGUA. Mayo 21, 2015.

⁸⁵ Artículos informativos y noticias. Las desventajas del intercambio iónico & nbsp;

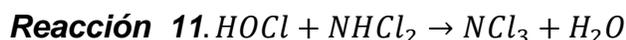
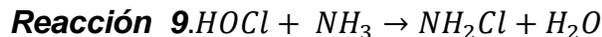
con grupos funcionales de trietilamina o tributilamina, y capacidad de regeneración con NaCl o KCl⁸⁶.

1.5.7 Destilación por membrana. Este método es otra solución viable para la recuperación de amoniaco. Justificado cuando existe corrientes con altas concentraciones y cuando el residuo está disponible caliente. Considerado como de bajo costo y ahorro de energía y potencial para desalinización y eliminación de volátiles. Existen 4 configuraciones conocidas: (1) destilación de membrana de contacto directo, (2) destilación de membrana de espacio libre, (3) destilación de membrana de gas de barrido (4) y destilación por membrana de vacío, donde este último ha recibido una mayor atención debido a su eficiencia.

El pH, la temperatura, la tasa de flujo de alimentación y el grado de vacío son las variables del proceso, las cuales al aumentar promueven su eficiencia. Al operar el proceso a pH de 9,5 y 60°C al vacío, se puede lograr una eliminación de amoniaco de aproximadamente de 1000mg a 100mg. El destilado rico en amoniaco resultante puede convertirse en una solución de sulfato de amonio⁸⁷.

1.5.8 Adsorción de amoniaco. El carbón activado es comúnmente usado para la adsorción de gas amoniaco disuelto en agua, este se caracteriza por tener muchos poros pequeños y de bajo volumen que aumentan el área de superficie disponible para la adsorción, donde con 1 gramo de carbón activado puede tener una superficie de 3000m², además tiene un alto grado de reactividad superficial y buena resistencia mecánica al calor y la radiación⁸⁸.

Este proceso se realiza a partir de la formación de cloraminas, que se obtienen por reacción entre el cloro y el amoniaco⁸⁹.



La formación de las cloraminas depende del pH y de la relación molar entre $Cl_2:NH_3$. Donde a un pH entre 7 - 8 y una relación molar mayor a 1,8, domina la dicloramina, pero si la relación molar es menos a 0,7 prevalece la monocloramina. En seguida

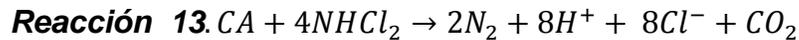
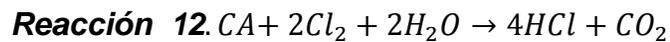
⁸⁶ CAPODAGLIO, Andrea; HLAVINEK, Petr & RABONI, Massimo. Physico chemical technologies for nitrogen removal from wastewater: a review. En: AMBIENTE Y AGUA. Mayo 21, 2015.

⁸⁷ Ammonia removal from aqueous solution by membrane distillation Tuan Duong, Zongli Xie, Derrick Ng & Manh Hoang

⁸⁸ HUANG, Jianyin, et al. Removing ammonium from water and wastewater using cost effective adsorbents: A review. En: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES. vol. 63, p. 174-197

⁸⁹ HUANG, Jianyin, et al. Removing ammonium from water and wastewater using cost effective adsorbents: A review. En: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES. vol. 63, p. 174-197

a la formación de la cloraminas, se desarrollan la reacción de carbón activado (CA) con residuo de cloro y dicloramida⁹⁰:



Existen otros materiales adsorbentes como el biochar, precursor del carbón activado, con alto contenido de carbono y grano fino obtenido mediante pirolisis, y los nanotubos de carbono, que ha recibido la atención de muchos investigadores⁹¹.

Es importante indicar que no es posible tratar efluentes con alta carga de sólidos suspendidos ya que se depositan sobre los gránulos del adsorbente como flóculos dando lugar a pérdida de presión y finalmente a obstrucciones en los canales del adsorbente generando la pérdida de eficiencia del proceso⁹².

1.5.9 Cloración de punto de interrupción. Es un proceso ampliamente utilizado que oxida el amoníaco en nitrógeno gaseoso y lo elimina de las aguas residuales, pero no es práctico como técnica para la eliminación de altos niveles de nitrógeno⁹³. En este proceso se requiere agregar cloro en exceso, el cual genera inicialmente la formación de cloraminas tal como se demostró en la ecuación 10, 11 y 12, y en seguida, promueve la reacción entre el cloro libre y las cloraminas en gas nitrógeno.



Estequiométricamente se requiere una relación de peso de $Cl_2:NH_3$ de 7,6:1 para oxidar el amoníaco a gas nitrógeno. Si se agrega cloro insuficiente para alcanzar el punto de ruptura, no hay formación de gas nitrógeno, y las cloraminas formadas deben destruirse antes de la descarga debido a que las cloraminas aunque poseen un poder desinfectante, tienen un impacto negativo en el sabor y olor del agua, y un impacto toxicológico en la salud del hombre⁹⁴.

El sistema de cloración de punto de interrupción es bastante simple, no necesita diseños especiales, sin embargo, el diseño debe incluir un dispositivo para monitorear continuamente el efluente residual y estimar el ritmo de alimentación de cloro manteniéndolo en un valor establecido⁹⁵. En ocasiones se requiere de cloración como un proceso complementario, debido a que es posible que el cloro

⁹⁰ CAPODAGLIO, Andrea; HLAVINEK, Petr and RABONI, Massimo. Physico chemical technologies for nitrogen removal from wastewater: a review. En: AMBIENTE Y AGUA. May 21, 2015.

⁹¹ HUANG, Jianyin, et al. Removing ammonium from water and wastewater using cost effective adsorbents: A review. En: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES. vol. 63, p. 174-197

⁹² KARRI, Rama; SAHU, Jaya & CHIMMIRI, Venkateswarlu. Critical review of abatement of ammonia from wastewater. En: JOURNAL OF MOLECULAR LIQUIDS. vol. 261, p. 21-31

⁹³ Wastewater treatment plant operator certification training. [0]:2016.

⁹⁴ CAPODAGLIO, Andrea; HLAVINEK, Petr & RABONI, Massimo. Physico chemical technologies for nitrogen removal from wastewater: a review. En: AMBIENTE Y AGUA. Mayo 21, 2015.

⁹⁵ BROOKS, Matthew & CHAIRMAN, Adil. Breakpoint chlorination as an alternative means of ammonia nitrogen removal at a water reclamation plant; Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999.

libre reaccion con otros compuestos presentes en el agua residual formando compuestos tóxicos que pueden tener efectos a largo plazo sobre los usos de las aguas a las que se descargan⁹⁶.

También es importante tener en cuenta el exceso de ácido generado en la reacción, donde es necesario agregar carbonato de calcio $CaCO_2$ para neutralizarlo, con excepción de las aguas residuales que posean alta alcalinidad. Es por ello que el diseño debe incluir los medios para alimentar un químico alcalino a la corriente de aguas residuales para mantener el pH en un rango apropiado, este debe monitorearse cuidadosa y continuamente⁹⁷.

1.5.10 Otros métodos. Es importante tener en cuenta que existen otros métodos para la eliminación de amoníaco de agua residual como ozonización, oxidación de peroxona, oxidación catalítica de aire húmedo, oxidación fotocatalítica, oxidación electroquímica, reducción química de nitratos, entre otros, sin embargo, estos métodos aunque son muy prometedores, siguen estando limitados al nivel de investigación aplicada, es por ello que no serán tenido en cuenta.

1.6 DISEÑOS DE EXTRACCIÓN DE AMONIACO POR ARRASTRE DE AIRE

La extracción de amoníaco por aire es un proceso de transferencia de masa en el cual el amoníaco presente en el medio acuoso se transfiere al aire. Como se mostró en el numeral 1.2.1, el proceso puede desarrollarse en lotes por aireación, o continuo por torres de extracción, siendo más eficiente este último, dentro de los cuales se destacan la torre de platos, la torre empacada y el sistema de pulverización.

1.6.1 Torre de platos. En las torres de platos, el líquido y el gas están en contacto por pasos en bandejas. Usualmente se diseña en acero inoxidable para soportar la fuerza del líquido sobre las placas y por propiedades únicas que permiten la resistencia a la corrosión y mantienen su fuerza mecánica a altas temperaturas⁹⁸. Se pueden diseñarse mediante:

- Platos perforados, donde el vapor se burbujea hacia arriba por hoyos sencillos (3mm a 12mm de diámetro con un área de 5 a 15% en relación al área total del plato⁹⁹) sobre el cual la energía cinética del gas impide que el líquido pueda fluir por los hoyos y se desborda por sobreflujo sobre un vertedero pasando a un plato inferior¹⁰⁰

⁹⁶ ACQUATRON S.A. Decloración pag. 1-2

⁹⁷ BROOKS, Matthew & CHAIRMAN, Adil. Breakpoint chlorination as an alternative means of ammonia nitrogen removal at a water reclamation plant; Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999.

⁹⁸ MANUFACTURAS PETROLERAS SA MAPESA. Boletín # 300: Platos de torre; [0]:

⁹⁹ GEANKOPLIS, Christie John. Procesos de transporte y principios de procesos de separación. 4th ed. CECSA, 669-704 p.

¹⁰⁰ ALVARADO, José Javier. Diseño de una columna de absorción para la neutralización del gas Clorpirifos etil en la producción de películas plásticas para fundas de banano en plata 2 de la empresa Tanber SA. Universidad de Costa Rica, 2013.

- Platos de válvulas, una modificación de platos comunes, donde las aberturas en el plato cuenta con una cubierta de válvulas con movimiento vertical (flotante) o fijas, que consideran un rango de operación más amplio y mayor capacidad pero tienen un costo mayor¹⁰¹.
- Platos de capuchones, en el que el vapor ingresa a los capuchones (casquete asemejando a una taza invertida) fluyendo por las ranuras de la periferia de cada uno, generando burbujas que se dirigen hacia arriba por el líquido que desciende, platos que tienen menor capacidad y son el doble de costosos que los platos perforados¹⁰².
- Platos de doble flujo, que son perforados con agujeros de gran diámetro en un patrón uniforme donde se proporciona el doble propósito de intercambio líquido y vapor, es decir, el líquido fluye a través de las perforaciones, mientras que el vapor se eleva en estas mismas perforaciones, utilizados en torre de menor diámetro¹⁰³.

Estas torres son fáciles de limpiar y tienen un manejo muy bueno en las fluctuaciones de la temperatura. Sin embargo, tienen una caída de presión alta y genera retención de líquido.

1.6.2 Torre empacada. Otro diseño continuo para desarrollar la desorción son las torres empacadas, estas se han vuelto competitivas debido a que permiten aumentar la capacidad y eficiencia en relación a la torre de platos. Una torre empacada cuenta con cuerpos sólidos inertes que reciben el nombre de relleno o empaques, donde el gas entra en el espacio de distribución debajo de la sección empacada y se va elevando a través de las aberturas del relleno, así se pone en contacto con el líquido descendente que fluye a través de las mismas aberturas, donde 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 ordenado¹⁰⁴.

Los empaques aleatorios se encuentran en variedad de formas, cada uno teniendo características específicas con respecto al área de superficie, caída de presión, peso, resistencia a la corrosión y costo. Comercialmente son de 3mm a 75mm y están contruidos con materiales inertes y económicos tales como cerámica, metal o plástico, donde los empaques de cerámica han disminuido su uso debido a su fragilidad. Un buen empaque es el que proporciona espacios vacíos en el orden del 60% al 90% y tienen caídas de presión de gas relativamente bajas. Algunos

¹⁰¹ Universidad de Buenos Aires. Operaciones unitarias de transferencia de masa: Torre de platos.

¹⁰² MARROIG, Gabriel. Unidad de separación de gases ácidos de la planta gorgon lng en barrow island (Australia). Escuela técnica superior de ingenieros de minas y energía, 2015.

¹⁰³ MANUFACTURAS PETROLERAS SA MAPESA. Boletín # 300: Platos de torre.

¹⁰⁴ 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.

empaques conocidos son empaques Raschig y sillas Berl, los más antiguos, pero casi no se utilizan actualmente; los anillos de Pall, conocidos como de segunda generación, son mucho más eficientes al tener un 90% de fracción vacía y una ligera caída de presión en relación a otros empaques de tamaño nominal,; y empaques como los metal tipo Intalox (combinación de silla Berl y anillos Pall) y el metal TriPack (anillo de Pall en forma esférica), conocidos como de tercera generación, los cuales son más modernos y tienen una eficiencia mayor¹⁰⁵.

En el caso de las torres estructuradas o apiladas, son unidades de tamaños comprendidos entre 50 a 200mm, donde el empaque se apila en un arreglo ordenado, cuadrículas interconectadas o mallas de alambre tejido o entrelazado, evolucionado hasta varios empaques patentados que difieren en el tamaño y distribución con alta área específica de superficie y una alta porosidad. Usualmente este tipo de empaques tienen caídas de presión menores, sin embargo, son más costosos de instalar y puede ser no práctico para torres con dimensiones reducidas¹⁰⁶.

1.6.3 Sistema de pulverización. El último tipo de torres de extracción son las torres de pulverización o aspersión, las cuales operan liberando pequeñas gotas de líquido a través de un sistema de distribución de atomización, que caen bajo la influencia de la gravedad a través de una corriente de gas que va en contracorriente. Estas torres tienen un requerimiento de energía relativamente bajo y son simples de operar y mantener, sin embargo, tiene la capacidad de transferencia menos efectiva de los absorbedores mencionados y usualmente se restringe a remoción de particulado, adicionalmente cuenta con un amplio listado de parámetros a controlar tal como el tamaño de gota, su dispersión, la velocidad inicial, el ángulo de pulverización, su patrón de pulverización, la presión y la concentración de amoníaco a la entrada, así como el número de etapas de pulverización dentro de la columna¹⁰⁷.

¹⁰⁵ GEANKOPLIS, Christie John. Procesos de transporte y principios de procesos de separación. 4th ed. CECSA, 669-704 p.

¹⁰⁶ MCCABE, Warren L. Operaciones unitarias en ingeniería química. Sexta ed. MCGRAW-HILL, 2007. 589-593 p. ISBN 9789701061749

¹⁰⁷ BARBOUR, Wiley; OOMMEN, Roy & SHAREEF, Gonsel. Sección 5. Controles Para SO₂ Y Para Gas Ácido. En: Agencia para la Protección Ambiental de los EE.UU., 1995.

2. DIAGNÓSTICO DEL PROCESO DE NITRURACIÓN

El vertimiento al alcantarillado del agua residual obtenida en el proceso de nitruración de la empresa Aluica SAS se ha convertido en un problema ambiental y económico para empresa. Este vertimiento generó que entidades de control ambiental custodiarán el proceso de nitruración, generando la suspensión total del proceso.

Para evaluar el estado de las aguas residuales del proceso de nitruración es necesario previamente diagnosticar el proceso, para ello en este capítulo previamente se describe la empresa y su proceso de producción; se identifica la importancia de las matrices durante la operación y la relación de estas con la nitruración y se muestra la necesidad del agua durante procesos productivos como la nitruración.

Enseguida, se desarrolla una revisión completa del proceso de nitruración desarrollado en la empresa Aluica, y a su paso se evalúan las características físicas y químicas del agua residual del proceso de estudio donde se describe el plan de muestreo y su ejecución, así como los resultados emitidos y su correspondiente análisis.

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

Aluica S.A.S. elabora y comercializa productos extruidos en aluminio, también conocidos como perfiles, está ubicada en el Parque Industrial Montana en el municipio de Mosquera, uno de los municipios de mayor crecimiento industrial en el departamento de Cundinamarca. Cuenta con más de 30 años de experiencia en la venta de materiales estructurales, industriales y arquitectónicos, llevando 8 años en la producción de estos.

Aluica, tiene una amplia experiencia en todo tipo de desarrollo para la industria carrocería, creando perfiles, estructuras y piezas semielaboradas como marcos para puertas y ventanas, perfiles doblados y perfiles pintados. También produce diferentes productos para el área eléctrica que tienen muy buenas propiedades de conductividad eléctrica, permitiendo el reemplazo de algunos productos de cobre por aluminio como blindobarras, perfiles pasacables, perfiles para bandejas portacables y muchos más.

En el área de obras civiles, hizo parte del desarrollo del sistema de piso para estructuras tipo Transmilenio que cumplen todas las especificaciones exigidas por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU)¹⁰⁸. Adicionalmente, diseña barras, tubos redondos, cuadrados y rectangulares, cuarto de círculos y cientos más de perfiles para sectores industriales tal como militar, aeronáutico y arquitectónico. Entre sus principales clientes se encuentran empresas reconocidas tal como Superpolo, Hunter Douglas de Colombia, Indumil y Schneider Electric.

¹⁰⁸ Aluica. Productos Aluica. [Consultado el 10/03/2018]. Disponible en: <http://www.acerosyaluminios.com/pages/detail/obras-civiles.html>

La empresa también diseña productos para sistemas arquitectónicos tal como ventanas, divisiones de baño, cubierta de policarbonato, puertas, entre otros productos, con los cuales ha podido participar en proyectos de constructora reconocidas como Constructora Bolívar y Amarillo¹⁰⁹.

2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE LA EMPRESA

La elaboración de productos extruidos en aluminio está representado productivamente en los procesos de compactado y fundición, extrusión y matricería, selección y empaque, pintura y logística.

El proceso de compactado se encarga de realizar el alistamiento de las materias primas, compactando en una máquina compactadora tipo caimán, materiales chatarra de aluminio externos o residuos de aluminio propios de la empresa, transformándolos en cubos de chatarra compacta de 25 a 30 kg que se acomodan sobre estibas de madera y se trasladan al área de fundición. En dicha área, reciben estos materiales y se encargan de producir aleaciones de aluminio en forma de barras cilíndricas, conocidos como tochos. Las aleaciones de aluminio comunes a producir son de la serie 6000, serie que contiene como principales aleantes silicio y magnesio. Esta operación se realiza en un horno estacionario reverbero con capacidad de 6300 kg por colada, de los cuales se obtienen 5400 kg aprovechables en promedio, distribuidos en 30 tochos de 12.7cm de diámetro y longitudes entre 5.10 y 5.90 metros. La masa de diferencia corresponde a la escoria, material no aprovechable.

Posterior al proceso de fundición, se realiza un proceso denominado homogeneizado, que consiste en un tratamiento térmico que modifica la estructura de los tochos disolviendo por completo los elementos de la aleación¹¹⁰, proceso que abarca un calentamiento de 12 horas a 570°C y un enfriamiento acelerado de 2 horas.

Enseguida, se entrega el tocho homogeneizado al proceso de extrusión, donde mediante una prensa hidráulica de 1000 toneladas de fuerza se somete al tocho previamente calentado, atravesar la silueta de una matriz por compresión, definiendo la matriz como un bloque de acero templado que presenta uno o varios orificios con las dimensiones del producto que se desea obtener, obligando a fluir el aluminio a través de estos orificios, lo cual permite obtener el perfil. La capacidad mensual del proceso de extrusión corresponde a 200 toneladas extruidas de aluminio.

Conforme el perfil se produce, se realiza un enfriamiento acelerado, ya sea con agua, aire o ambos, dependiendo las propiedades mecánicas deseadas para el material. Además, se realiza estiramiento de perfiles para eliminar las tensiones internas de la estructura del perfil y corte de perfil según lo indicado por el cliente.

¹⁰⁹ Aluica. Productos Aluica. [Consultado el 10/03/2018]. Disponible en: <http://www.acerosyaluminios.com/pages/detail/obras-civiles.htm>

¹¹⁰ CAVAZOS, José Luis. Tratamiento térmico de una aleación de aluminio 6063. Universidad Autónoma de Nuevo León, 1998.

En paralelo, el área de matricería acompaña al área de extrusión realizando limpieza, mantenimiento, corrección y recuperación de matrices mediante disolución en soda cáustica, pulido, mecanizado y/o soldadura. Adicionalmente, ejecutan la nitruración, un tratamiento termoquímico el cual mejora las propiedades mecánicas de las matrices aumentando su vida útil de trabajo, proceso que será descrita en detalle en la sección 2.5.

Siguiendo con el proceso, los perfiles se someten a envejecimiento artificial, proceso desarrollado en un horno que mantiene la temperatura entre 100 y 190°C durante un tiempo que puede variar entre 2 a 8 horas con el fin de precipitar los elementos de aleación para permitir un aumento de dureza. Al salir de este proceso, se realiza el proceso de selección y empaque, donde se revisan las características físicas, mecánicas y estéticas del material, empacando bajo un instructivo de empaque.

Adicional, es posible cubrir y proteger el material a partir de un recubrimiento obtenido en el proceso de pintura electrostática (proceso con capacidad de hasta 100 toneladas pintadas mensuales que corresponde a 50,000 metros cuadrados), el cual le brinda al perfil diversas gamas de colores y permite obtener propiedades tal como la resistencia química, resistencia a los rayos ultravioleta y a la intemperie, propiedades anticorrosivas y dureza superficial. Usualmente, materiales del área arquitectónica y estructural son sometidos a este proceso.

Finalmente, el perfil ya sea en bruto o pintado se entrega al área de logística para su correspondiente almacenamiento, despacho y entrega al cliente.

2.3 LAS MATRICES DE EXTRUSIÓN Y SU RELACIÓN CON LA NITRURACIÓN

Como se mencionó en la sección anterior, en el área de extrusión, proceso central de operación, se obtienen los perfiles a partir de una matriz, la cual es la que permite producir multitud de formas de sección transversal constante, donde lo único que se requiere variar para producir un determinado perfil es esta pieza¹¹¹.

La empresa actualmente cuenta 1707 matrices obtenidas de tres proveedores principales: Exco Toolings Solutions SAS (ETS), Idamex y Compes, con una participación de 70%, 21% y 9% respectivamente. Proveedores que se caracterizan por su amplia experiencia y trayectoria en el tema, donde ETS, empresa canadiense con sede en Medellín - Antioquia, presenta una mayor participación, al reconocerse por su calidad, garantía, servicio técnico y buenos precios.

Dentro de la norma AISI (*American Iron and Steel Institute*) conocida por realizar la clasificación de aceros y aleaciones de materiales no ferrosos en Estados Unidos, una matriz se clasifica como acero H13¹¹², acero que presenta alto contenido de cromo, molibdeno y vanadio, que lo hace proveer un balance de tenacidad, alta resistencia a la formación de grietas causadas por choque térmico, resistencia a la

¹¹¹ Censa Industrial. Proceso de Extrusión. [Consultado el 21/10/2017]. Disponible en: https://www.censaindustrial.com/blog_post.php?id=298

¹¹² ACEROS, SISA. Aceros SISA H13. [0]: México: 2012. 1-2

deformación, buen límite de elasticidad y dureza en caliente¹¹³.

Sin embargo, estas propiedades de las matrices se van perdiendo durante los ciclos de esfuerzo del proceso de extrusión debido a la influencia térmica severa, y a la admisión de grandes cargas de compresión, desgaste, choque térmico y oxidación¹¹⁴.

Por lo anterior, las matrices se someten a un proceso conocido como nitruración, el cual permite aumentar la dureza superficial de las matrices y mejorar sus propiedades mecánicas a partir de la formación de nitruros obtenidos por la reacción entre el metal base y los aleantes del acero H13 con nitrógeno amoniacal¹¹⁵.

2.4 EL AGUA EN LA EMPRESA Y LOS VERTIMIENTOS

En los procesos de producción de la empresa el agua es un recurso de servicio de gran importancia, por ejemplo, en el proceso compactado se utiliza como medio de refrigeración del sistema de la máquina compactadora; adicionalmente en el área de fundición, el agua permite solidificar el aluminio para la obtención de los tochos; continuando con el área de homogeneizado, el agua se utiliza para realizar el enfriamiento acelerado durante el tratamiento térmico; en el área de extrusión, el agua permite la refrigeración de la prensa hidráulica; y en el proceso de pintura, se utiliza como disolvente de los químicos en el tratamiento previo a la aplicación de pintura. En el caso del proceso de nitruración, el agua permite la homogeneidad de la temperatura del horno de nitruración durante el proceso.

Los procesos de compactado, fundición, homogeneizado y extrusión, aprovechan de manera efectiva el agua al tener un sistema cerrado de recirculación, representado bajo una piscina, dos tanques y dos pozos subterráneos de agua que almacenan hasta 300m³ de agua en total. La pérdida de agua en el sistema se despliega únicamente por evaporación, es por ello que cada tres (3) meses se ingresa al sistema 150m³ aproximadamente para recuperar el volumen deseado (agua de carrotanques), según los datos suministrados por la empresa. Es importante indicar que este sistema cuenta con el aprovechamiento de las aguas lluvias.

En cambio, en el proceso de pintura y en la nitruración, se utiliza agua de acueducto y se generan vertimientos no controlados al alcantarillado. En el caso de pintura se utilizan hasta 21m³ de agua de acueducto semanalmente y genera vertimientos al alcantarillado de hasta 14m³, mientras tanto el área de nitruración tiene un consumo de agua semanal de hasta 50m³ semanales (5 nitruraciones desarrolladas en una semana, cada una con un consumo de hasta 10m³ de agua). De esta manera, la distribución de consumo de agua de acueducto en la empresa se refleja en un 26% para el proceso de pintura, 63% para el proceso de nitruración y 11% en otros

¹¹³ ACEROS, SISA. Aceros SISA H13. [0]: México: 2012. 1-2

¹¹⁴ ORTIZ PRADO, Armando; RUIZ CERVANTES, Osvaldo and ORTIZ VALERA, Juan Armando. MODELADO DE PROCESOS DE MANUFACTURA. 2013. 192 p.

¹¹⁵ Key to Metals, A G. Gas Nitriding. [Consultado el 11/02/2018]. Disponible en: <http://www.totalmateria.com/articles/Art132.htm>

procesos productivos de la empresa y en el consumo de agua doméstica (en los casos de mayor consumo de agua).

La nitruración, se ha convertido en un problema ambiental y económico, ya que entidades reguladoras tal como la Corporación Autónoma Regional (CAR), impidieron desarrollar el proceso hasta conocer las características físicas y químicas del agua vertida al alcantarillado de este proceso y definir un procedimiento que refleje el manejo de estas aguas. Es por ello, que la nitruración actualmente se realiza en empresas externas, generando un gasto promedio semanal de 2'040.000 pesos para el año 2018.

Si no se soluciona este problema, la empresa no podrá desarrollar el proceso de nitruración, lo cual genera un problema económico, debido a que el gasto de servicio de nitruración desarrollado por empresas externas sería cada vez mayor. Los pronósticos de producción indican un crecimiento de hasta del 100% debido a la compra de un segundo equipo de extrusión, proyecto que se encuentra en etapa de planeación desde el año 2017 y que en el año 2019 arranca su puesta en marcha.

De esta manera, este proyecto desarrolla una propuesta para el tratamiento de agua residual del proceso de nitruración, con el fin de reactivar nuevamente el desarrollo interno de la operación de nitruración.

Nota: es importante indicar que los datos mencionados en la sección 2.2, 2.3 y 2.4 fueron suministrados por la empresa y están bajo custodia de esta. Estos datos fueron obtenidos a partir de los registros descritos en las áreas de producción tal como base de datos de producción, indicadores de gestión, protocolos y procedimientos de procesos, etc.

2.5 LA NITRURACIÓN EN LA EMPRESA ALUICA

En esta sección se describe todo lo relacionado con el equipo de nitruración de la empresa. Inicialmente se describe el equipo de nitruración, después se analiza el proceso de nitruración a partir del historial que abarca información del año 2014 y 2015 y enseguida se describe actividades para facilitar el control del proceso de nitruración tal como la inspección y mantenimiento del equipo, así como el desarrollo y actualización del protocolo del proceso de nitruración.

2.5.1 Equipo de nitruración de la empresa. En Aluica SAS, la nitruración se realiza en un Horno de retorta al vacío de acero inoxidable. El equipo tiene 2m de largo, 1.95m de ancho y 2.25m de alto, donde el tamaño de trabajo presenta una forma cilíndrica con un diámetro (\emptyset) 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 $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

El horno se compone principalmente de caja y tapa de horno, elementos de calefacción, sistema de vacío, sistema de admisión de aire, sistema de control de temperatura y sistema de refrigeración, en el fotografía 1 se muestra una imagen del horno de nitruración, mientras tanto en el anexo A se muestra el diagrama de

cuerpo de horno y sus respectivas partes y un diagrama esquemático del panel de control del equipo.

Fotografía 1. Horno de nitruración de la empresa Aluica SAS



Fuente: Elaboración propia.

2.5.2 Historial del proceso de nitruración en la empresa. Se recopiló información del desarrollo histórico del proceso, realizando una base de datos a partir de los registros de control de proceso, la serie temporal utilizada fue el año 2014 - 2015 debido a que en el año 2016 y en adelante el proceso de encontraba detenido completamente. Los registros contienen valores registrados de: masa de matrices, tipo de matriz (sólida o tubular), dureza inicial y final por matriz, consumo de agua y consumo de energía por proceso.

La base de datos recolectada corresponde a 128 procesos de nitruración, identificados desde el número de lote 348 y desarrollados entre el 5 de Agosto del 2014 al 5 de Agosto del 2015, procesando en total 1112 matrices.

La importancia de revisar el historial de la nitruración radica en evaluar si el proceso tiene un factor de reproducibilidad y repetibilidad apropiado, es decir, revisar si los resultados entre lotes son próximos entre sí o por el contrario, tienen una alta dispersión.

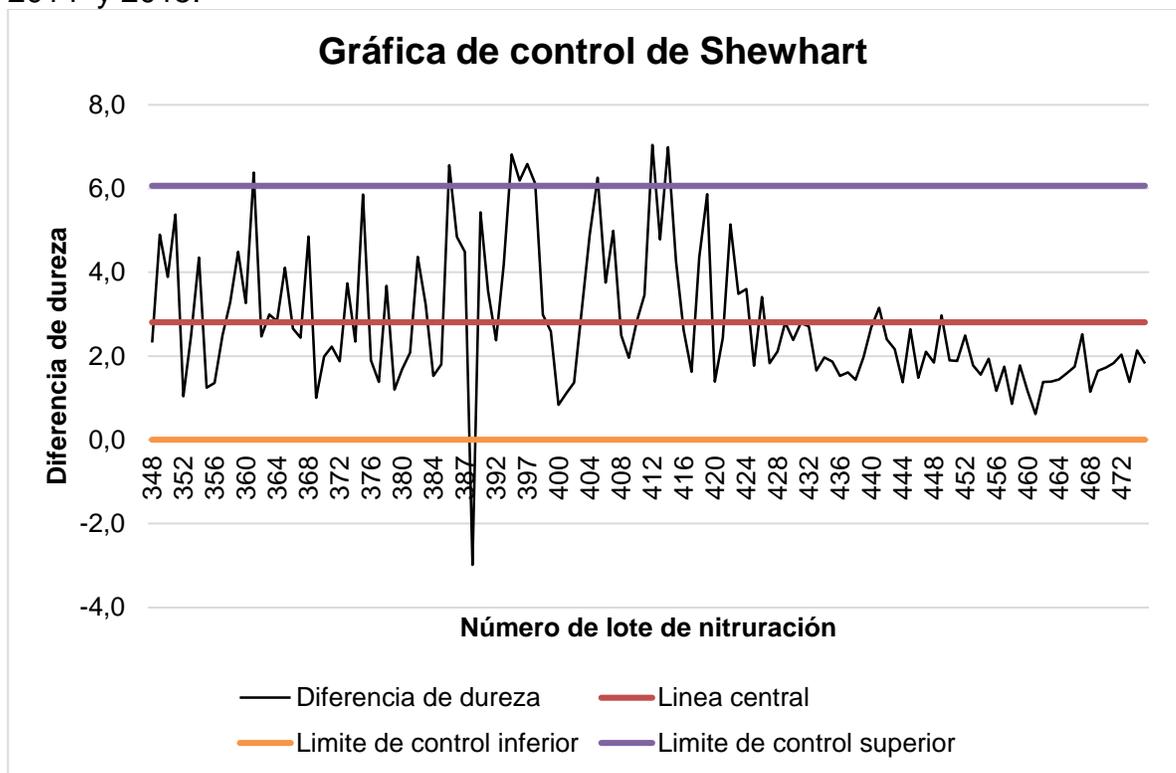
Esto permite identificar si el proceso está o no está bajo control estadístico, donde en caso de estarlo, refleja el desarrollo efectivo del proceso sin presencia de distorsiones entre lotes, obteniendo resultados semejantes, y en caso contrario, permite detectar la presencia de causas asignables o aleatorias y promover acciones que permitan reducir la variabilidad lo más posible o al menos mantenerla dentro de unos límites.

Como el objetivo principal de la nitruración es aumentar la dureza superficial de las matrices, la variable que indica el correcto desarrollo del proceso de nitruración es la dureza, de esta manera, comparando los procesos a partir de las durezas obtenidas es posible identificar si está o no está bajo control estadístico.

Estos resultados además, permiten situar el comportamiento del vertimiento de agua residual generado en el proceso, ya que si el proceso de nitruración está bajo control estadístico, las características físicas y químicas del vertimiento del agua residual emitido, también lo estarán.

En la gráfica 1, se describe un gráfico conocido como control de Shewhart, el cual permite evaluar la variabilidad del proceso (descrito en la sección 1.3), donde el eje vertical representa el cambio de dureza, definido como la diferencia entre la dureza final y la dureza inicial promedio de las matrices procesadas en cada lote de producción, y el eje horizontal representa el código de cada lote identificada en la gráfica como la línea negra. Adicionalmente, el gráfico contiene una línea central que refleja el valor promedio del cambio de dureza (línea roja) y una línea superior (línea morada) e inferior (línea naranja) que corresponde a los límites permisibles del cambio de dureza. De esta manera, si los límites son sobrepasados, el proceso ha perdido su estabilidad estadística y está por lo tanto probablemente fuera de control.

Gráfica 1. Gráfica de control de Shewhart de la operación de nitruración del año 2014 y 2015.



Fuente: Elaboración propia

Nota 1: la línea central corresponde al promedio total del cambio de dureza (diferencia de dureza final y dureza inicial) de todas las matrices para todos los lotes.

Nota 2: para calcular el límite de control inferior y superior fue necesario determinar la desviación estándar total (uso de 2 – sigma), obtenida a partir de las desviaciones

estándar de cada lote. Es importante indicar que el límite de control inferior obtuvo un valor de -0.457, sin embargo, un cambio de dureza negativo contradice la teoría de nitruración, es por ello, que este valor se descarta y se presume como cero (0).

Nota 3: en la tabla 22 del anexo B, se desarrollan los cálculos necesarios para realizar la gráfica de control emitida.

En la gráfica se observa que únicamente ocho (8) de los 128 lotes evaluados, superaron los límites a razón de 2 - sigma, que corresponde al 6.25% del total de lotes, donde siete (7) lotes de producción tienen valores que superan el límite de control superior y un (1) lote de producción sobrepasa el límite de control inferior, lo que demuestra que la probabilidad que un lote se encuentre fuera de los límites de control es suficientemente baja. Es importante indicar que el lote 389, lote que obtuvo un valor negativo sobrepasando el límite de control inferior puede justificarse posiblemente por un error grosero, es decir, una equivocación en la lectura y/o el registro de los datos por parte del operario encargado.

Sin embargo, al revisar los puntos presentes dentro de los límites indicados, se observan variaciones bruscas del valor de la variable estudiada entre procesos obteniendo picos y valles consecutivos que emiten un concepto desfavorable del proceso al obtener una variabilidad alta. Además, en la gráfica aparece una serie consecutiva de valores que se distribuye a un lado de la línea central, tal como ocurre luego del lote 424, lo cual genera cambios en el valor promedio total, este fenómeno es asumido por los instrumentos de medición utilizados, es posible que en su momento estuvieran descalibrados o generaban un error por desgaste o deriva instrumental. Todas estas razones son indicativas de que el procedimiento debe ser inspeccionado y que el proceso no está bajo control estadístico.

2.5.3 Mantenimiento e inspección del horno de nitruración. Debido a que se presenta una detención del proceso de nitruración desde el año 2015 hasta la fecha y al observar el gráfico de control de Shewhart el cual refleja una variabilidad alta entre proceso y proceso, el investigador sugiere a la empresa realizar un mantenimiento previo para activación del proceso, el cual es desarrollado por la empresa Soluciones Electro Industriales (SEI).

Durante el mantenimiento se realiza inspección de amoniaco para verificar fugas a lo largo de la trayectoria de la tubería, desde los cilindros de distribución hasta el horno, obteniendo como resultado una única fuga de amoniaco a la entrada del caudalímetro (medidor de flujo de amoniaco), el cual se corrigió inmediatamente.

También se realizó inspección eléctrica, donde se observó el estado de los componentes eléctricos del panel de control y del horno de nitruración los cuales físicamente se encontraron en buen estado, sin embargo, se ajustan todos los terminales de conexión de cada componente.

En seguida se inspeccionaron los motores de ventilación del horno, donde se obtuvo un cambio de corriente en el ventilador de recirculación de aire interno, se sondean las conexiones y se evidencia el recalentamiento de los cables, procediendo a eliminar la cristalización del cable y conectar nuevamente el motor.

Finalmente, se limpian y se evalúan los componentes más relevantes del tablero. En el anexo C se muestra el informe de inspección del horno detalladamente donde se observa cada uno de los elementos inspeccionados, evaluados, medidos y si fue necesario su relata su corrección, este informe tiene una buena cantidad de fotografías que describen las características del horno y complementan la información de la sección 2.6.1.

2.5.4 Actualización de protocolo de proceso de nitruración. Debido a que el proceso de nitruración no se encuentra bajo control estadístico, como se observó en la sección 2.5.2, no es apropiado desarrollar la caracterización física y química del agua residual del proceso de nitruración ya que los resultados arrojarían una variabilidad alta entre proceso y proceso (resultados dispersos, poco uniformes).

Es por ello que después del desarrollo del mantenimiento preventivo, se revisó el protocolo existente del proceso de nitruración, observando que el protocolo era desconocido por algunos de los operarios encargados, se llevaba a cabo de manera incorrecta, se encontraba desactualizado, no presentaba información completa sobre las actividades a desarrollar, etc. Así que fue necesario ajustar el protocolo a partir de recopilación de información bibliográfica, información documental presente en la empresa, manual de uso del equipo, y memorias y experiencia de los operarios, con el fin de promover un protocolo que permita un control efectivo durante la operación.

Este protocolo se desarrolla con el fin de garantizar que entre proceso y proceso de nitruración la variabilidad sea mínima obteniendo resultados muy cercanos entre procesos, no solamente de la variable de interés del proceso definida como el "Aumento de dureza", sino también variables de control de proceso (temperatura, tiempo, presión de vacío, entre otras) y resultados del proceso como el consumo de agua, consumo de energía y consumo de amoniaco.

De esta manera, la bibliografía informa que según el material de la pieza y los requisitos de profundidad de la capa de nitruros, el tiempo de proceso es de hasta 90 horas¹¹⁶. En la empresa, el tiempo estipulado es de 12 horas, tiempo recomendable de proceso que garantiza las propiedades finales deseadas en las matrices, certificando que la superficie de la pieza obtendrá suficiente capa de nitruros para aumentar su dureza y mejorar otras propiedades mecánicas. Es importante indicar que un tiempo mayor, genera la fragilidad de la matriz y acelera el desgaste de la pieza en el proceso de extrusión. Pero a este tiempo se le debe sumar 5 horas de calentamiento previo y 5 horas de enfriamiento luego del proceso.

Así, antes de la nitruración, se debe eliminar de la superficie de las matrices, manchas de óxido, aceite, aluminio y cualquier otro tipo de partícula o suciedad.

¹¹⁶ GOMEZ, Tomas, *et al.* Carrocería: Elementos fijos. 4th ed. Madrid, España: Thomson Paraninfo, 2007. 91 p.

Nuevas (9) matrices (78kg en promedio) se acomodan en una canasta vertical la cual se introduce con la ayuda de un polipasto al horno.

El proceso inicia con el encendido de la fuente de energía, calentamiento de horno y refrigeración con agua, proceso que dura 5 horas, seguido a esto se realiza la generación de vacío, ingreso de amoníaco y actividad de nitruración en un tiempo estimado de 12 horas, pasado el tiempo correspondiente, se apagan las fuentes de energía, manteniendo la refrigeración de agua y dejando que las matrices se enfríen hasta la temperatura ambiente el cual dura 5 horas más aproximadamente. En el anexo D se muestra el nuevo protocolo del proceso de nitruración descrito paso a paso para efectuar correctamente el proceso, para su ejecución es necesario apoyarse con la figura 21 del anexo A que representa las partes del gabinete de control de equipo.

Es importante indicar que la temperatura del horno en ningún caso debe sobrepasar 650°C ya que el equilibrio nitrógeno - hierro se desplazaría a fases con una dureza quebradiza. Algunas consideraciones adicionales en el proceso, se refieren a mantener la botella de gas amoníaco 5 metros lejos de los lugares de trabajo, considerar en el plan preventivo la calibración y mantenimiento anual de válvulas de seguridad efectuada por técnicos con la debida competencia, promover el uso de los equipos de protección personal necesarios, así como utilizar siempre mangueras específicas para amoníaco¹¹⁷. Además, debido a que la presión de la pipeta de amoníaco desciende conforme fluye hacia el horno de nitruración, genera un descenso brusco de la temperatura, que promueve su congelamiento, aspecto que obliga el uso en paralelo de dos o más pipetas de amoníaco¹¹⁸.

Al terminar el proceso se debe abrir la tapa completamente del horno de nitruración y antes de retirar las matrices se debe esperar un tiempo prudente para que el amoníaco residual sea retirado por el viento evitando intoxicaciones. Finalmente es importante indicar que durante el proceso es necesario controlar las siguientes variables:

- Temperatura del horno.
- Tiempo de nitruración.
- Presión de gas de amoníaco.
- Presión de Vacío generado

En general las etapas a desarrollar durante el proceso de nitruración son (véase anexo D):

1. Limpieza previa de la superficie del acero antes de la nitruración.
2. Precalentamiento antes de la nitruración.
3. Proceso de nitruración dentro de la cámara sellada.

¹¹⁷ VIO, Juan. Guía de uso y manejo de amoníaco en la refrigeración de frutas y hortalizas frescas: plan de emergencias. Asociación de exportadores de fruta de Chile, 2012.

¹¹⁸ RIOS, Luis Guillermo & MUSTAFA, Yamal. Gases ideales: Diagramas termodinámicos. En: SCIENTIA ET TECHNICA. p. 449-454

4. Enfriamiento controlado después de nitruración

2.6 EL AGUA EN EL PROCESO DE NITRURACIÓN

Con la inspección y mantenimiento del equipo, así como la actualización del protocolo del proceso de nitruración se garantiza la efectiva ejecución del proceso y la obtención de resultados uniformes entre procesos. De esta manera, es posible desarrollar la caracterización de las aguas residuales del proceso de nitruración las cuales obtendrán un comportamiento normal.

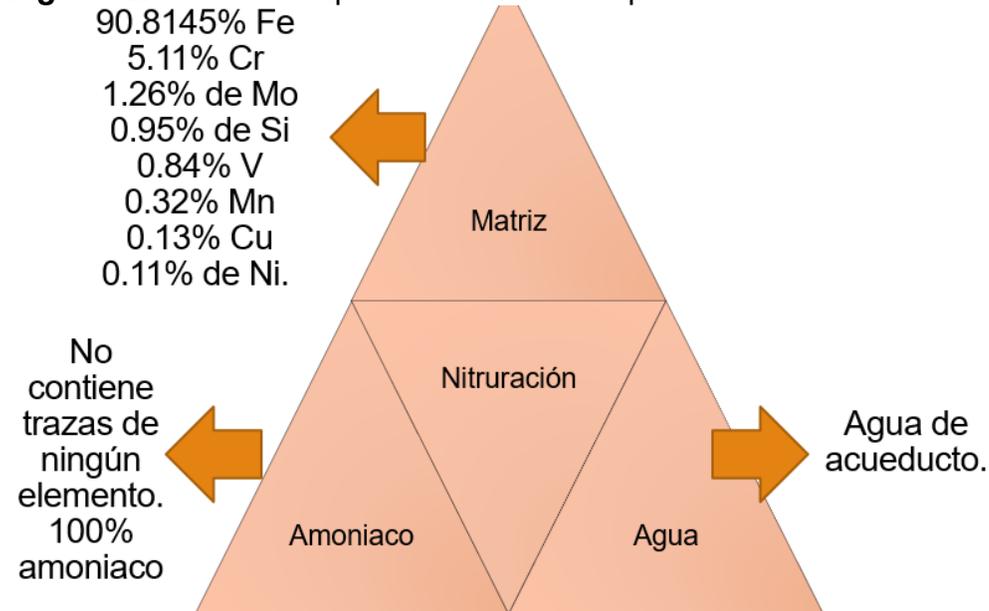
En esta sección se realiza el plan de muestreo de agua residual del proceso de nitruración, el informe de su ejecución, los resultados por parte de un tercero y el análisis de estos mismo por parte del investigador.

2.6.1 Compuestos posibles presentes en el agua del proceso de nitruración.

Antes de desarrollar el plan de muestreo es importante reconocer los compuestos y elementos que posiblemente estarán presentes en el agua residual vertida en el proceso de nitruración, esto debido a que en el artículo 17 de la Resolución 0631 del 2017 indican que se permite excluir parámetros demostrando que estos no se encuentran presentes en las aguas residuales, parámetros que se enuncian junto a los valores límites máximos permisibles en el artículo 16: vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas - ARnD al alcantarillado.

De esta manera, en el caso tratado, no es necesario evaluar todos los parámetros mencionados en el artículo 16, debido a que el proceso no tiene la participación de todos ellos. Las sustancias, compuestos y materiales presentes en el proceso de nitruración se muestran en la figura 2.

Figura 2. Sustancias que intervienen en el proceso de nitruración.



Fuente: Elaboración propia.

En el anexo E, se muestra el certificado de inspección del acero utilizado por la empresa ETS para la construcción de las matrices la cual es suministrado por parte de Villares metals, en este se muestra que la composición química de una matriz corresponde a 90.8145% de hierro, 5.11% de cromo, 1.26% de molibdeno, 0.95% de silicio, 0.84% de vanadio, 0.32% de manganeso, 0.13% de cobre y 0.11% de níquel, además de trazas de otros metales como aluminio, plomo, estaño, wolframio, etc.

En el anexo F también se muestra la hoja de datos de seguridad del amoniaco suministrado por Cryogas, en este documento se observa que el cilindro de amoniaco no contiene trazas de ningún elemento adicional siendo 100% amoniaco.

De esta manera, teniendo en cuenta las elementos metálicos presentes en las matrices y el gas utilizado en el proceso, se identifica que los analitos posibles en el vertimiento del agua residual son metales como (1) el hierro y (2) el cromo componentes de las matrices (únicos metales considerados al tener una participación representativa con respecto a los demás metales dentro de la composición química de las matrices), (3) nitrógeno amoniacal generado por el gas amoniaco utilizado y (4) nitratos y (5) nitritos obtenidos de la reacción posible entre amoniaco y hierro o amoniaco y cromo durante el proceso termoquímico entre el amoniaco y las matrices, o durante el contacto entre el amoniaco y la tubería metálica del sistema.

Para evaluar las concentraciones de los elementos y compuestos anteriormente descritos, se utilizaron técnicas analíticas químicas, no se utilizaron técnicas biológicas, microbiológicas y toxicológicas debido a que:

- En el proceso no hay participación de material orgánico o biológico.
- No existe la presencia de microorganismos al ser un medio inerte.
- El enfoque de estudio no va dirigido a la toxicología, tal como se mencionó en la sección 1.1.

Las técnicas químicas serán efectuadas directamente por la empresa: Laboratorio Quimicontrol Ltda. Ambiente e industria, un laboratorio acreditado para producir información cuantitativa, física y química, para los estudios o análisis ambientales requeridos por las autoridades ambientales competentes, reconocido por el Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM)¹¹⁹.

En el cuadro 1 se indican las técnicas analíticas a desarrollar por cada ítem de interés, indicando el método de análisis y límite de cuantificación (LCM).

¹¹⁹ IDEAM. Resolución 0010 del 10 de Enero del 2017. (10/01). 2017.

Cuadro 1. Análisis de laboratorio.

Variable	Técnica analítica	Método de análisis	L.C.M.
Nitrógeno amoniacal (N - NH ₃), mg/L	Destilación titulométrico	SM 4500 NH	0.72
Nitratos (N - NO ₃ -), mg/L	Salicilato sódico	Jean Rodier	2.7
Nitritos (N - NO ₂ -), mg/L	Reactivo de Zambelli	Jean Rodier	0.032
Hierro Total (Fe), mg/L	Absorción atómica llama	SM 3030H	0.01
Cromo total (Cr), mg/L	Absorción atómica llama	SM 3030H	0.0108

Fuente: Elaboración propia.

Nota 1: la destilación titulométrica consiste en destilar el amoniaco y recolectar sobre un agente neutralizante, en este caso solución de ácido bórico desarrollando un análisis volumétrico mediante titulación simple¹²⁰.

Nota 2: la técnica analítica Salicilato sódico para análisis de nitrato se basa en la reacción del anión nitrato con salicilato de sodio en medio alcalino para la formación de paranitrosalicilato de sodio de color amarillo, cuya intensidad de color medida fotométricamente a 405nm es proporcional a la concentración de nitratos presente en la muestra de agua¹²¹.

Nota 3: la técnica analítica para determinar la concentración de nitritos en una muestra de agua es conocida como reactivo de Zambelli, consiste en la reacción con ácido sulfanílico, en medio clorhídrico y en presencia de ion amonio y fenol, que da lugar a la aparición de un compuesto de color amarillo pardo el cual es medido espectrofotométrica a 425nm. La absorbancia es proporcional a la concentración de nitritos¹²².

Nota 4: la absorción atómica de llama es un método que permite analizar más de 62 metales diferentes en soluciones. En esta técnica se emplea una fuente de radiación externa que emite rayos de radiación de la misma longitud de onda que las de absorción del analito, estos rayos se hacen pasar a través de la llama donde están los átomos de analito que absorben radiación¹²³.

2.6.2 Plan de muestreo de agua residual. Para realizar el análisis de agua, es necesario previamente tomar una muestra representativa y homogénea de la masa

¹²⁰ HERVAS, José Antonio. Determinación de nitrógeno total y amoniacal.

¹²¹ GT laboratorio. Nitratos. [0]:1-2

¹²² SEVERICHE, Carlos Alberto; CASTILLO, Marlon Enrique and ACEVEDO, Rosa Leonor. Manual de métodos analíticos para la determinación de parámetros fisicoquímicos básicos en aguas. [1]:2013.

¹²³ Universidad de Granada. Espectroscopia atómica. pag.1-2

de agua en estudio. Para ello se estipula un plan de muestreo el cual incluye la recolección de la muestra, el transporte de la muestra a las instalaciones del laboratorio, la recepción del material por parte del laboratorio, la medición de variables solicitadas, hasta la entrega de resultados, donde todos estos procesos requieren que la muestra conserve las características del material original.

La recolección de la muestra es desarrollada por el equipo de aseguramiento y calidad en compañía del investigador. Aunque el proceso de nitruración tiene una duración de 22 horas que se reparte en cinco (5) horas de calentamiento hasta la temperatura de trabajo, doce (12) horas de nitruración y cinco (5) horas de enfriamiento controlado, es únicamente en la segunda etapa donde se efectúa el proceso, sección de proceso con presencia de amoníaco que permite reconocer la interacción matriz - amoníaco - agua, por ende, es aquí donde se llevará a cabo el muestreo. No se realiza muestreo en las otras dos secciones del proceso, debido a que en estas secciones, aunque se maneja agua, no hay presencia de amoníaco en el sistema, generando que el agua utilizada obtenga un resultado nulo o casi nulo (trazas) sobre los compuestos y elementos de interés a evaluar debido a que se está utilizando única y directamente agua de acueducto para la refrigeración del sistema.

El análisis de agua fue ratificado por la empresa únicamente para tres muestras de agua. Debido a la limitación existente en el número de muestras para análisis, se planteó tomar muestra de agua cada dos horas arrancando en el valor cero y terminando a las 12 horas de desarrollo de proceso, de manera manual, y distribuir las siete (7) muestras obtenidas sobre las 3 muestras para análisis en el laboratorio, decidiendo que la muestra inicial y la muestra final corresponderían a muestras simples, mientras que las muestras en la hora 2, 4, 6, 8 y 10 (5 muestras) serían mezcladas para formar una muestra compuesta.

Las muestras fueron recolectadas en envases plásticos, no se utilizan botellas de vidrio debido a que este material puede adsorber metales, aumentando la incertidumbre de medición de hierro y cromo¹²⁴. Tampoco es necesario el uso de botellas especializadas como la botella nansen, kemmerer, van dorn o bombas extractoras debido a que las aguas trabajadas no cuentan con fitoplancton, zooplancton o microorganismos¹²⁵. Estos recipientes son entregados directamente por el laboratorio ya con los preservantes necesarios, los cuales corresponden a:

- Para amoníaco: H₂SO₄ a pH < 2.
- Para nitrato y nitrito: almacenamiento de botellas dentro de nevera de icopor con bolsas de hielo suficiente para refrigerar manteniendo una temperatura de 4°C.
- Para metales disueltos en general: HNO₃ a pH < 2. Se recomienda filtrar previamente.

¹²⁴ Dr. Calderón Labs. Toma y preservación de muestra. [1]:1999.

¹²⁵ Instituto de investigaciones marinas y costeras. Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos (aguas, sedimentos y organismos). [0]: Santa Marta: 2013.

Adicionalmente, la toma de las muestras se debe desarrollar con el uso de los elementos de protección personal tal como gafas, tapaoídos, casco, botas punta de acero, bata blanca y guantes.

Además de las botellas plásticas, se requirió un equipo portátil para medición de pH y temperatura, con el instructivo de calibración del mismo, cronómetro, balde plástico con escala de medición de volumen, nevera de icopor con suficientes bolsas de hielo para mantener una temperatura cercana a 4°C (suministrado por el laboratorio), cinta pegante y de enmascarar y agua destilada.

Existen algunos parámetros que se evaluaron en campo medidos directamente por parte del equipo de aseguramiento y calidad de la empresa Aluica SAS con acompañamiento del investigador las cuales se realizaron cada dos horas durante las 12 horas de proceso iniciando en la hora cero (0) y terminando en la hora doce (12). Estos parámetros se mencionan a continuación junto a una descripción de la importancia de cada uno.

- Temperatura: parámetro controlado para vertimientos puntuales de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado descrito en el artículo 5 de la Resolución 0631 del 2015 que indican un valor máximo permisible de 40°C¹²⁶.
- pH: parámetro controlado descrito en el artículo 16 de la Resolución 0631 del 2015 donde indican que debe estar en un rango de 5 a 9.
- Flujo volumétrico (Tiempo gastado para llegar a un volumen determinado): comprensión del consumo de agua por proceso de nitruración.

Mientras tanto, el laboratorio determina la concentración de las siguientes sustancias de las tres muestras (muestra simple inicio, muestra compuesta y muestra simple fin).

- Nitrógeno amoniacal
- Nitratos
- Nitritos
- Determinación de metales: Hierro y Cromo

Se recuerda al lector que en la sección 2.6.1 se definieron las razones por la que fueron seleccionados únicamente estos compuestos para análisis. En el anexo G se muestra el protocolo de muestreo de agua residual guiado a partir de la Norma Técnica Colombiana NTC ISO 5667-10 de 1995 conocida como la guía de muestreo para aguas residuales en donde se encuentran las etapas: “antes de muestreo”, “en el muestreo”, después del muestreo” y “coordinación de transporte de muestras”.

2.6.3 Ejecución de plan de muestreo. El muestreo se llevó a cabo el día 27 de Marzo del 2018. Fue coordinado y dirigido por el investigador y desarrollado por el

¹²⁶ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631 17 de Marzo del 2015.

equipo de aseguramiento y calidad de la empresa, quienes tienen competencias en metrología lo cual permite garantizar la efectiva medición de los correspondientes parámetros *in-situ*.

El proceso inició a las 12:00 (sistema horario de 24 horas) con el correspondiente calentamiento del horno de nitruración hasta la temperatura objetivo (530°C), se presentaron problemas técnicos de manejo de equipo durante esta etapa, lo cual ocasionó que su tiempo de duración pasará de 5 horas propuestas a 8 horas. Sin embargo, este retraso no tiene ninguna implicación directa en el desarrollo del muestreo, debido a que en esta sección aún no se alimenta gas amoníaco al proceso, de donde se infiere que el agua mantiene sus características físicas y químicas propias del acueducto.

Inmediatamente el equipo llega a la temperatura objetivo, el tiempo de nitruración arranca y la alimentación completa de amoníaco se activa, en un tiempo inmediatamente después de esta activación se realiza el primer muestreo, un muestreo simple desarrollado a las 20:00 horas (muestra # 1). De ahí en adelante se toman muestras cada dos horas hasta tomar 5 muestras (muestra # 2 a 6).

Enseguida, se detiene la alimentación de amoníaco y se activa el proceso de enfriamiento donde se toma una muestra simple tomada a las 8:00 del día 28 de Abril del 2018 (muestra # 7). En el cuadro 2 se representa las muestras tomadas para la medición de parámetros *in-situ* y compuestos y elementos a medir por el laboratorio Quimicontrol.

Cuadro 2. Muestras para la medición de parámetros *in-situ* y compuestos y elementos a medir por el laboratorio Quimicontrol.

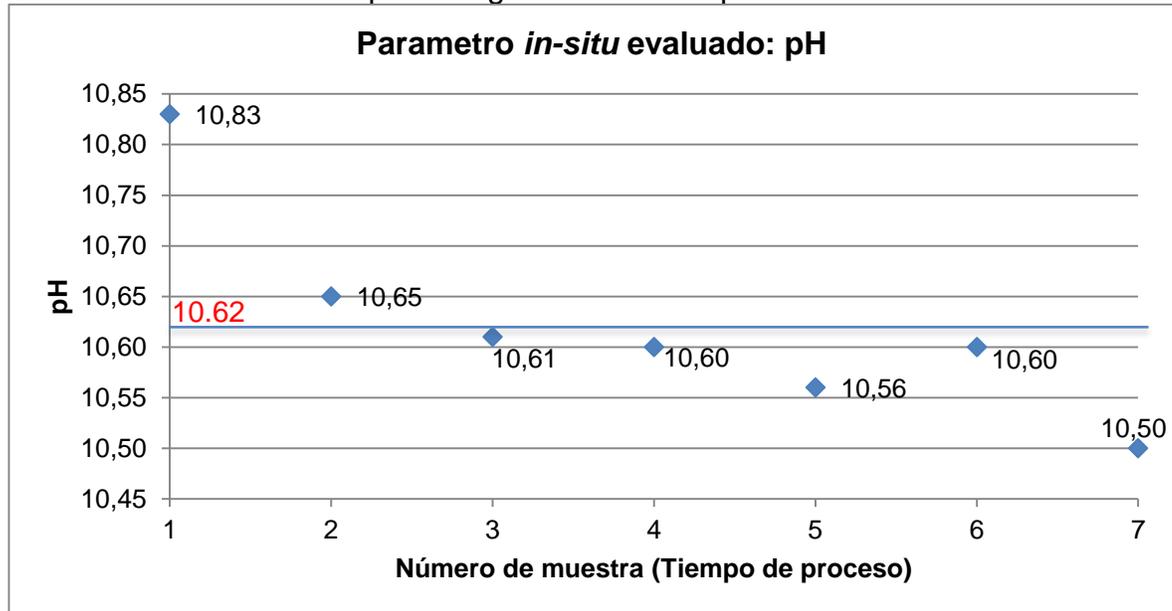
Número de muestra	Tiempo de proceso (hora)	Parámetro <i>in-situ</i>	Compuestos y elementos medidos por laboratorio Quimicontrol
1	0	Muestra simple	Muestra simple
2	2	Muestra simple	
3	4	Muestra simple	
4	6	Muestra simple	Muestra compuesta
5	8	Muestra simple	
6	10	Muestra simple	
7	12	Muestra simple	Muestra simple

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestra en la gráfica 2, 3 y 4 el comportamiento de los parámetros *in-situ*: el pH, la temperatura y el flujo volumétrico de agua residual del proceso de nitruración de las muestras que fueron tomadas cada dos horas. Cada gráfica se

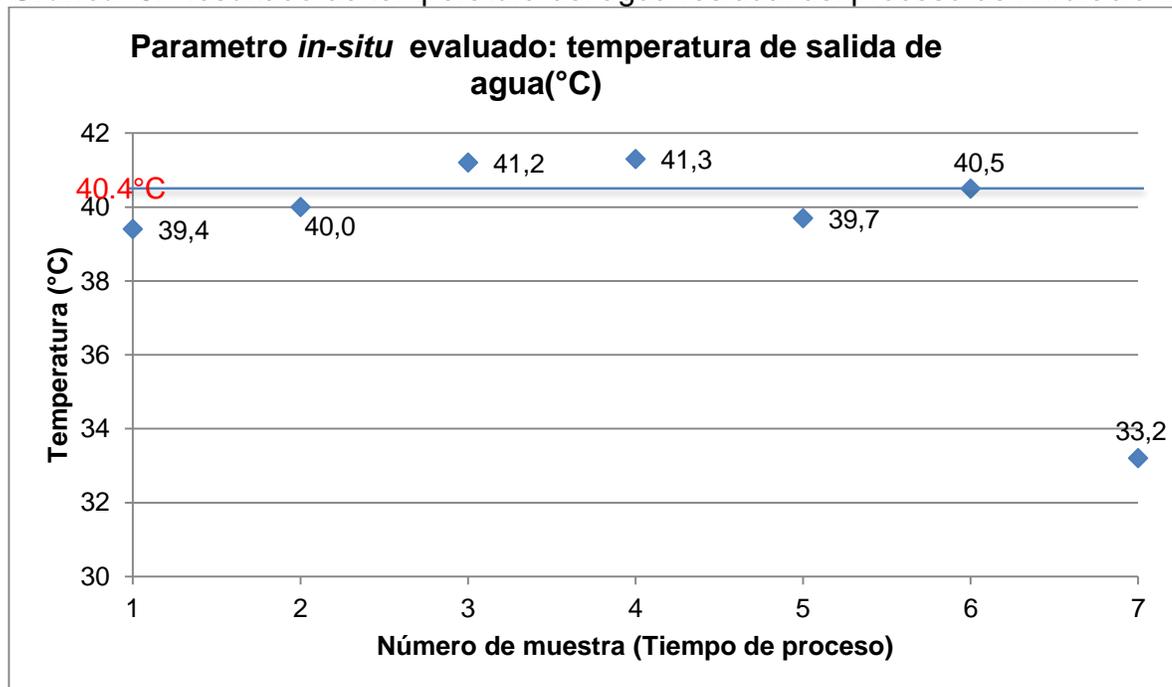
representa como una gráfica de dispersión, donde el eje “x” representa el número de muestra y el eje “y” el resultado del parámetro *in-situ* evaluado. En cada gráfica también se muestra el promedio del parámetro, su valor numérico se observa indicado en rojo y se representa con una línea continua en color azul.

Gráfica 2. Resultado de pH del agua residual del proceso de nitruración



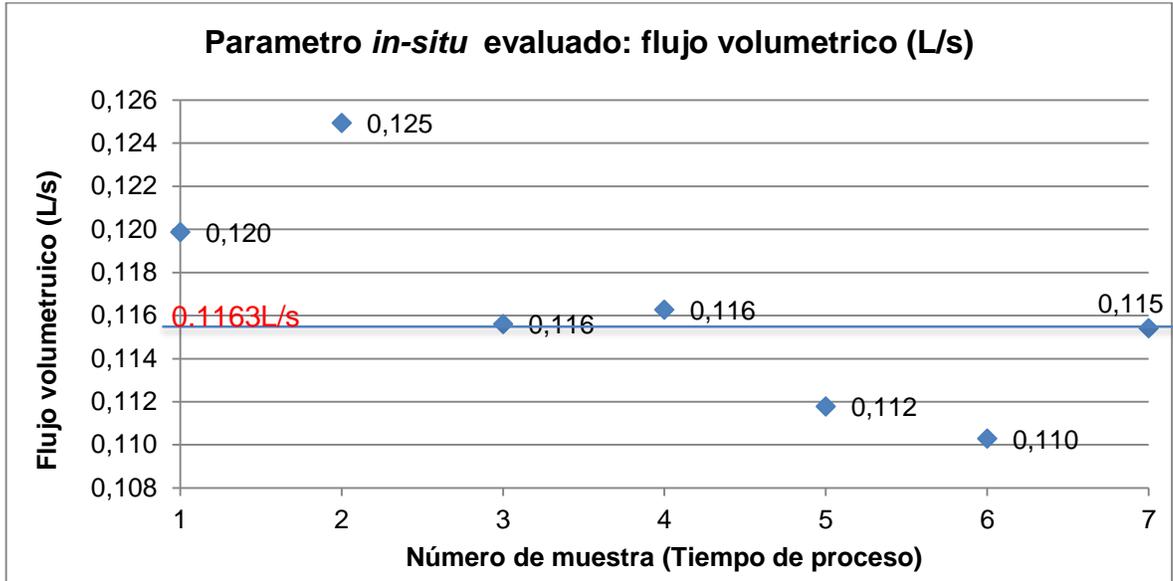
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3. Resultado de temperatura del agua residual del proceso de nitruración.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 4. Resultado de flujo volumétrico del agua residual del proceso de nitruración.



Fuente: Elaboración propia.

En seguida se realizaron las mediciones de los parámetros *in-situ* y se tomaron las muestras correspondientes, el investigador las lleva personalmente a la sede del laboratorio principal ubicada en la ciudad de Bogotá (día 28 de Marzo del 2018). En ella se hace la entrega del formato de custodia de las muestra al laboratorio.

2.6.4 Caracterización del agua residual de nitruración. Revisando los resultados representados en las gráficas 2, 3 y 4, se observa que los valores de los parámetros *in-situ* se mantienen constantes durante el tiempo de proceso.

En la gráfica 2, representando el pH del agua residual, se identifica que al iniciar el proceso de nitruración, es decir, al promover la alimentación de amoniaco en el sistema, se presenta el valor más alto de pH que corresponde a 10.83 (muestra simple inicio), el pH se estabiliza en valores entre 10.56 y 10.65 durante el desarrollo del proceso, variación baja. Finalmente, al detener la alimentación de amoniaco, el pH del agua empieza a descender por la misma ausencia de amoniaco en el sistema, así fue como la muestra tomada instantes después de la desactivación de amoniaco obtuvo un valor de pH de 10.50 (muestra simple final), pH menor a los anteriormente registrados, de hecho, este valor desciende hasta el pH establecido del agua de acueducto al pasar las 5 horas de enfriamiento del proceso (pH de agua de acueducto fue medido a partir de un pHmetro y obtuvo un valor promedio de 8.29).

Por lo que confiere a la gráfica de la temperatura, se observa que no existe variación considerable entre los valores de temperatura medidos cada dos horas los cuales se encuentran entre 39.4°C a 41.2°C. Solamente el ultimo valor de temperatura cae drásticamente, que se debe a la desactivación de flujo de amoniaco, sumado a la desactivación de las resistencias de calentamiento del horno y a la activación de

ventilación por aire para efectuar el enfriamiento en el proceso (procedimiento que se encuentra estipulado dentro del protocolo de nitruración).

En cuanto a los resultados de flujo volumétrico (gráfica 4), también se obtienen resultados muy próximos entre sí en todas las muestras, obteniendo valores entre 0.11 y 0.12L/s, donde las diferencias entre los flujos volumétricos se encuentran en el tercer decimal descrito, un decimal que es incierto. Esta cercanía entre los datos, permitió obtener una muestra compuesta homogénea, combinando las muestras individuales de agua # 2, 3, 4, 5 y 6 a partir de volúmenes iguales para desarrollar la muestra compuesta para el análisis de compuestos de interés por el laboratorio.

Para concluir el análisis de los parámetros *in-situ*, se demuestra que el pH así como la temperatura de salida del agua residual del proceso de nitruración, no están cumpliendo la normativa vigente expresada en la Resolución 0631 del 2015 en la cual indican que el pH debe ser menor a 9 y la temperatura no puede superar los 40°C¹²⁷ en vertimientos puntuales al alcantarillado, valores que en el caso de estudio se encuentran en promedio en 10.62 y 40.4°C respectivamente.

Ahora se consideran los resultados de análisis de los compuestos de interés (nitrógeno amoniacal, nitratos, nitritos, hierro y cromo) desarrollados por el laboratorio Quimicontrol los cuales se resumen en la tabla 1. En el anexo H se muestra el informe de resultados de muestras del laboratorio.

Tabla 1. Resultados de análisis 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: Elaboración propia.

En la Resolución 0631 del 2015 se indica que los valores límites máximos permisibles para los metales Hierro y Cromo en vertimientos puntuales de aguas residuales no domesticas al alcantarillado público (artículo 15 y 16) corresponden a 1mg/L y 0.10mg/L¹²⁸ respectivamente, de donde resulta que las concentraciones obtenidas cumple con estos dos parámetros al presentar resultados inferiores.

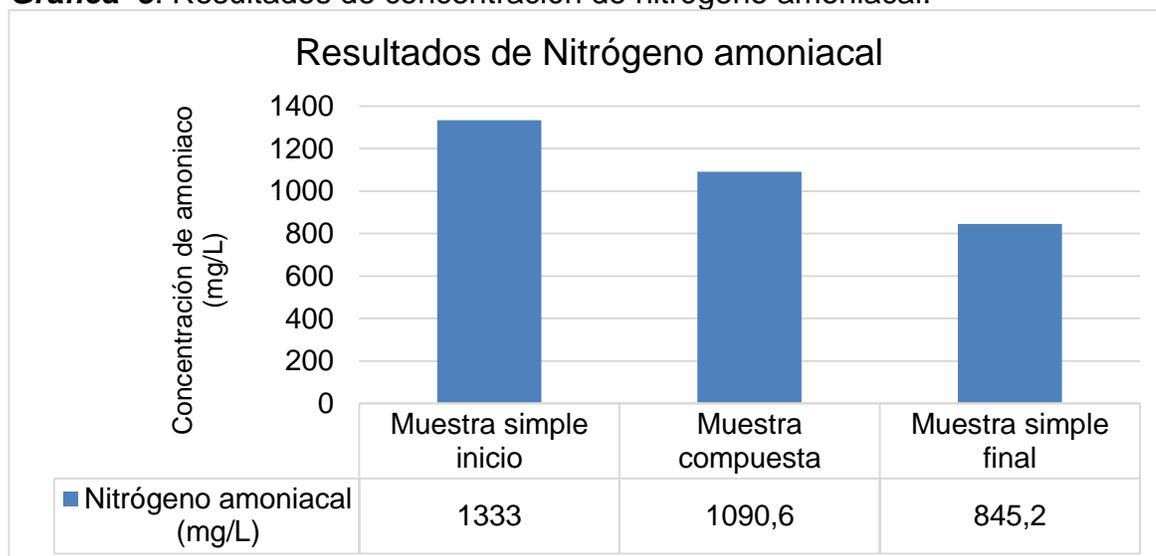
¹²⁷ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 063. 17 de Marzo del 2015.

¹²⁸ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631.17 de Marzo del 2015.

En cuanto a los nitratos, nitritos y nitrógeno amoniacal, la Resolución 0631 del 2015 indican que se debe realizar análisis y reporte de los datos obtenidos, es decir, la Resolución no indica un valor numérico para ninguno de estos tres parámetros. Sin embargo, es de reconocer por los datos alcanzados, que la concentración de nitratos y nitritos en el agua residual de nitruración pueden ser considerados como trazas, mientras que la concentración de amoniaco tiene un carácter considerable.

La concentración de amoniaco obtenida en el agua residual puede generar por exposición daños ya sea por contacto con los ojos, donde actúa de forma corrosiva sobre las mucosas oculares, generando enrojecimiento, lagrimeo, visión borrosa, quemaduras e incluso ceguera; por contacto con la piel, causa graves quemaduras cutáneas; por inhalación, es irritante con las mucosas; y por ingestión, produce lesiones graves en la mucosa bucal, garganta y tracto digestivo acompañada con intolerancia gástrica y sabor acre¹²⁹. Además, puede generar la proliferación de algas y disminución de oxígeno en los medios acuáticos, lo cual en altas concentraciones concibe en la intoxicación a los seres vivos presentes en un ecosistema por exposición (véase más información del amoniaco en la sección 1.1), de aquí radica la importancia de limitar los contenidos de amoniaco en el agua. Los resultados correspondientes al nitrógeno amoniacal se muestran en la gráfica 5 como gráfica de barras.

Gráfica 5. Resultados de concentración de nitrógeno amoniacal.



Fuente: Elaboración propia.

Nota: la representación de muestra simple inicio, muestra compuesta y muestra simple final se muestran en el cuadro 2.

Es importante indicar que la concentración de amoniaco tiene una relación con el pH, de tal manera que amoniaco gaseoso en un medio acuoso promueve el

¹²⁹ VIO, Juan. Guía de uso y manejo de amoniaco en la refrigeración de frutas y hortalizas frescas: plan de emergencias. Asociación de exportadores de fruta de Chile, 2012.

aumento del pH del agua. Esto se ve reflejado al comparar los resultados de la gráfica 2 con los resultados de la gráfica 5, donde el mayor valor de la concentración de amoníaco y de pH se precisa en la muestra simple inicio (muestra #1) y el menor valor se encuentra justo en la muestra simple final (muestra # 7).

Por otra parte, debido a que la nitruración consiste en el calentamiento de horno, sostenimiento de temperatura objetivo y enfriamiento, en el cual en la segunda etapa se presenta la alimentación de amoníaco, se comprueba, así como sucedió con el análisis de pH, que durante el proceso de alimentación de amoníaco se presenta la mayor disolución del gas amoníaco al sistema de agua, esta concentración se estabiliza conforme el proceso avanza y comienza a disminuir paulatinamente finalizando el proceso.

En definitiva, los resultados de los parámetros evaluados *in-situ*, así como los parámetros medidos por el laboratorio, dan como perspectiva la necesidad de desarrollar una propuesta para el tratamiento del agua residual para el proceso de nitruración, que apruebe la eliminación de nitrógeno amoniacal sobre el agua residual, acompañado con una disminución de pH y de temperatura para el correcto cumplimiento de la normativa ambiental trabajada.

3. MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

En el siguiente capítulo se selecciona una alternativa para el tratamiento de agua residual del proceso de nitruración a partir del desarrollo de una matriz de selección, para ello inicialmente se menciona y justifica la técnica utilizada para la evaluación de las alternativas, en seguida se definen los criterios a evaluar y se mencionan las alternativas disponibles y finalmente se realiza la evaluación correspondiente.

3.1 TÉCNICAS PARA LA TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO

Se consultaron diversas técnicas de toma de decisiones multicriterio para la selección de alternativas, entre estas se destaca PUGH, sumas ponderadas, ELECTRE y matriz de prioridades, las cuales se describen en el numeral 1.4, estas técnicas permiten identificar la mejor alternativa y determinar el orden de la mejor a la peor de las alternativas con base a la evaluación de diversos criterios.

Según varios estudios que se han desarrollado, al comparar las diferentes técnicas de análisis multicriterio aplicadas a la gestión del recurso hídrico, se encuentra que no hay una ventaja metodológica clara en el análisis de un problema para ninguna de las técnicas, donde el aspecto más importante es la selección de los criterios y las alternativas^{130,131}. Es por ello que la técnica utilizada en este trabajo, no tiene una justificación directa con respecto a las demás en relación a sus beneficios, sino a la facilidad de desarrollo matemático, esta técnica es el método de sumas ponderadas. Además, es importante aclarar que sin importar el método de selección utilizado, lo fundamental es la selección de los criterios adecuados y la recopilación de información relevante y de confianza de cada una de las alternativas la cual se muestra en la sección 1.5.

3.2 ALTERNATIVAS Y CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Se realizó revisión bibliográfica de las alternativas disponibles para la eliminación de amoníaco en agua residual, problema principal emitido en el capítulo anterior donde se caracterizó el agua residual del proceso de nitruración, estas alternativas se mencionan a continuación pero su descripción se observa en el numeral 1.5:

1. Extracción de amoníaco por arrastre de aire
2. Tratamiento electroquímico de amoníaco en aguas residuales
3. Nitrificación y desnitrificación
4. Eliminación de amoníaco disuelto en aguas residual a través de membranas
5. Precipitación por estruvita
6. Intercambio iónico

¹³⁰ PERPIÑAN, Adrián Augusto. Metodología para la evaluación y selección de alternativas de aprovechamiento, ahorro y uso eficiente del agua en el sector institucional. Universidad Nacional de Colombia, 2013. p. 127-133.

¹³¹ MONTALVÁN ESTRADA I, Adelmo, et al. Análisis multicriterio para la gestión integrada de aguas residuales industriales. En: INGENIERÍA INDUSTRIAL. pag. 56-67

7. Destilación al vacío
8. Adsorción de amoníaco en carbón vegetal
9. Cloración de punto de interrupción

A partir de la revisión bibliográfica se obtuvo un panorama general en relación a aspectos técnicos, económicos y ambientales sobre cada una de estas alternativas. En donde la alternativa a seleccionar tendrá que cumplir con los cinco objetivos estratégicos de la empresa enfocados a la sostenibilidad los cuales son: salud y seguridad, calidad, costos, medio ambiente y responsabilidad social. En otras palabras, hacer más en menos tiempo, con la mejor calidad, al más bajo costo y de forma segura. Teniendo en cuenta estos cinco pilares, se disgregaron nueve criterios para evaluar las alternativas, estos son:

1. Etapas de proceso: número de etapas de proceso, su relación con el tiempo y la necesidad de control e instrumentación en cada una de estas.
2. Productos químicos: productos químicos, biológicos y/o microbiológicos necesarios y reacciones químicas involucradas.
3. Productos finales: productos finales para la venta, su precio en el comercio actual y su demanda.
4. Reutilización del agua: capacidad para incorporar el agua final luego del tratamiento de agua residual dentro del mismo proceso de nitruración.
5. Consumo de energía: consumo de energía eléctrica y/o de gas.
6. Eliminación de amoníaco: capacidad de eliminación de amoníaco.
7. Seguridad industrial: factores de riesgo emitidos durante el desarrollo del tratamiento de agua residual.
8. Mantenimiento: actividades necesarias para mantener y reparar la unidad funcional de forma que esta pueda cumplir sus objetivos. Acciones de inspección, comprobación, clasificación, reparación, etc.
9. Subproductos: subproductos que requieren procesos complementarios para su eliminación con el fin de ejecutar la descargada del vertimiento de agua o su reutilización dentro del proceso.

Es importante indicar que para la empresa, los criterios mencionados tienen diferentes pesos de importancia, de esta manera, se solicitó al gerente estratégico y de operaciones, Juan Diego Valencia, evaluar cada uno de los criterios comparándolos entre pares a partir del método de calificación que se muestra en la cuadro 3.

Cuadro 3. Método de calificación de criterios para evaluación de alternativas.

Calificación	Significado
10	Mucho más importante
5	Más importante
1	Igual
0.2	Menos importante
0.1	Mucho menos importante

Fuente: Elaboración propia.

Al obtener las correspondientes valoraciones (véase tabla 2), se procede a calcular los pesos ponderados de cada uno mediante método matemático, que consiste en sumar el resultado de la evaluación de cada criterio, por ejemplo, el criterio # 1 (1, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 1, 1, 1) permite obtener un valor individual de 4.80, y dividir este resultado entre la suma global de todos los criterios, en este caso, 152.10 lo que permite obtener un resultado de 0.032 (3.2%) para el primer criterio.

Tabla 2. Valoración de criterios para evaluación de alternativas.

	Número de criterio									Suma individual	Peso ponderado
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Número de criterio	1	1	0.2	0.2	0.2	0.2	1	1	1	4.80	0.032
	2	1	1	0.2	1	0.2	0.2	0.2	0.2	4.00	0.026
	3	5	1	1	1	0.2	0.2	1	5	14.40	0.095
	4	5	5	1	1	1	5	5	1	24.00	0.158
	5	5	1	1	5	1	5	5	10	33.00	0.217
	6	5	5	5	1	1	5	5	1	28.00	0.184
	7	1	5	5	0.2	0.2	0.2	1	0.2	12.80	0.084
	8	1	5	1	0.2	0.2	0.2	1	0.2	8.80	0.058
	9	5	5	0.2	1	0.1	1	5	5	22.30	0.147
										Suma global: 152.10	Suma total : 1.000

Fuente: Elaboración propia.

Al observar los pesos ponderados emitidos en la tabla 2 se comprueba que el criterio # 5, correspondiente a “consumo de energía” es el criterio más importante con un peso de 0.217, mientras que “productos químicos” (criterio # 2), es el de menos importancia con un peso de 0.026. A continuación se muestra de manera organizada los criterios según el peso ponderado obtenido (tabla 3).

Tabla 3. Jerarquía por importancia de criterios para evaluación de alternativas.

Numero	Criterio	Peso
5	Consumo de energía	0.217
6	Eliminación de amoniaco	0.184
4	Reutilización del agua	0.158
9	Subproductos	0.147
3	Productos finales	0.095
7	Seguridad industrial	0.084
8	Mantenimiento	0.058
1	Etapas de proceso	0.032
2	Productos químicos	0.026

Fuente: Elaboración propia.

Luego de especificar la importancia de cada criterio, es necesario definir la escala de calificación para cada uno de estos, escala que debe permitir evaluar de manera objetiva las alternativas. Así, cada criterio se evaluó mediante un número del uno (1) al cinco (5), donde la mejor valoración se representa con el cinco (5 = calificación

excelente) y el uno representa la menor puntuación (1 = calificación deficiente). Es importante indicar que en algunos criterios se evaluará desde cero (0), valor que indica que no existe una evidencia ni aporte apropiado en dicho criterio. A continuación, se muestra la definición de esta escala para cada criterio (tabla 4).

Tabla 4. Definición de escala de evaluación por criterio.

Etapas de proceso		Productos químicos		Productos finales	
1	Cinco o más etapas	1	Extremadamente costoso	0	Producto sin utilidad
2	Cuatro etapas	2	Costo alto	1	Muy económico
3	Tres etapas	3	Costo moderado	2	Económico
4	Dos etapas	4	Económico	3	Moderado
5	Una etapa	5	Muy económico	4	Costo alto
				5	Extremadamente costoso

Reutilización del agua		Consumo de energía		Eliminación de amoníaco	
0	Imposibilidad de enfriamiento de agua para reintegración en la operación	1	Muy bajo	1	< 50mg/L
1	-	2	Bajo	2	<100mg/L
2	-	3	Moderado	3	<500mg/L
3	Enfriamiento parcial del agua	4	Alto	4	<1000mg/L
4	-	5	Muy alto	5	> 1000mg/L
5	Adecuado enfriamiento de agua				

Seguridad industrial		Mantenimiento		Subproductos	
1	Muy peligroso	1	Muy alto	1	Tres o más subproductos por reacción química
2	Peligroso	2	Alto	2	Dos subproductos por reacción química
3	Intermedio	3	Moderado	3	Un subproducto por reacción química
4	Poco peligroso	4	Bajo	4	Subproductos por exceso de reactivos.
5	Sin riesgo	5	Muy bajo	5	No hay subproductos

Fuente: Elaboración propia.

3.3 MATRIZ DE SELECCIÓN

Finalmente, se procede a evaluar cada alternativa con base a la escala de puntuación anteriormente descrita sobre la matriz de selección como se muestra en la tabla 5. La recopilación de información de cada alternativa que describe cada uno de estos parámetros evaluados se muestra en la sección 1.5. El resultado de cada alternativa corresponde a la suma del producto entre la puntuación de cada criterio por su correspondiente peso ponderado tal como se describió en el numeral 1.4.2. Como ejemplo se muestra el cálculo obtenido de la alternativa # 1:

$$\begin{aligned} \text{Resultado} = & (0.0316 \times 3) + (0.0263 \times 4) + (0.09447 \times 3) + (0.1578 \times 5) \\ & + (0.2170 \times 3) + (0.1841 \times 4) + (0.0842 \times 4) + (0.0579 \times 4) \\ & + (0.1466 \times 5) \end{aligned}$$

$$\text{Resultado} = 3.9612$$

Tabla 5. Matriz de selección de alternativas: SUMAS PONDERADAS

No.	Método de tratamiento de agua	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Resultado
1	Extracción de amoniaco por arrastre de aire	3	4	3	5	3	4	4	4	5	3.9612
2	Tratamiento electroquímico de amoniaco en aguas residuales	3	4	1	0	2	2	2	3	3	1.8784
3	Nitrificación y desnitrificación.	2	2	0	0	3	3	3	4	3	2.2426
4	Eliminación de amoniaco disuelto en aguas residuales a través membranas	4	4	3	3	4	4	4	4	5	3.8941
5	Precipitación por estruvita	4	2	5	0	5	3	4	5	5	3.6483
6	Intercambio iónico	4	3	3	0	4	3	4	3	4	3.0059
7	Destilación a vacío de amoniaco	4	4	3	3	3	5	4	3	5	3.8034
8	Adsorción de amoniaco en carbón vegetal	3	4	1	0	5	2	3	5	3	2.7291
9	Cloración de punto de interrupción	2	2	1	0	5	2	3	5	2	2.4984

Fuente Elaboración propia.

En la tabla 6 se observa la lista de la mejor a la peor alternativa según el método seleccionado. En este cuadro se observa que el método menos apropiado es el "Tratamiento electroquímico de amoniaco en aguas residuales", mientras que el más apropiado para desarrollar el tratamiento de agua residual en el proceso de nitruración corresponde a "**Extracción de amoniaco por arrastre de aire**", método que será evaluado y estudiado en el siguiente capítulo.

Tabla 6. Listado de alternativas por puntuación.

No.	Alternativas	Puntaje
1	Extracción de amoníaco por arrastre de aire	3.9612
4	Eliminación de amoníaco disuelto en aguas residuales a través de membranas	3.8941
7	Destilación a vacío de amoníaco	3.8034
5	Precipitación por estruvita	3.6483
6	Intercambio iónico	3.0059
8	Absorción de amoníaco en carbón vegetal	2.7291
9	Cloración de punto de interrupción	2.4984
3	Nitrificación y desnitrificación.	2.2426
2	Tratamiento electroquímico de amoníaco en aguas residuales	1.8784

Fuente: Elaboración propia.

Las ventajas que ofrece la “**Extracción de amoníaco por arrastre de aire**” corresponden a¹³²:

- Ser una operación sencilla.
- No verse afectada por fluctuaciones del agua residual si el pH y la temperatura del aire se mantienen estables.
- No producir retrolavados o materiales regenerados.
- No verse afectada por compuestos tóxicos.
- Permitir la remoción selectiva del amoníaco.

La empresa cuenta con las facilidades para plantear su implementación al contar con un sistema de aire comprimido que puede ser el precursor del aire utilizado para el proceso, así como contar con un equipo multidisciplinar el cual puede desarrollar su diseño, fabricación y ejecución, es por las ventajas y facilidades de la empresa que se ha seleccionado este método para solucionar el problema de estudio.

¹³² DE SILVA, Frank. Folletos Informativos de Tecnología de Aguas Residuales de la EPA: Extracción de Amoníaco por Arrastre de Aire. [Consultado el 09/04/2018]. Disponible en: <https://www.estrucplan.com.ar/Producciones/imprimir.asp?IdEntrega=1875>

4. EXTRACCIÓN DE AMONIACO POR ARRASTRE DE AIRE

En el siguiente capítulo se comparan teórica y experimentalmente dos diseños de extracción de amoniaco, (1) torre de desorción empacada con anillos Pall y (2) torre de desorción a partir de microburbujeo de aire, con el fin de evaluar la eficiencia de remoción de amoniaco del agua residual del proceso de nitruración en cada uno y definir la mejor opción.

Para ello se describe conceptualmente los diseños, se detalla el protocolo de experimentación y el plan de muestreo para realizar, se relata la ejecución del experimento y el muestreo de agua residual, se muestran los resultados obtenidos y se desarrolla su correspondiente análisis.

4.1 SELECCIÓN DEL TIPO DE DISEÑO DE EXTRACCIÓN DE AMONIACO A EVALUAR

Como se observó en el numeral 1.6, existen diferentes diseños para la extracción de amoniaco por arrastre de aire tal como se muestra en la figura 3.

Figura 3. Diseños para la extracción de amoniaco por arrastre de aire.



Fuente: Elaboración propia.

Es evidente en la consulta bibliografía que la torre empacada permite obtener mejores resultados que el sistema de aireación de burbujas por lotes, la torre de platos y el sistema de pulverización debido a que^{133, 134}:

¹³³ GEANKOPLIS, Christie John. Procesos de transporte y principios de procesos de separación. 4th ed. CECSA, 669-704 p.

¹³⁴ CHILET, Andrés and ESTRELA, Vania. Comparación entre columnas de platos y columnas de relleno. [0]: Lima, Perú: Universidad Nacional del Callao.

- El funcionamiento del relleno establece una gran superficie de contacto entre el gas y el líquido favoreciendo el íntimo contacto entre las fases.
- Presenta un menor dimensionamiento (altura y diámetro) para los mismos resultados.
- Presenta una caída de presión de gas menor por unidad de altura.
- Permite trabajar con valores altos de relación gas – líquido.
- Obtiene menores problemas de corrosión, por ello se prefiere cuando se involucran ácidos o materiales fuertemente alcalinos.

Es importante indicar que dentro de las torres empacadas, el uso del empaque de anillo de Pall, cilindro con paredes ranuradas y lenguas o costillas internas, resalta por sus características, por ejemplo, tiene un espacio libre disponible 80% mayor comparados con un relleno Raschig y 40% mayor comparados con un relleno tipo “montura”, una caída de presión que está por debajo en un 70% y un 50% respectivamente, y una eficiencia mayor de por lo menos 45% y 20% respectivamente¹³⁵. El anillo de Pall, aunque no es un empaque moderno, resalta por su eficiencia, la cual aún es comparable con empaques de tercera generación que presentan una eficiencia mayor. Además, el anillo de Pall es un empaque fácilmente asequible, existiendo gran cantidad de empresas que lo fabrican y comercializan, en comparación con los de tercera generación, los cuales son limitados dentro del mercado, es por ello que se selecciona este empaque como relleno para el diseño de torre empacada estipulado.

Adicionalmente dentro de la categoría de los anillos de Pall, el material de polipropileno es el más utilizado, ya que comparado con los anillos cerámicos no desprende polvillo y requieren un décimo de tiempo y costo para instalar, además, tiene una alta resistencia a agentes químicos como soluciones acuosas y todas las bases y ácidos inorgánicos comparado con los anillos metálicos, sin contar que la adsorción de agua del polipropileno es mínima en un orden del 0.2%, todas estas características lo catalogan como uno de los mejores¹³⁶.

Se debe agregar que la consulta de artículos y documentos de investigación, permitieron descubrir además de los métodos mencionados, un método el cual ofrece resultados prometedores en relación a la eliminación de amoníaco en agua, este método es el uso de microburbujas, el cual permite intensificar la transferencia de masa con un consumo de energía mínimo¹³⁷. Las burbujas extremadamente pequeñas presentan un mayor tiempo de residencia en el medio líquido ya que tienen una velocidad de deslizamiento más bajas y un menor efecto sobre la fuerza de flotación, además, tienen un área de superficie más amplia por unidad de

¹³⁵ Besora. Anillo tipo Pall: Relleno para torres. [1]:Río Tercero, Córdoba, Argentina:

¹³⁶ Besora. Anillo tipo Pall: Relleno para torres. [1]:Río Tercero, Córdoba, Argentina:

¹³⁷ WANG,Hongqiang & ZHANG,Lieyu. Research on the nitrogen removal efficiency and mechanism of deep subsurface wastewater infiltration systems by fine bubble aeration. En: ECOLOGICAL ENGINEERING. vol. 107, p. 33-40

volumen, aspectos que permite tener un óptimo contacto entre el gas y el líquido^{138, 139, 140}.

Lo anterior descrito muestra que el sistema de microburbujeo es una oportunidad de proceso para aumentar la eficiencia de extracción de amoniaco en relación a la eficiencia obtenida en una torre empacada, de donde resulta la necesidad de evaluar y comparar experimentalmente la torre empacada con anillo de Pall y la torre por microburbujeo en una torre inundada, para identificar la mejor opción en relación a la eficiencia obtenida.

4.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

A continuación se plantea el protocolo de experimentación el cual permitirá evaluar los diseños de extracción de amoniaco, (1) torre de desorción empacada con anillos Pall y (2) torre de desorción a partir de microburbujeo de aire.

La experimentación a desarrollar tiene como objetivo identificar el método de torre de desorción, (1) torre de desorción empacada con anillos de Pall o (2) torre de desorción a partir de microburbujeo de aire, de mayor eficiencia en la eliminación de amoniaco de agua residual del proceso de nitruración, mediante la evaluación de diferentes relaciones de flujo volumétrico de aire y agua en dos procesos de nitruración.

4.2.1 Descripción de prototipo de torre de desorción. Se construye un prototipo de torre de desorción para evaluar los métodos de extracción de amoniaco mencionados. El prototipo tiene 50cm de alto, un diámetro de 15cm y un espesor de pared de 4mm y está fabricado en acrílico transparente con el fin de identificar el interior de la torre durante el proceso.

La columna cilíndrica desarrollada contiene una entrada de gas en la parte inferior, un espacio de distribución de líquido en el fondo, una entrada de líquido con distribución de este en la parte superior, una salida de gas en la parte superior y una salida de líquido en el fondo. Además, según sea el caso, la columna cuenta con la distribución aleatoria de los empaques de Pall y un difusor que distribuye el aire, o cuenta con el equipo de generación de microburbujas. En la figura 4 se muestra un esquema ilustrativo de la torre de desorción donde se especifican las

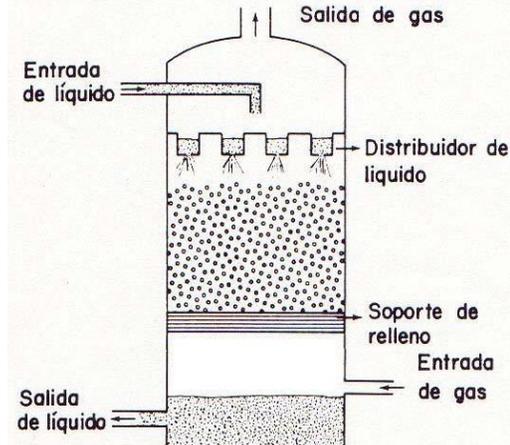
¹³⁸ PARMAR, Rajeev & MAJUMDER, Subrata Kumar. Microbubble generation and microbubble aided transport process intensification—A state of the art report. En: CHEMICAL ENGINEERING AND PROCESSING: PROCESS INTENSIFICATION. p. 79-97

¹³⁹ ZHENG, Tianlong, et al. Microbubble enhanced ozonation process for advanced treatment of wastewater produced in acrylic fiber manufacturing industry. En: JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS. vol. 287, p. 412-420

¹⁴⁰ JABESA, Abdisa & GHOSH, Pallab. Removal of diethyl phthalate from water by ozone microbubbles in a pilot plant. En: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT. vol. 180, p. 476-484.

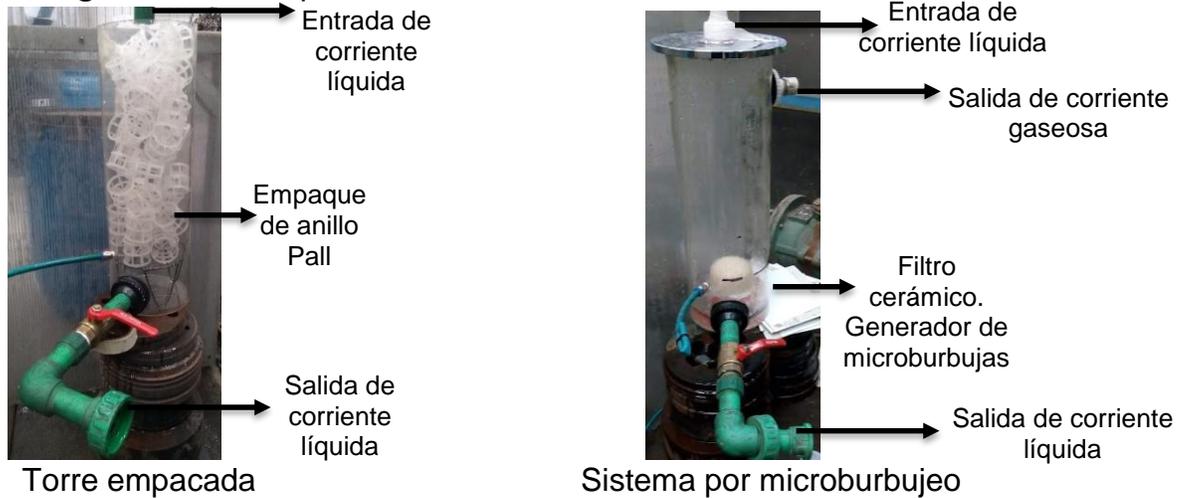
corrientes, mientras que en la fotografía 2 se encuentra una imagen del prototipo diseñado.

Figura 4. Esquema ilustrativo de prototipo de la torre de desorción diseñada.



Fuente: Del libro *“Absorción”* de Antonio Valiente de la Universidad Nacional Autónoma de México. Año 2010. pag.11

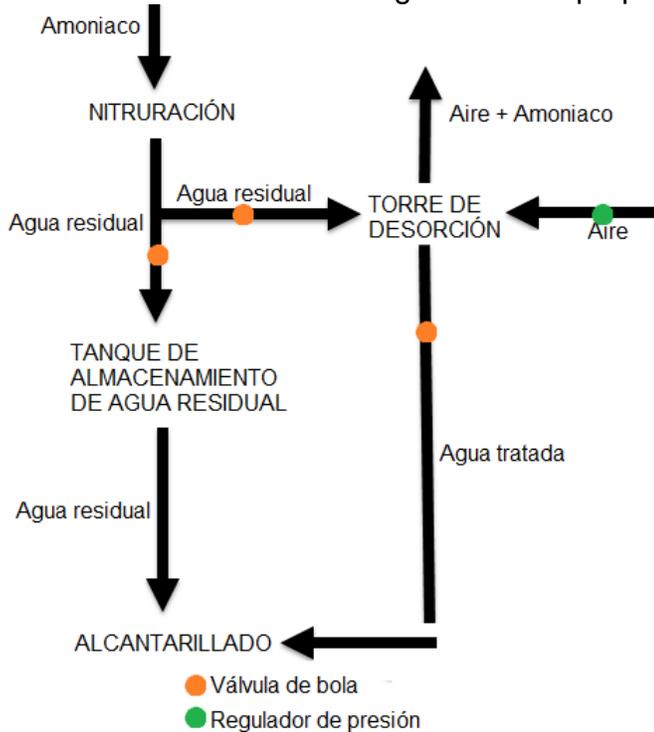
Fotografía 2. Prototipo de torre de desorción construida.



Fuente: Elaboración propia.

Hay que mencionar que la evaluación del prototipo se desarrolló frente al vertimiento del agua residual en el proceso de nitruración, de esta manera, fue necesario instalar en el sistema de agua residual del proceso una salida adicional del agua residual directa al prototipo. Esto se desarrolló mediante la instalación de un recorrido adicional de tubería y el uso de válvulas para controlar la dirección del agua residual y su flujo, ya sea, directamente al alcantarillado o en su defecto, ingresara al prototipo de torre de desorción diseñado, como se muestra en la figura 5.

Figura 5. Proceso de nitruración y su vertimiento de agua residual junto al sistema de tratamiento de agua residual propuesto (prototipo).



Fuente: Elaboración propia.

Cabe señalar que los anillos de Pall utilizados para la torre empacada están fabricados 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 $38\text{cm}^2/\text{cm}^3$, lo que permite un empaque de 37 anillos de Pall sobre el prototipo diseñado (número de empaques totales distribuidos en el volumen disponible de la columna). En la fotografía 3, se muestra la representación de un anillo de Pall utilizado, mientras tanto en el anexo I se muestra la ficha técnica de estos rellenos, los cuales fueron adquiridos a partir de la empresa Cerfibras S.A.S.

Fotografía 3. Fotografía de anillo de Pall utilizado



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al difusor de aire de la torre empacada, corresponde a una manguera flexible con pequeños orificios sobre su superficie, los cuales permiten la generación de burbujas de tamaño convencional. Este difusor tiene una longitud de 21cm y fue

ubicada en forma de espiral en el fondo de la torre con el fin de distribuir eficientemente las burbujas sobre toda el área de sección trasversal de la columna cilíndrica, en la fotografía 4 se muestra este dispositivo.

Fotografía 4. Fotografía de difusor de aire utilizada en la torre empacada.

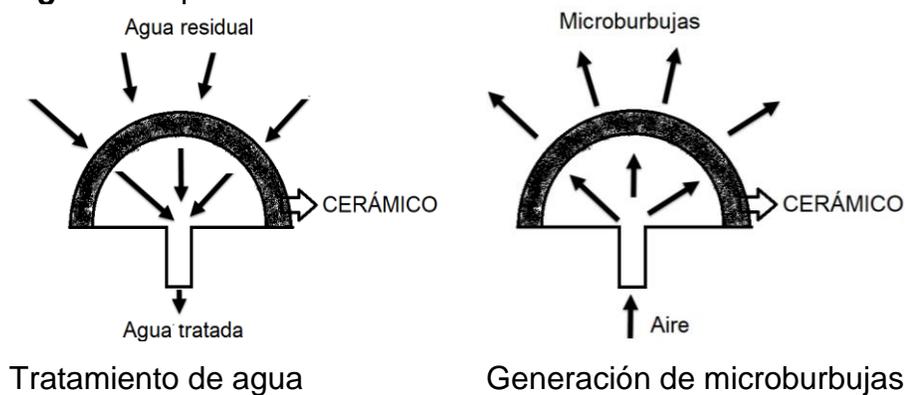


Fuente: Tomada de amazon.es.

Por otro lado, el equipo de microburbujeo para el diseño de torre por microburbujeo de aire, corresponde a un filtro cerámico. Hay que mencionar que un filtro cerámico comercialmente es ofrecido como una alternativa para la potabilización de agua, donde el agua pasa del exterior al interior del cartucho, y se recoge tratada en la parte inferior, proceso basado en la microfiltración, en el cual el umbral de paso de agua sobre el cartucho varía entre 0.1 y 0.2 micras, creando una barrera que retiene impurezas en suspensión, así como bacterias y parásitos, obteniendo agua adecuada para el consumo humano.

Sin embargo, en el experimento a desarrollar, se aprovecha la porosidad del cerámico y se promueve la generación de microburbujas, en donde se ingresa una corriente de aire en la parte inferior del cartucho y se obtiene del interior al exterior de la carcasa las correspondientes microburbujas. En la figura 6 se muestra una representación gráfica del diseño conceptual normal del filtro cerámico y el diseño conceptual definido para la experimentación.

Figura 6. Aplicaciones de un filtro cerámico



Tratamiento de agua

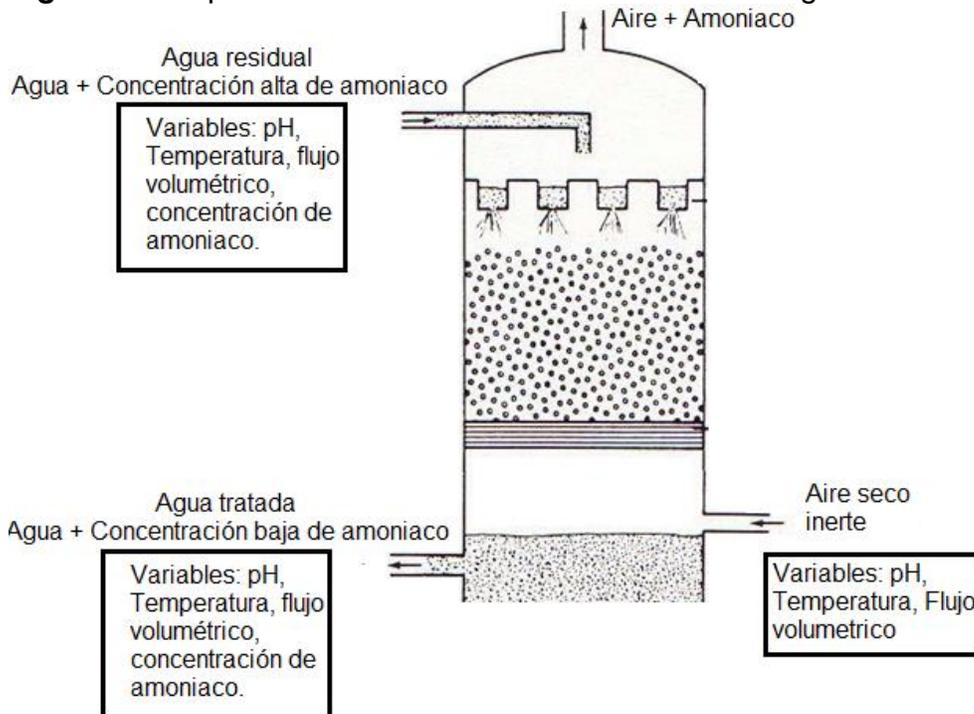
Generación de microburbujas

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Compuestos en el proceso de desorción. Las sustancias que intervienen en el proceso de desorción estudiado corresponden al agua residual (agua y amoníaco) del proceso de nitruración el cual ingresa por la parte superior de la torre, y aire seco inerte el cual ingresa por la parte inferior de la torre y ha sido obtenido a partir de un compresor de 150 psi de capacidad y un sistema de secado adyacente.

Estas sustancias presentan un contacto directo en la torre que permitirán efectuar el fenómeno de transferencia de masa descrito en el numeral 1.2.1 y 1.3, donde como resultado se obtiene una corriente líquida al fondo de la torre que corresponde a agua teóricamente con una concentración de amoníaco menor a la corriente líquida de entrada, y una corriente gaseosa de salida en la parte superior de la torre definida como aire y amoníaco. En la figura 7 se muestra el esquema representativo de las sustancias que intervienen en el proceso.

Figura 7. Esquema de torre de desorción del sistema agua – amoníaco - aire



Fuente: Elaboración propia con base a imagen del libro “Absorción” de Antonio Valiente de la Universidad Nacional Autónoma de México. Año 2010. pag.11.

4.2.3 Variables en el proceso de desorción. A continuación se describen las variables del proceso de desorción definiendo el rol de cada una dentro del experimento a desarrollar.

- pH, temperatura y concentración de amoníaco del agua residual: son parámetros fijos constantes, es decir, parámetros no alterables por el investigador y emitidas directamente por el desarrollo del proceso de nitruración, es importante recordar que fueron medidos y evaluados en el capítulo 2.

- pH y temperatura del aire: son parámetros constantes, esto debido en los ductos que transporta el aire hasta su llegada al prototipo de la torre, no se presenta contacto con productos, materiales u otras especies que afecten estos dos ítems. Adicionalmente, la tubería por la que circula el aire cuenta con un recubrimiento especial para evitar la transferencia de calor y masa entre el aire y el medio circundante, lo cual impide por ejemplo el aumento o disminución de su humedad relativa.
- Flujo volumétrico de agua residual de entrada a la torre y flujo volumétrico de aire de entrada a la torre: son variables independientes, es decir, variables que puede modificar y seleccionar a voluntad el investigador. El flujo volumétrico del agua residual es controlado mediante las válvulas instaladas y puede tomar valores desde cero hasta el flujo máximo que emite el proceso de nitruración (0.1163L/s en promedio, valore indicado en la sección 2.6.3). En el caso del flujo volumétrico del aire, es controlado mediante un regulador de presión y cuenta con un rango desde cero hasta el punto de carga, punto donde el flujo de aire genera que el agua no pueda seguir fluyendo bajo gravedad y en su defecto, se expulse con el gas.
- Características físicas y químicas del agua de salida de la torre: el pH, la temperatura y la concentración de amoníaco de la corriente líquida de salida de la torre son variables dependientes de la relación de flujo volumétrico líquido - gas seleccionado.

En el cuadro 4, se resumen las variables que intervienen en el proceso de extracción de aire ya sea de entrada o salida, dependientes o independientes, sus rangos, sus niveles y el método de medición, mientras tanto en la figura 7, se identifica gráficamente las variables relacionándolas con cada corriente de proceso.

Cuadro 4. Resumen de variables de proceso de torre de desorción.

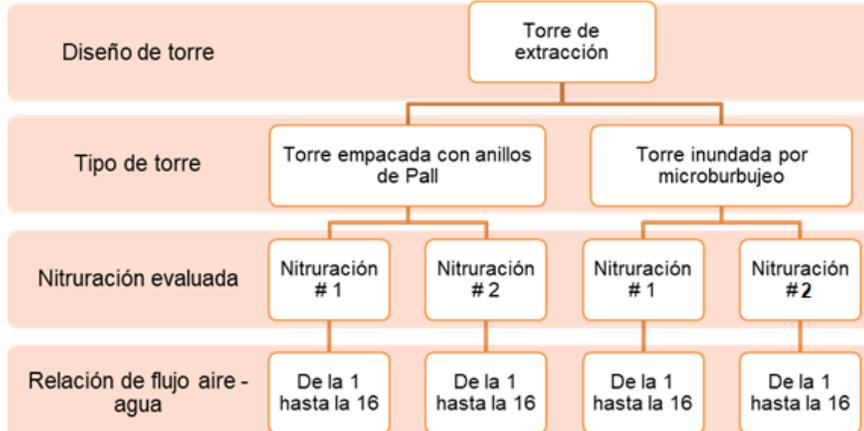
Corriente	Variable	Tipo de variable	Rango	Nivel	Método de medición
Agua residual	Temperatura	PC	Valor único constante	No aplica	No será tomada en cuenta en la experimentación
Agua residual	Concentración de amoníaco	PC	Valor único constante	No aplica	Destilación titulométrica (laboratorio)
Agua residual	pH	PC	Valor único constante	No aplica	pHmetro
Aire de entrada	pH	PC	Valor único constante	No aplica	No aplica
Aire de entrada	Temperatura	PC	Valor único constante	No aplica	Panel de control de compresor.
Agua residual	Flujo volumétrico	VI	0 – Flujo volumétrico máximo emitido por el proceso de nitruración	4	Tiempo medido por un volumen correspondiente
Aire de entrada	de aire	VI	0 – Flujo volumétrico en punto de inundación	4	Método de desplazamiento
Agua tratada	Concentración de amoníaco	VD	0 - Concentración de entrada de agua residual	No aplica	Destilación titulométrica (laboratorio)
Agua tratada	pH	VD	0 – pH de entrada de agua residual	No aplica	pHmetro
Agua tratada	Temperatura	VD	0 – Temperatura de entrada de agua residual	No aplica	No será tomada en cuenta en la experimentación

PC= Parámetro constante; VI = Variable independiente; VD = Variable dependiente
Fuente: Elaboración propia.

4.2.4 Protocolo de experimentación. La experimentación evalúa y compara los diseños de extracción de amoníaco, (1) torre de desorción empacada con anillos Pall y (2) torre de desorción a partir de microburbujeo de aire. Esta valoración se realiza al evaluar los dos diseños en dos procesos de nitruración. Además, se proponen 4 niveles para el manejo de las variables independientes: cuatro (4) flujos volumétricos de aire y cuatro (4) flujos volumétricos de agua, obteniendo 16

relaciones diferentes de flujo de aire – agua para cada diseño en cada nitruración. De esta manera se adquieren en total 64 eventos, la figura 8 muestra un esquema de la actividad experimental a desarrollar.

Figura 8. Descripción gráfica de experimentación.

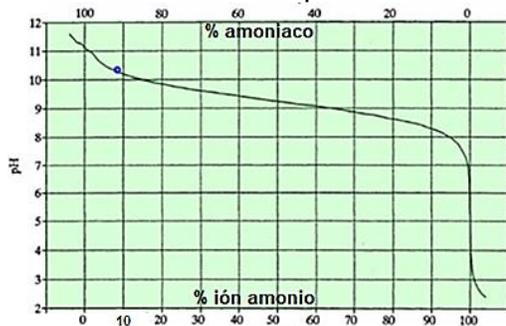


Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se evalúan 16 relaciones de flujo volumétrico AIRE – AGUA representadas como R#.

Así, lo que se busca con la experimentación inicialmente es determinar en cada tipo de torre en cada nitruración, la mejor relación de flujo aire – agua que permita obtener la mayor eficiencia en la eliminación de amoníaco del agua residual, lo cual se comprueba primariamente a partir de la disminución del pH del agua, donde se comprueba mediante la gráfica 6 que al disminuir el pH del agua, la concentración de amoníaco disminuye. En la tabla 4 se muestran los flujos volumétricos de agua y aire utilizados en la experimentación, mientras tanto en la figura 9 se muestra una representación gráfica de la actividad a desarrollar.

Gráfica 6. Relación porcentual amoníaco – ion amonio y su efecto en el pH.



Fuente: “*Handbook of pulping and papermaking*” y corresponde a la Fig. 14 - 4. The pH as a function of ammonia - ammonium (NH₃ - NH₄⁺) composition (0.1M total concentration) at 25°C¹⁴¹.

¹⁴¹ Handbook of pulping and papermaking. 2nd,

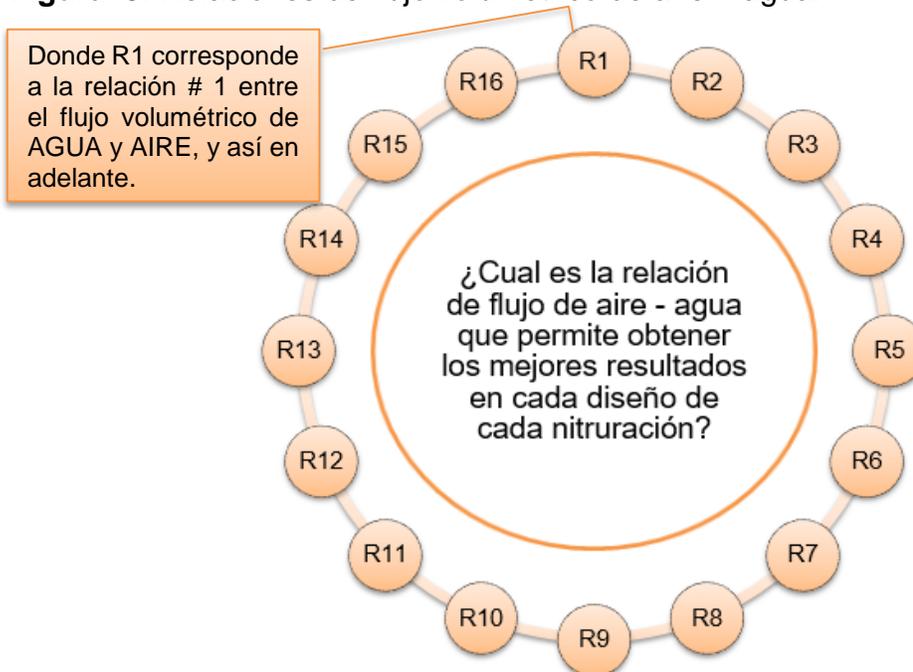
Nota 1: la grafica se describe a 25°C y 0.1M (1700mg de amoniaco gaseoso por litro de solución a 1804mg de ion amonio por litros de solución). Aunque la concentración y temperatura de la gráfica no coinciden con la concentración y temperatura, esta grafica permite identificar la relación entre la concentración de amoniaco y el pH, que claramente tienen una relación directa.

Tabla 7. Flujos volumétricos de agua y aire utilizados en la experimentación

EMPERIMENTACIÓN			Flujo volumétrico de AGUA (L/s)			
			0.050	0.043	0.033	0.023
Tipo de torre	Microburbujeo	Empacada				
Flujo volumétrico de AIRE (L/s)	0.25 - 0.30	0.055 - 0.065	R1	R5	R9	R13
	0.43 - 0.48	0.067 - 0.090	R2	R6	R10	R14
	0.60 - 0.70	0.104 - 0.194	R3	R7	R11	R15
	0.78 - 0.83	0.233 - 0.275	R4	R8	R12	R16

Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Relaciones de flujo volumétrico de aire – agua.



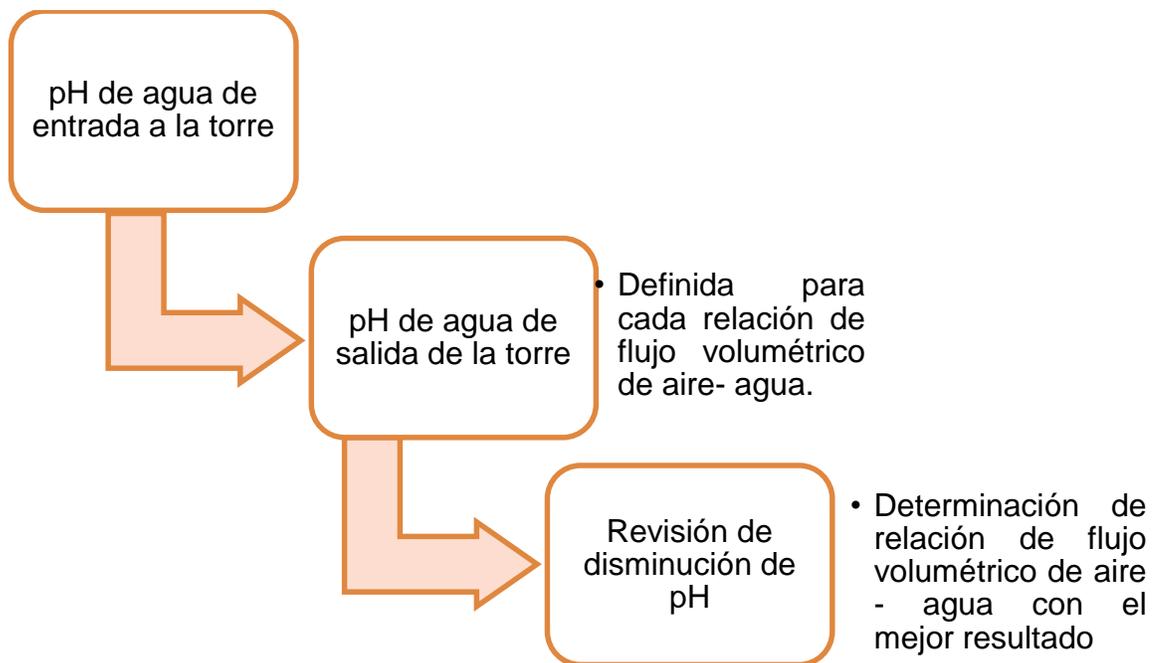
Fuente: Elaboración propia.

Así, en el desarrollo experimental, inicialmente es necesario determinar el pH del agua residual del proceso de nitruración (corriente líquida de entrada a la torre), el cual es un parámetro constante durante todo el proceso (véase sección 4.2.2). En seguida, en cada evento, por ejemplo, en la torre empacada con anillos de Pall evaluada en la nitruración # 1 utilizando la relación de flujo de aire – agua # 1, es necesario llevar a cabo la medición del flujo volumétrico de aire y agua. Después,

esperando un tiempo considerable para estabilizar el proceso, se mide el pH del agua de salida de la torre.

Una vez revisadas todas las relaciones de flujo de aire y agua en un tipo de torre en una nitruración, por ejemplo torre empacada en la nitruración # 1, se revisan los datos registrados comparando los resultados del pH de entrada y salida del agua de la torre de cada relación, y se selecciona la relación de flujo aire - agua que permitió obtener la mayor disminución de pH. En la figura 10 se describe gráficamente lo indicado.

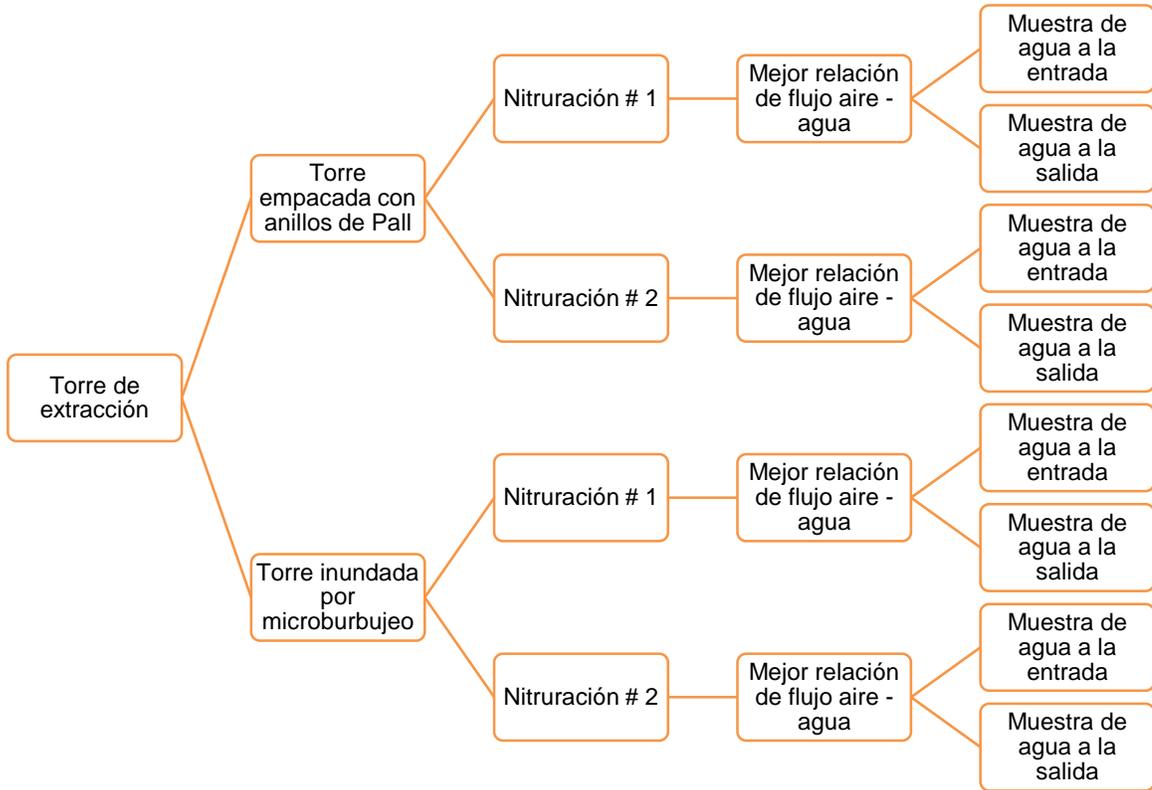
Figura 10. Evaluación de relaciones de flujo mediante la comparación de pH de agua de entrada y salida.



Fuente: Elaboración propia.

La mejor relación en cada diseño en cada nitruración se replica nuevamente para tomar muestra de agua a la entrada y salida de la torre en un recipiente plástico, que se etiqueta, rotula y se entrega al laboratorio para análisis de nitrógeno amoniacal (el muestreo de agua siguió el protocolo de muestreo emitido en el anexo F). De esta manera, en total se obtendrán 8 muestras de agua para análisis de nitrógeno amoniacal definidas como se muestra en la figura 11.

Figura 11. Toma de muestras en el desarrollo experimental para análisis de nitrógeno amoniacal.



Fuente: Elaboración propia.

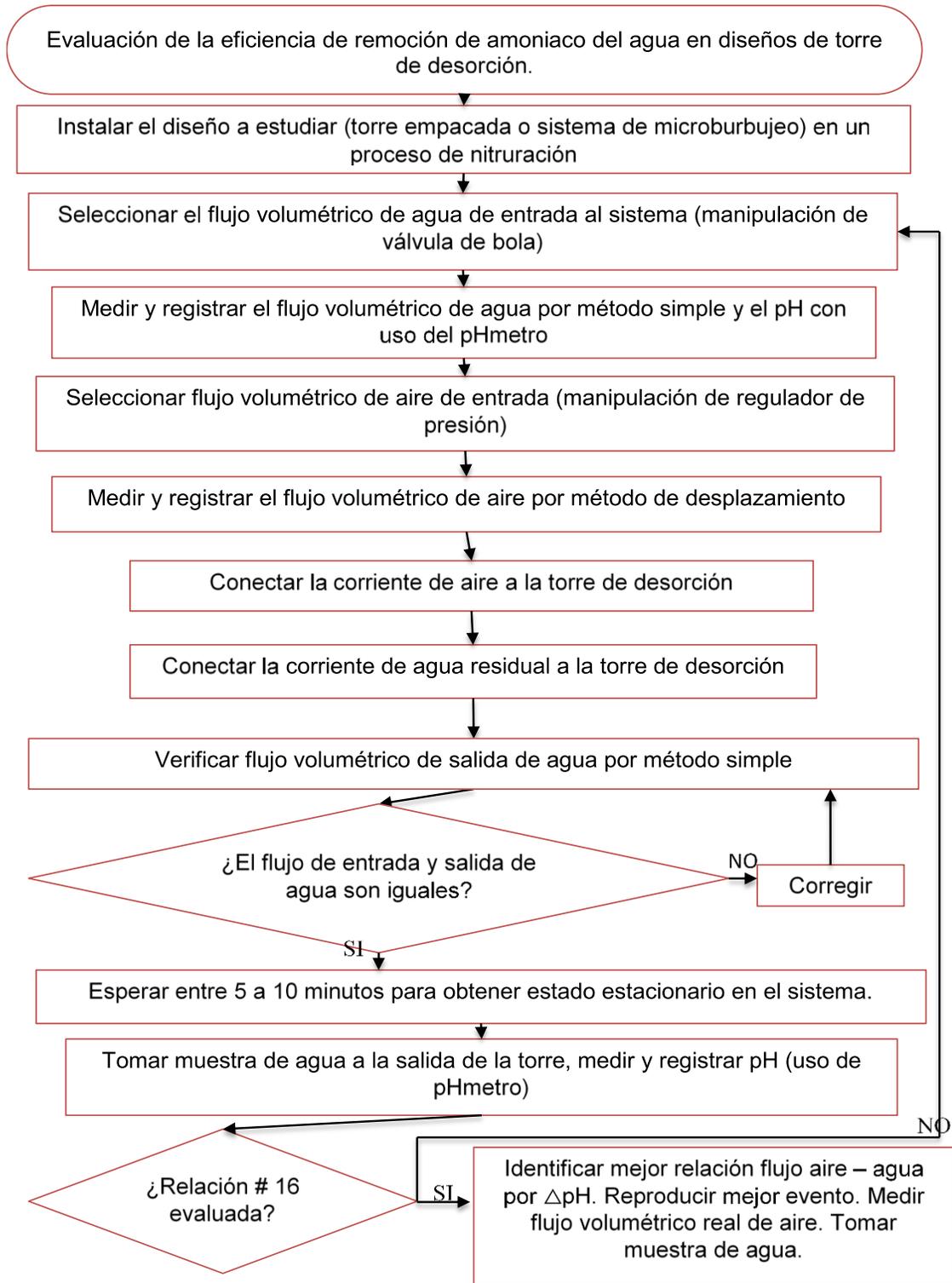
El flujo volumétrico de aire se mide fuera del sistema de desorción, sin embargo, este flujo presenta una disminución al ingresar a la torre debido a los obstáculos con los que se encuentra el aire, ya sea los empaques y el disolvente en el sistema de empaque de anillos de Pall o el filtro cerámico en el sistema por microburbujeo, es por ello que es necesario medir el flujo volumétrico real, midiendo el flujo volumétrico de aire de salida en la torre. Esta medición será desarrollada única y especialmente para las relaciones de flujo agua – aire que obtuvieron los mejores resultados.

Hay anotar que el flujo volumétrico del agua se mide por método simple, que corresponde al tiempo gastado para llegar a un volumen determinado, mientras que el flujo volumétrico del aire se mide por el método de desplazamiento, método que consiste en llenar completamente de agua una probeta, invertirla sobre un recipiente de agua para promover la generación de una columna de agua y medir el volumen de la columna de agua que desplaza el aire al almacenarse en la probeta en un tiempo determinado.

En esta experimentación no se tendrá en cuenta la medición de la temperatura en las corrientes líquidas de salida y entrada de la torre, debido a que el tamaño del prototipo diseñado hace imposible reconocer si el proceso promueve cambios en la temperatura.

En la siguiente figura se muestra resumido el protocolo de experimentación como diagrama de flujo (figura 12).

Figura 12. Diagrama de flujo de experimentación



Fuente: Elaboración propia.

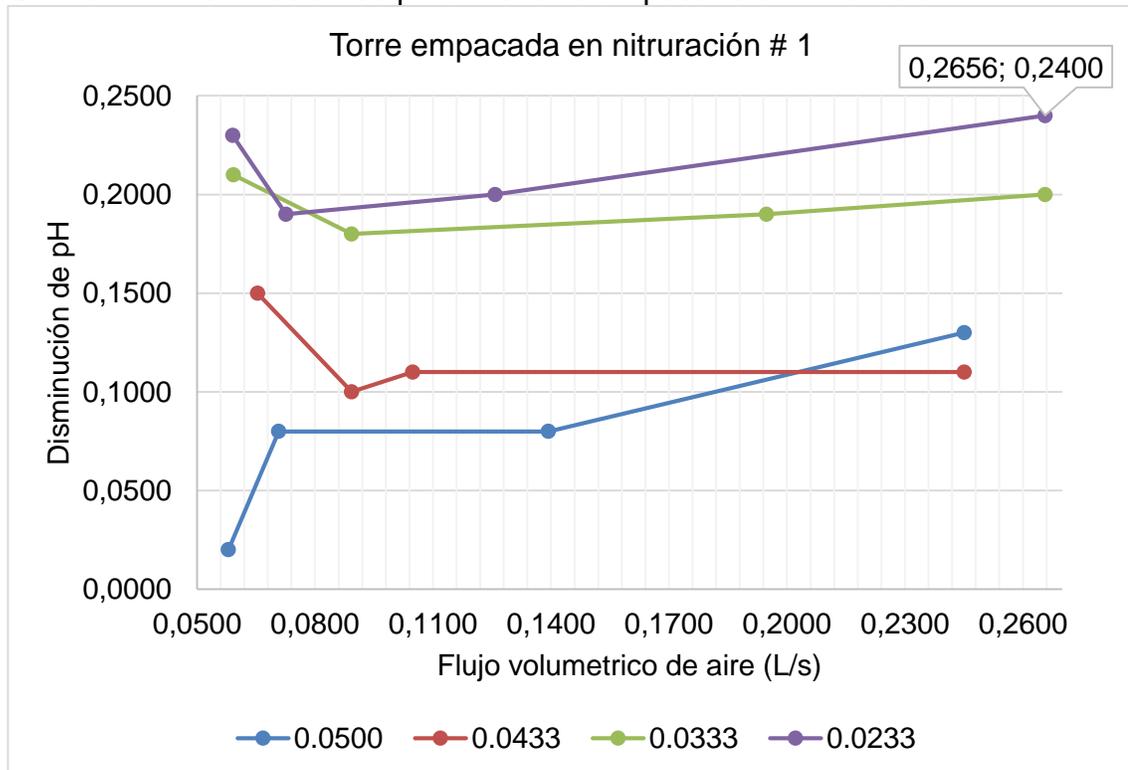
4.3 EJECUCIÓN EXPERIMENTAL

El experimento se llevó a cabo el 13 y 14 de Septiembre del 2018, el día 13 de Septiembre se evaluó la primera nitruración, en el cual se pudo efectuar la experimentación correctamente siguiendo el procedimiento estipulado. A su vez, se cumplió a cabalidad la experimentación desarrollada el día 14 de Septiembre en el cual se evaluó el segundo proceso de nitruración.

El formato de registro de datos se muestra en la tabla 23 del anexo J, en esta tabla cada columna corresponde a un nivel de flujo volumétrico de agua evaluado, mientras que cada fila corresponde a un flujo volumétrico de aire. Así, para cada relación aire – agua (número de fila – número de columna) fue necesario registrar el pH a la salida de la corriente líquida. Además, el cuadro cuenta con una celda para el registro del pH de la entrada de la corriente líquida, parámetro constante por nitruración, el cual en la primera nitruración obtuvo un resultado de 10.34, mientras que en la segunda nitruración fue de 10.36.

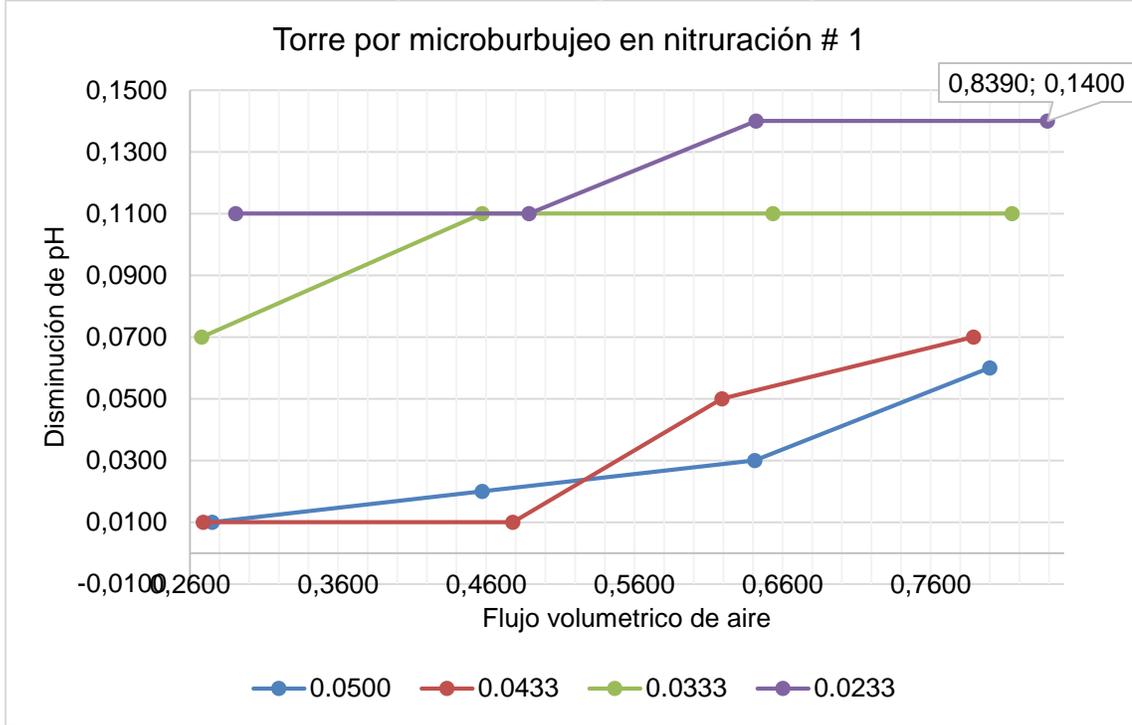
Los resultados de la disminución de pH del agua (variable de respuesta) en cada tipo de torre en cada nitruración evaluada se representan en la gráfica 7, 8, 9 y 10. Cada grafica muestra cuatro líneas de color que representan los cuatro niveles de flujo volumétrico de agua(L/s), mientras tanto en el eje horizontal se representa el flujo volumétrico de aire(L/s) y en el eje vertical se representa la disminución del pH.

Gráfica 7. Disminución de pH en la torre empacada en nitruración # 1



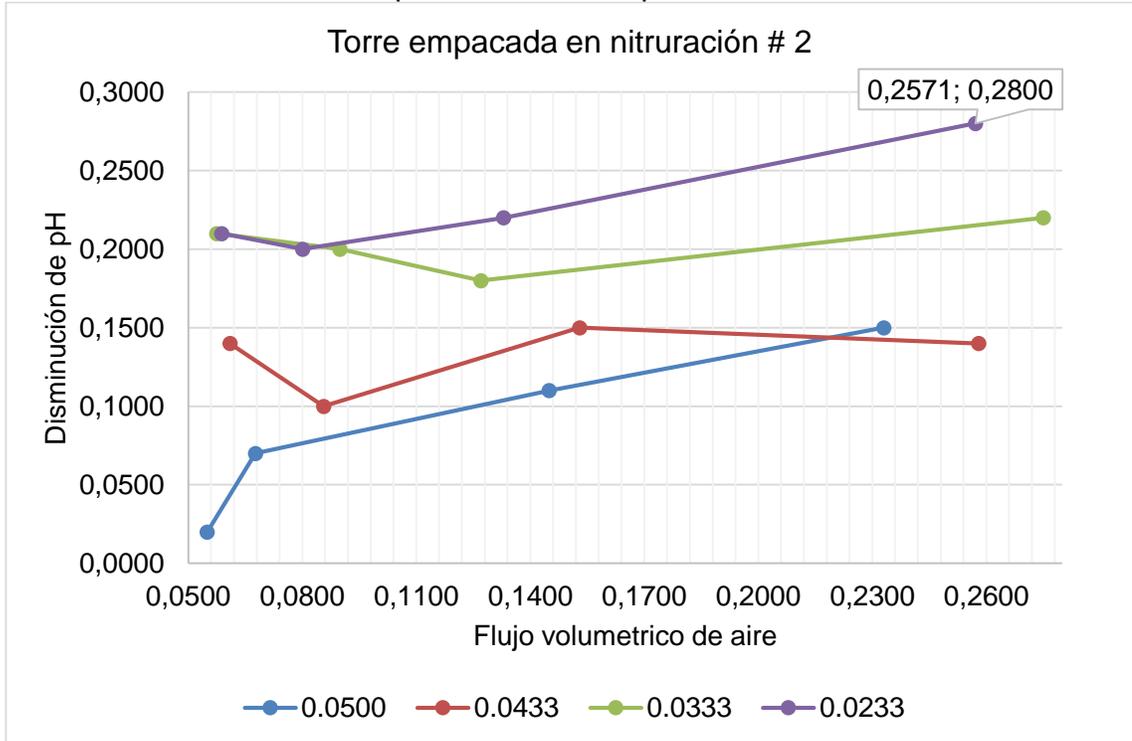
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 8. Disminución de pH en la torre por microburbujeo en nitruración # 1.



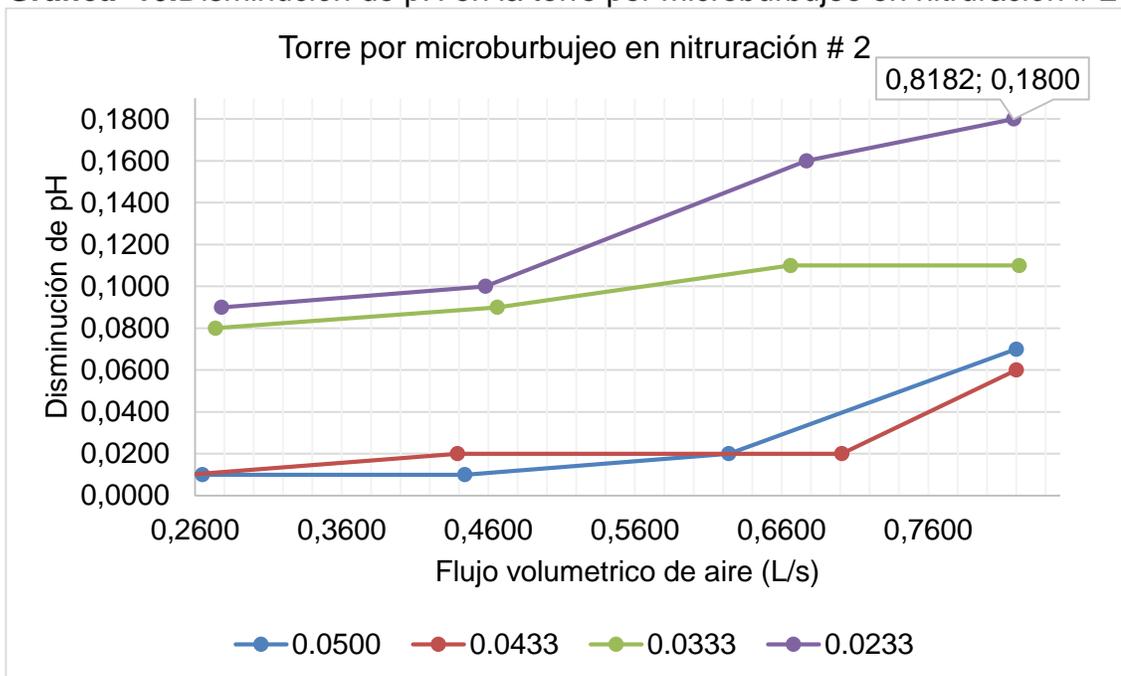
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 9. Disminución de pH en la torre empacada en nitruración # 2



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 10. Disminución de pH en la torre por microburbujeo en nitruración # 2



Fuente: Elaboración propia.

4.4 RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Acorde con las gráficas 7, 8, 9 y 10, se observa que al mantener el flujo volumétrico de agua constante y aumentar el flujo volumétrico de aire, se obtiene una mayor disminución de pH (relación directa), por ejemplo, la línea azul de la gráfica 9, que representa los resultados de la torre por microburbujeo en la nitruración # 1 con un flujo volumétrico de agua de 0.0500L/s, se demuestra que el aumento de flujo volumétrico de aire refleja un aumento en la disminución del pH¹⁴².

En el caso contrario, cuando el flujo volumétrico se mantiene constante y se varía el flujo volumétrico de agua, se observa que a un menor flujo volumétrico de agua se promueve el aumento en la disminución del pH (relación inversa), por ejemplo, en la gráfica 9, a un flujo volumétrico de aire entre 0.60 a 0.66L/s, la mayor disminución del pH se observó en el flujo volumétrico de agua de 0.0233L/s comparados con los flujos mayores de 0.033, 0.0433 y 0.0500L/s. Aunque no todos los resultados obtenidos se basan en esta teoría, la mayoría se rigen bajo esta definición.

En consecuencia a los resultados obtenidos, se comprueba que la relación con un alto flujo volumétrico de aire y un bajo flujo volumétrico de agua permite obtener los mejores resultados en la disminución del pH. En la tabla 8 se muestran los valores de flujo volumétrico de aire y agua, el pH de entrada y de salida del agua y la

¹⁴² BASAKCILARDAN, Sibel; IPEKOGLU, Nursen & TALINLI, Ilhan. Recovery of Ammonia from Human Urine by Stripping and Absorption. En: ENVIRONMENTAL ENGINEERING SCIENCE. p. 615-624

disminución de pH obtenido.

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.

Nota 1: la disminución del flujo volumétrico en porcentaje se calcula con la diferencia entre el flujo volumétrico de aire fuera de la torre y el flujo volumétrico de aire en la torre, dividido en el flujo volumétrico de aire fuera de la torre.

Nota 2: los diseños fueron evaluados como una torre inundada.

A partir de la tabla 9 se comprueba que la torre empacada genera una caída de flujo volumétrico de aire menor a la torre por microburbujeo, esto se explica debido a que en la torre por microburbujeo, cuando el aire ingresa al filtro cerámico, encuentra como barrera la carcasa del filtro y colisiona con esta, generando la disminución del flujo, pero además, el aire no se represa dentro del filtro cerámico, sino que se escapa de este desarrollando recorridos sobre el medio microporoso, motivo que permite la generación de las microburbujas (véase nuevamente la figura 6). Conviene subrayar que la caída del flujo volumétrico de aire permitió estrechar la cercanía numérica entre los flujos volumétricos en los dos diseños, lo cual favorece la comparación entre estos mismos.

En esta tabla también se puede observar que la eficiencia de remoción de amoníaco fue mayor en el diseño de torre empacada que en la torre por microburbujeo, lo que explica la razón por la cual la disminución del pH también tiene esta tendencia como se muestra en la tabla 8. Este resultado se debe a que los anillos de Pall en la torre empacada generan que las burbujas de aire se demoren más tiempo en escapar de la torre, debido a que los empaques son un obstáculo para las burbujas, frenando su movimiento ascendente y promoviendo un eficiente contacto entre las fases líquida y gaseosa. En caso contrario, en la torre por microburbujeo, a pesar de que las microburbujas cuentan con un área superficial por volumen mayor en relación a las burbujas de la torre empacada¹⁴³, el sistema no tiene elementos que permita detener el movimiento de las microburbujas lo que origina que estas escapen demasiado rápido del sistema.

Por consiguiente, se propone diseñar una torre empacada con anillos de Pall como propuesta para el tratamiento de agua residual para el proceso de nitruración, al obtener una mayor eficiencia en la eliminación de amoníaco y la disminución de pH, comparado con el diseño por microburbujeo. El diseño de la torre será detallado en el siguiente capítulo.

¹⁴³ PARMAR, Rajeev & MAJUMDER, Subrata Kumar. Microbubble generation and microbubble aided transport process intensification—A state of the art report. En: CHEMICAL ENGINEERING AND PROCESSING: PROCESS INTENSIFICATION. p. 79-97

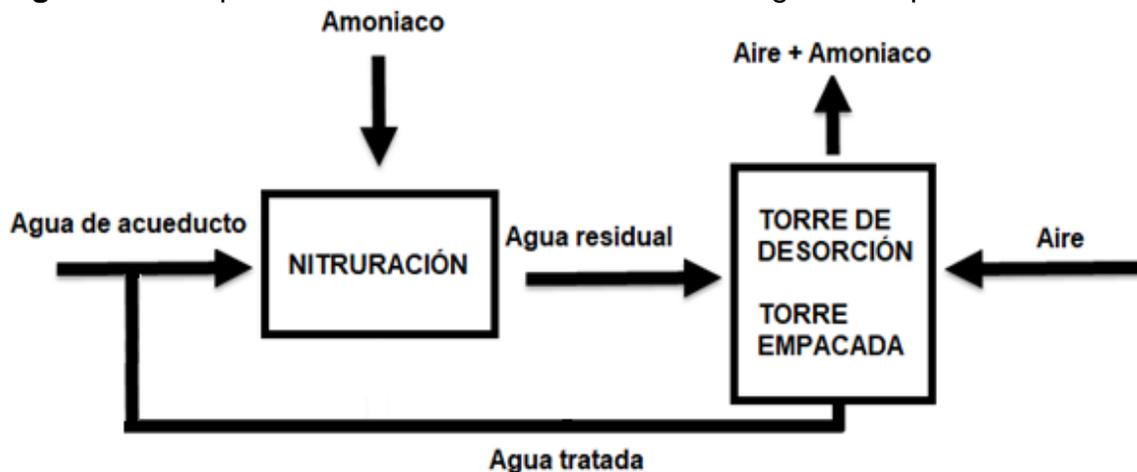
5. ANÁLISIS FINANCIERO

En este capítulo se expone la propuesta técnica y económica del tratamiento de agua residual para el proceso de nitruración, se desarrolla el diseño de la torre de desorción empacada, se muestran la inversión requerida, los costos de operación y se define su viabilidad económica.

5.1 PROPUESTA TÉCNICA

El 63% del consumo de agua de acueducto en la empresa corresponde al consumo por el desarrollo del proceso de nitruración tal como se mostró en la sección 2.4. Este consumo de agua no tiene recuperación debido a que es vertido directamente al alcantarillado, de esta manera se propone disminuir el consumo de agua en el proceso de nitruración **al eliminar de raíz este gasto mediante un sistema de recirculación de agua en el mismo proceso**, lo cual es posible debido a que el agua en el proceso es un servicio, más no un insumo que pueda alterar o modificar las características de las matrices de nitruración, en la figura 13 se muestra un esquema de la propuesta a trabajar.

Figura 13. Esquema de sistema de recirculación de agua en el proceso



Fuente: Elaboración propia.

Aunque existe un sistema de recirculación de agua en los procesos de compactado, fundición, homogeneizado y extrusión, el agua residual del proceso de nitruración no puede ser alimentado en este sistema ya que cuenta con un pH fuertemente alcalino (véase sección 2.6.4: caracterización del agua residual del proceso de nitruración), que puede generar la corrosión y el desgaste de los elementos internos de los equipos utilizados en estos procesos. Además, debido a que el sistema de recirculación de estos procesos se encuentra expuesto al medio ambiente, el amoníaco del agua residual puede llegar a generar molestias a los empleados de la empresa o problemas en salud ya que a partir de una concentración de amoníaco de 5ppm presenta un olor perceptible, de 20 a 50ppm el olor es fácilmente

detectable, de 150 a 200 ppm genera lagrimeo en ojos y molestia general, y de ahí en adelante acarrea irritación en ojos, fuerte tos, asfixia e incluso hasta la muerte¹⁴⁴.

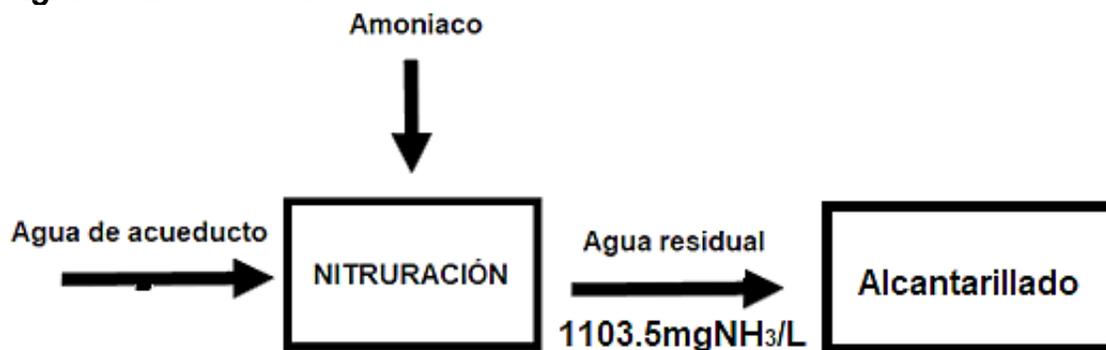
Es importante indicar que el agua residual del proceso de nitruración tiene una concentración de 1103.28mgNH₃/L (véase sección 2.6.4), sin embargo, la recirculación del agua en el mismo proceso promovería el aumento progresivo de la concentración, generando un posible aumento de 1103.28mgNH₃/L en cada ciclo desarrollado.

Es por ello que el tratamiento del agua en recirculación debe consistir directamente en eliminar 1103.28mg NH₃/L constantemente. Así, si se realiza la eliminación de amoníaco antes del primer ciclo de agua, se obtendría una concentración nuevamente de 0 mg NH₃/L, sin embargo, es imposible llevar a cero la concentración ya que se ve afectada por un equilibrio en un sistema líquido - gaseoso, llevando el diseño a características sobredimensionales.

De esta manera, se propone inicialmente saturar el agua residual desde 1103.28mgNH₃/L hasta una concentración de 15445.92 mg NH₃/L, la cual se obtiene al recircular el agua residual en el mismo proceso posiblemente 14 veces. Y en seguida activar el proceso de extracción de amoníaco eliminando únicamente 1103.28mgNH₃/L, lo cual permite mantener la torre en estado estacionario, ya que la concentración obtenida en el proceso de nitruración correspondería al valor eliminado en la torre de desorción (véase figura 14 y figura 15) obteniendo una eficiencia de proceso de tan solo 7%.

Es importante indicar que se realizó la evaluación de corrientes líquidas de entrada a concentraciones menores a la propuesta, sin embargo en el desarrollo de los cálculos se obtenida un consumo de aire que superaba la capacidad del compresor presente en la empresa, es por ello que fue posible trabajar con estas.

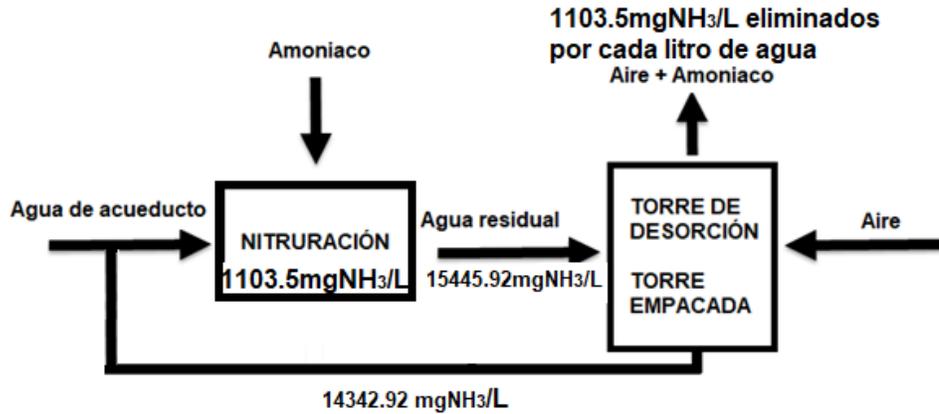
Figura 14. Proceso de nitruración actual



Fuente: Elaboración propia.

¹⁴⁴ VIO, Juan. Guía de uso y manejo de amoníaco en la refrigeración de frutas y hortalizas frescas: plan de emergencias. Asociación de exportadores de fruta de Chile, 2012.

Figura 15. Proceso de nitruración con torre de desorción.



Fuente: Elaboración propia.

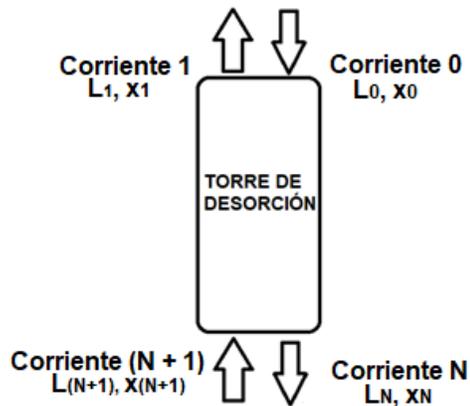
Nota 1: el esquema que se muestra en la figura 15 incluyendo sus valores es un “**posible**” escenario el cual no se puede garantizar por múltiples factores que intervienen como la temperatura ambiental, el consumo de amoníaco en la nitruración, el número de nitruraciones desarrollados en relación al tiempo, etc.

5.2 DISEÑO DE TORRE DE DESORCIÓN.

En las siguientes secciones se realiza el diseño de la torre de desorción con base en los mejores resultados obtenidos en la fase experimental donde se muestra los aspectos de diseño más importantes relacionados con la torre tal como el balance de masa, la caída de presión en el sistema, su altura y su diámetro. La propuesta indicada se basa y estipula bajo el método de diseño de torre de desorción descrita en el libro “*Procesos de transporte y principios de procesos de separación*” de Christie John Geankoplis.

Se solicita que el lector siga el paso a paso del balance de materia del diseño con el apoyo de la figura 16, de no ser así puede llegar a presentar confusión y duda frente al diseño desarrollado.

Figura 16. Esquema ilustrativo de torre de desorción y la representación de sus variables.



Fuente: Elaboración propia.

5.2.1 Determinación de características de la corriente líquida de entrada a la torre. El agua residual del proceso de nitruración corresponde a la corriente líquida de entrada de la torre, etiquetada a partir de ahora como corriente 0, esta corriente está regida bajo los parámetros establecidos en la sección 2.6.3 y 2.6.4 que corresponden a una temperatura de 40.4°C, un pH de 10.62, una concentración de amoníaco promedio de 1103.28mgNH₃/L y flujo volumétrico de 0.1163L/s.

Como se dijo anteriormente, la concentración de amoníaco del agua residual se manipulará hasta alcanzar una concentración de aproximadamente de 15445.92 mgNH₃/L. En el caso del flujo volumétrico y la temperatura del agua residual, se mantendrán a las mismas condiciones que las promovidas por el proceso de nitruración. Con la información conocida del agua residual, es necesario calcular la fracción másica (X_0), fracción molar (x_0), flujo másico (L_{m0}) y flujo molar (L_{mol0}), debido a que son datos necesarios para el diseño de la torre. En la tabla 10 se muestran los resultados de cada uno de estos ítems.

Tabla 10. Características de la corriente líquida de entrada.

Temperatura (°C) T_0	40.4
Concentración de amoníaco (mg/L) $[]_0$	15445.92
Flujo volumétrico (L/s) L_{v0}	0.1163
Flujo másico (kg/s) L_{m0}	0.1154
Flujo molar (kmol/s) L_{mol0}	0.006411
Fracción molar de amoníaco x_0	0.016451
Fracción másica de amoníaco X_0	0.015567
Líquido sin la sustancia de interés (kmol/s) L'_{mol}	0.006306

Fuente: Elaboración propia.

Para calcular la fracción másica y el flujo másico a partir de la concentración de amoníaco y el flujo volumétrico, respectivamente, se requiere conocer la densidad de la solución. Al revisar la bibliografía se observa que cuando la concentración de amoníaco en una solución acuosa diluida, la densidad de la solución puede ser asumida como la densidad del agua a la temperatura de trabajo¹⁴⁵, en este caso a 40.4°C la densidad del agua¹⁴⁶ corresponde a 992.25kg/m³. De esta manera se calcula el flujo másico (L_{m0}) y la fracción másica (X_0) tal como se muestra en la

¹⁴⁵ Unidad de regencia química institucional. Hoja de seguridad 18: Amoníaco Costa Rica:

¹⁴⁶ GEANKOPLIS, Christie John. Procesos de transporte y principios de procesos de separación. 4th ed. CECSA, 669-704 p.

ecuación 2 y 3.

$$\text{Ecuación 2. } L_{m0} = L_{x0} \times \rho_0 = 0.1164 \frac{L}{s} \times \frac{1m^3}{1000L} \times 992.25 \frac{kg}{m^3} = 0.1154 \frac{kg}{s}$$

$$\text{Ecuación 3. } X_0 = 15445.92 \frac{mgNH_3}{L} \times \frac{1kg}{10^6mg} \times \frac{1m^3}{992.25kg} \times \frac{1000L}{1m^3} = 0.01557$$

Nota 2: el valor de L' indicado en la tabla 7 se refiere al flujo molar en la corriente líquida sin la sustancia de interés, y es calculada bajo la ecuación 4.

$$\text{Ecuación 4. } L_{mol}' = L_{mol0} \times (1 - x_0) = 0.006411 \frac{kmol}{s} \times (1 - 0.016451) =$$

$$L_{mol}' = 0.006306 \frac{kmol}{s}$$

5.2.2 Determinación de características de la corriente líquida de salida. Esta corriente será nombrada de aquí adelante como corriente N. Se determina que la eficiencia de eliminación de amoníaco a trabajar corresponderá únicamente al 33%, la cual permite obtener una concentración de amoníaco de salida de 2206.84mNH₃/L. A partir de este dato se obtiene la fracción másica (X_N), fracción molar (x_N), el flujo másico (L_{mN}) y el flujo molar (L_{molN}) (véase tabla 11).

Tabla 11. Características de la corriente líquida de salida.

Concentración de amoníaco (mg/L) $[]_N$	14342.92
Flujo másico (kg/s) L_{mN}	0.1153
Flujo molar (kmol/s) L_{molN}	0.006404
Fracción molar de amoníaco x_N	0.015278
Fracción másica de amoníaco X_N	0.01445

Fuente: Elaboración propia.

Nota 1: el flujo molar se calcula a partir de la ecuación 5, donde L' mol corresponde al flujo molar del líquido sin la sustancia de interés.

$$\text{Ecuación 5. } L_{molN} = \frac{L'_{mol}}{1-x_n} = \frac{0.06306}{1-0.015278} \frac{kmol}{s} = 0.1153 \frac{kmol}{s}$$

5.2.3 Equilibrio para el sistema de amoníaco – agua a 40°C. Es necesario conocer el equilibrio del sistema amoníaco - agua a la temperatura de trabajo, sin embargo, debido a que el amoníaco se encuentra diluido en el agua residual, donde su fracción molar (x_0) es de 0.003528, es preferible trabajar a partir de la ley de Henry que se rige bajo la ecuación 6, donde H' corresponde a la constante de Henry adimensional, calculada a partir de la ecuación 7 que fue derivada por Gibb

(1999)¹⁴⁷.

$$\text{Ecuación 6. } y = H' \times x$$

$$\text{Ecuación 7. } H' = \frac{1}{2 \times \exp(\ln 56E10^{-3} - 4029 \times (\frac{1}{T(K)} + \frac{1}{298.15}))}$$

$$H' = \frac{1}{28 \times \exp(\ln 56E10^{-3} - 4029 \times (\frac{1}{40 + 273.15} + \frac{1}{298.15}))}$$

$$y = 0.3333 * x$$

5.2.4 Determinación de características de la corriente gaseosa de entrada y de salida. La corriente gaseosa de entrada, etiquetada como corriente (N+1), presenta un valor de cero en la fracción másica (X_{N+1}) y la fracción molar (x_{N+1}) debido a que el aire de entrada no cuenta con amoniaco. Los valores de flujo másico ($V_{m N+1}$) y molar ($V_{mol N+1}$) en cambio, deben ser calculados. Para calcular estos valores es necesario inicialmente estimar la fracción molar máxima de la corriente gaseosa de salida $y_{1 \text{ máxima}}$ la cual corresponde a la fracción molar en el equilibrio con x_0 (ecuación 23).

$$\text{Ecuación 8. } y_{1max} = H' \times x_0$$

$$y_{1max} = 0.3333 \times 0.01645 = 0.005483$$

A partir de $y_{1 \text{ máxima}}$ se obtiene el flujo molar mínimo de la corriente gaseosa de entrada mediante un balance de materia (ecuación 9). En este balance se supone que el flujo molar en la corriente gaseosa de entrada sin la sustancia de interés es igual al flujo molar de la corriente gaseosa de entrada al no existir amoniaco en dicha corriente ($V_{mol N+1 \text{ mínimo}} = V'_{mol \text{ mínimo}}$).

$$\text{Ecuación 9. } V'_{mol \text{ min}} = \frac{L'_{mol}}{\frac{\frac{y_{1max}}{1 - y_{1max}} - \frac{y_{N+1}}{1 - y_{N+1}}}{\frac{x_0}{1 - x_0} - \frac{x_n}{1 - x_n}}} = \frac{0.006306}{\frac{0.005483}{1 - 0.005483} - \frac{0}{1 - 0}} \cdot \frac{0.016451}{1 - 0.01645} - \frac{0.01528}{1 - 0.01528}}$$

$$V_{mol N+1 \text{ mínimo}} = V'_{\text{mínimo}} = 0.002772 \left(\frac{kmol}{s} \right) = 2.772 \frac{mol}{s}$$

Se propone el doble de flujo molar mínimo como flujo de trabajo real para la torre diseñada, esto debido a que a flujos molares de aire heurísticos tal como 1.3 a 1.5 la altura de la torre se acrecentaba¹⁴⁸. Así, el flujo molar de la corriente gaseosa de

¹⁴⁷ BRONK, Deborah; MULHOLLAND, Margaret & CARPENTER, Edward. Nitrogen in the marine environment. 2nd ed. Elsevier, 2008. 78 p.

¹⁴⁸ GILPAVAS, Edison. Heurística de torres. [0]:Medellín Colombia

entrada real tiene un valor de 0.002772 kmol/s. En la tabla 12 se muestran los parámetros de la corriente gaseosa de entrada.

Tabla 12. Características de la corriente gaseosa de entrada

Flujo másico (kg/s), V_{mN+1}	0.08031
Flujo molar (kmol/s), V_{molN+1}	0.002772
Fracción másica de amoníaco, Y_{N+1}	0
Fracción molar de amoníaco, y_{N+1}	0

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, no se conoce ninguna característica de la corriente gaseosa de salida, estos datos se obtiene mediante un balance de masa teniendo en cuenta las característica de corriente líquida de entrada y salida y las características de corriente gaseosa real de entrada. La determinación de la fracción másica $y_{1\text{ real}}$ y el flujo molar se calculan con la ecuación 10 y 11, respectivamente.

Ecuación 10

$$y_{1\text{ real}} = \frac{\frac{y_{N+1}}{1-y_{N+1}} + \frac{L'}{V'} \times \left[\frac{x_0}{1-x_0} - \frac{x_n}{1-x_n} \right]}{1 + \frac{y_{N+1}}{1-y_{N+1}} + \frac{L'}{V'} \times \left[\frac{x_0}{1-x_0} - \frac{x_n}{1-x_n} \right]} = 0.002749$$

Ecuación 11.

$$V_{mol\ 1\text{ real}} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{s}} \right) = \frac{V'}{1-y_1} = \frac{0.002772}{1-0.002749} = 0.002780 \frac{\text{kmol}}{\text{s}}$$

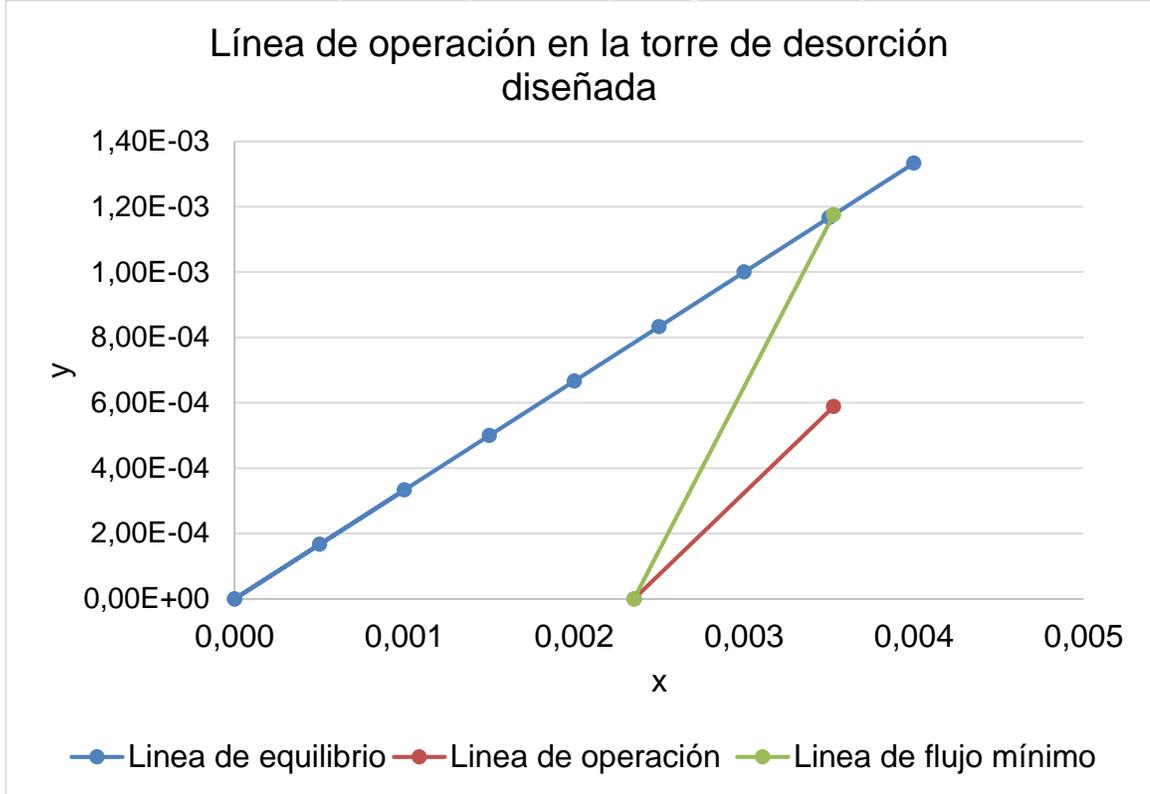
En la tabla 13 se muestran las características de la corriente gaseosa de salida, mientras tanto en la gráfica 11 se representa la línea de equilibrio, la línea de operación para flujo mínimo de gas y flujo real de gas.

Tabla 13. Características de la corriente gaseosa de salida

Flujo másico (kg/s), V_{m1}	0.08044
Flujo molar (kmol/s), V_{mol1}	0.002780
Fracción másica de amoníaco, Y_1	0.001618
Fracción molar de amoníaco, y_1	0.002749

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 11. Línea de operación para el flujo de gas mínimo y real.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 17 se muestra un esquema en el cual se observan los resultados que representan el balance global del proceso de desorción diseñado, en ella los resultados V corresponden a la fase gaseosa, mientras que L define las características del líquido. En cuanto a los el subíndice m corresponde al flujo másico en kg/s , mol a flujo molar en kmol/s y v al flujo volumétrico en L/s .

En el balance de materia desarrollado se supuso que el aire es esencialmente insoluble en la fase acuosa y que el agua no se vaporiza para incorporarse a la fase gaseosa, es decir que su vaporización es poco considerable., donde el amoniaco es el único que se redistribuye entre ambas fases.

Figura 17. Balance global de proceso de desorción.

V_{m1}	0.08044		T_0	40.4
V_{mol1}	0.002780		$[]_0$	15445.92
Y_1	0.0016180		L_{v0}	0.1163
y_1	0.0027492		L_{m0}	0.1154
			L_{mol0}	0.006411
			x_0	0.016451
			X_0	0.015567
			L'	0.006306
V_{mN+1}	0.08031	$[]_N$	14342.92	
V_{molN+1}	0.002772	L_{mN}	0.1153	
Y_{N+1}	0	$L_{mol N}$	0.006404	
y_{N+1}	0	x_N	0.015278	
		X_N	0.01445	

Fuente: Elaboración propia.

5.2.5 Determinación de la caída de presión. Dentro de una torre empacada a medida que el gas fluye hacia arriba experimenta una caída de presión al encontrarse con la resistencia del material de empaque y del solvente que fluye hacia abajo¹⁴⁹. En la propuesta desarrollada se propone diseñar una columna inundación tal como se desarrolló en la experimentación desarrollada en el capítulo 3 donde se evaluaron dos tipos de diseño de torre de desorción. A continuación se describe el cálculo para la caída de presión del sistema.

El cálculo se desarrolla mediante el uso de la correlación empírica de Strigle (gráfica 12), esta correlación predice caídas de presión con una exactitud del ± 11 , definida en el libro de Geankoplis¹⁵⁰. En ella, la ordenada representa el parámetro de

¹⁴⁹ BARBOUR, Wiley; OOMMEN, Roy & SHAREEF, Gurseli. Sección 5. Controles Para SO₂ Y Para Gas Ácido. En: Agencia para la Protección Ambiental de los EE.UU., 1995.

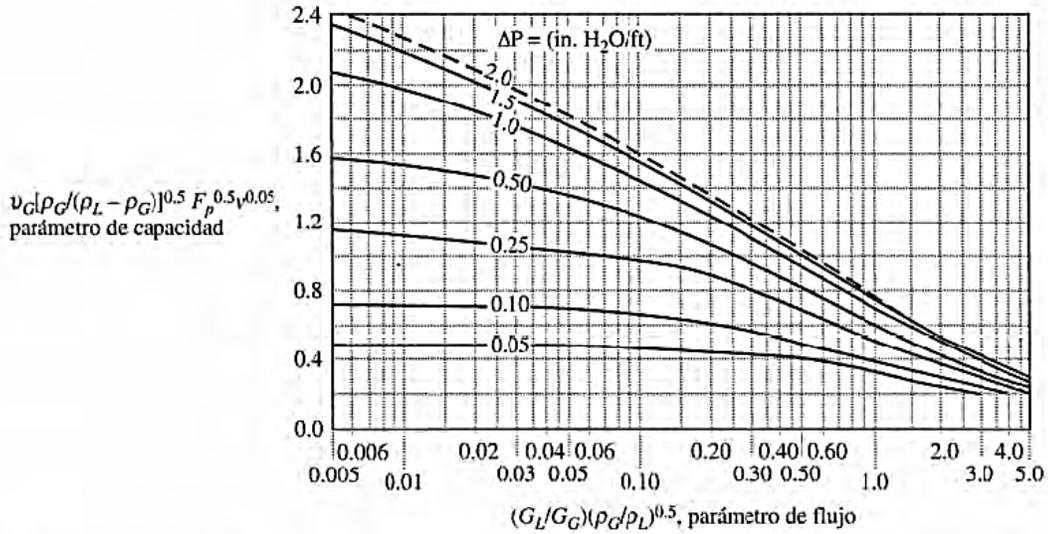
¹⁵⁰ GEANKOPLIS, Christie John. Procesos de transporte y principios de procesos de separación. 4th ed. CECSA Pag. 673.

capacidad (véase ecuación 12) y la abscisa el parámetro de flujo (ecuación 13).

$$\text{Ecuación 12. Parametro de flujo} = \left(\frac{G_L}{G_G}\right) \times \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0,5}$$

$$\text{Ecuación 13. Parametro de capacidad} = v_G \times \left(\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G}\right)^{0,5} \times F_p^{0,5} \times \nu^{0,05}$$

Gráfica 12. Correlación de caída de presión para empaques aleatorios de Strigle.



Fuente: Tomado del libro “*Procesos de transporte y principios de procesos de separación*” de Christie John Geankoplis pág. 673.

Donde v_G es la velocidad superficial del gas en pies/s, ρ_G es la densidad del gas en lb_m/pie³, ρ_L es la densidad del líquido en lb_m/pie³, F_p es el factor de empaque en pie⁻¹, ν es la viscosidad cinemática en centistokes, G_L es la velocidad de masa de líquido en lb_m/(s*pie²) y G_G es la velocidad de masa de gas lb_m/(s*pie²). Es importante indicar que el parámetro de capacidad no es adimensional y por ello la necesidad de utilizar estas unidades.

Nota 1: la densidad, viscosidad dinámica y viscosidad cinemática de la fase líquida y la fase gaseosa fueron supuesta como propiedades directas del agua y del aire a la temperatura de trabajo. En el caso de la corriente líquida la temperatura corresponde a 40.4°C (característica del agua residual del proceso de nitruración), mientras tanto la corriente gaseosa tiene una temperatura promedio de 13.4°C (temperatura promedio del municipio de Mosquera Cundinamarca¹⁵¹). En la tabla 14 se muestran las propiedades de cada fase en las unidades requeridas.

¹⁵¹ MERKEL, Alexander. CLIMATE-DATA.ORG. [0]:

Tabla 14. Propiedades de la fase líquida y fase gaseosa en la torre de desorción

Propiedades del líquido ¹⁵²		Propiedades del gas (a presión de 1 atm) ¹⁵³	
Densidad (lb _m /pie ³)	61.9462	Densidad (lb _m /pie ³)	0.07684
Viscosidad dinámica (cp)	0.6560	Viscosidad dinámica (cp)	0.01778
Viscosidad cinemática (cs)	0.6611	Viscosidad cinemática (cs)	14.5800

Fuente: Elaboración propia.

Así, la caída de presión en el punto de inundación se calculó mediante la ecuación 14, donde F_p es el factor de empaque el cual depende del empaque seleccionado, en este caso para los anillos de Pall a $1\frac{1}{2}$ ", F_p es 40pie^{-1} ¹⁵⁴.

$$\text{Ecuación 14. } \Delta P_{\text{inundación}} = 0.115 \times F_p^{0.7}$$

$$\Delta P_{\text{inundación}} = 0.115 \times 40^{0.7} = 1.52 \frac{\text{in } H_2O}{\text{ft}}$$

Adicionalmente se calcula el parámetro de flujo tal como se muestra a continuación:

$$\left(\frac{G_L}{G_G}\right) = \frac{\frac{\dot{m}_L}{A}}{\frac{\dot{m}_G}{A}} = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_G} = \frac{L_{m0}}{V_{mN+1}} = \frac{0.1154 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0.08031 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} = 1.437$$

$$\text{Parametro de flujo} = (1.437) \times \left(\frac{0.07684}{61.9462}\right)^{0.5} = 0.0506$$

Con base en el parámetro de flujo y la caída de presión en el punto de inundación, se realiza la lectura en la gráfica 12 y se obtiene un parámetro de capacidad de 1.95, despejando en la misma ecuación se deduce la velocidad superficial del gas (v_G) que da como resultado 8.9315pie/s y a su paso se tiene la velocidad de masa de gas (G_G) con un valor de $0.6863\text{lb}_m/(\text{ft}^2 \cdot \text{s})$ (ecuación 15).

$$\text{Ecuación 15. } G_G \text{ inundación} = v_G \rho_G = 8.9315 \frac{\text{pie}}{\text{s}} \times 0.07684 \frac{\text{lb}_m}{\text{pie}^3} = 0.6863 \frac{\text{lb}_m}{\text{ft}^2 \cdot \text{s}}$$

Sin embargo, se recomienda trabajar a una velocidad de gas menor a la de inundación, ya que si se supera la velocidad de masa de gas en el punto de inundación, el líquido no podría seguir descendiendo y sería expulsado por el gas.

¹⁵² GEANKOPLIS, Christie John. Procesos de transporte y principios de procesos de separación. 4th ed. CECSA pág. 673.

¹⁵³ CENGEL, Yunus & CIMBALA, John. Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones. 1st ed. McGraw Hill, 2006. Tabla A-9.

¹⁵⁴ MCCABE, Warren L. Operaciones unitarias en ingeniería química. Sexta ed. MCGRAW-HILL, 2007. 592 p. Tabla 18-1 ISBN 9789701061749

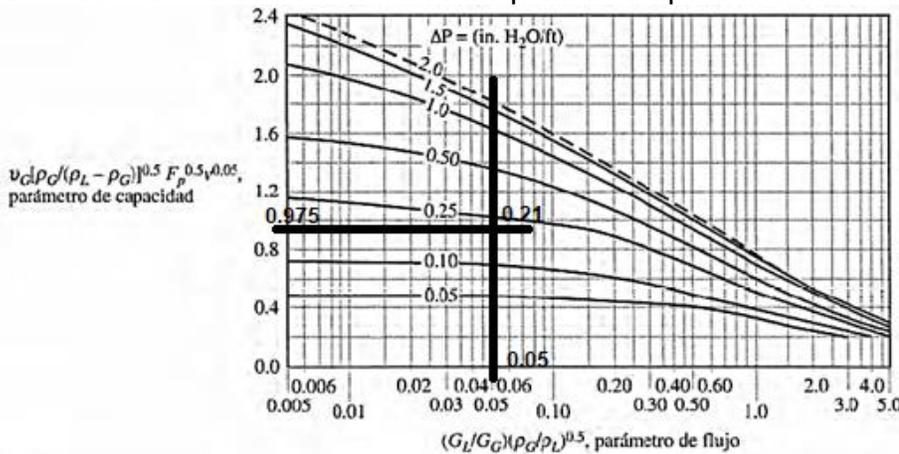
De esta manera, se determina la caída de presión a un 50% del punto de inundación, dato heurístico. A causa de esto, se reajusta la velocidad de masa de gas (G_G) la cual ahora es de $0.3432 \text{ lb}_m/(\text{ft}^2 \cdot \text{s})$, que permite obtener un resultado para la velocidad de masa de líquido (G_L) de $0.4931 \text{ lb}_m/(\text{ft}^2 \cdot \text{s})$ (ecuación 16).

$$\text{Ecuación 16. } \frac{G_L}{G_G} = 1.4368 \rightarrow G_L = 1.4368 \times G_{G \ 80\%} = 1.4368 \times 0.3432 \frac{\text{lb}_m}{\text{ft}^2 \cdot \text{s}}$$

$$\frac{G_L}{G_G} = 0.4931 \frac{\text{lb}_m}{\text{ft}^2 \cdot \text{s}}$$

Con el reajuste, se calcula nuevamente el parámetro de capacidad que obtiene un resultado de 0.975, y junto con el parámetro de flujo de 0.0506 se determina la caída de presión obtenida a un 50% del punto de inundación mediante la correlación de Strigle la cual se muestra en la gráfica 13 obteniendo un resultado de $0.21 \text{ in H}_2\text{O/ft}$.

Gráfica 13. Evaluación de caída de presión en parámetros de diseño.



Fuente: Elaboración propia a partir de imagen tomada del libro “*Procesos de transporte y principios de procesos de separación*” de Christie John Geankoplis pág. 673.

5.2.6 Determinación de área y diámetro de torre. Teniendo en cuenta la velocidad de masa de gas (G_G) y la velocidad superficial del gas ($V_{m \ N+1}$) se calcula el área de sección transversal necesaria para la torre (ecuación 17) y a su paso el diámetro (ecuación 18), la que permite obtener un resultado de 0.04793 m^2 y 24.70 cm respectivamente.

$$\text{Ecuación 17. } G_G = \frac{V_{m \ N+1}}{A} \rightarrow A = \frac{V_{m \ N+1}}{G_G} = \frac{637.42 \frac{\text{lb}_m}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \left(SI = 0.0831 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)}{0.3432 \frac{\text{lb}_m}{\text{ft}^2 \cdot \text{s}}} = 0.5160 \text{ ft}^2$$

$$G_G = 0.04793 \text{ m}^2$$

$$\text{Ecuación 18. } A = \frac{\pi}{4} \times D^2 \rightarrow D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \times A} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \times (0.04793 \text{ m}^2)} = 0.2470 \text{ m}$$

$$A = 24.70 \text{ cm}$$

5.2.7 Determinación de altura de la torre. Para determinar la altura de la torre de desorción es necesario previamente determinar la difusividad del amoniaco en el agua, difusividad del amoniaco en el aire y los coeficientes de película.

- Estimación de difusividad de amoniaco en aire: la estimación de la difusividad del amoniaco en el aire se determinó mediante el método semiempírico de Fuller y colaboradores¹⁵⁵, utilizada para mezclas de gases no polares o una combinación polar – apolar, como en el caso de estudio (véase ecuación 19). En ella T corresponde a la temperatura en K, M representa el peso molecular, P es la presión en atm y v se define como el volumen de difusión. La difusividad obtenida fue de 2.2104E-05 m²/s

$$\text{Ecuación 19. } D_{AB} \left(\frac{m^2}{s} \right) = \frac{1.00E10^{-7} \times T^{1.75} \times \left(\frac{1}{M_{NH_3}} + \frac{1}{M_{aire}} \right)^{\frac{1}{2}}}{P \times \left((\sum v_{NH_3})^{\frac{1}{3}} + (\sum v_{aire})^{\frac{1}{3}} \right)^2}$$

$$D_{NH_3 \rightarrow aire} \left(\frac{m^2}{s} \right) = \frac{1.00E10^{-7} \times ((13.5 + 273.15)^{1.75} \times \left(\frac{1}{17.031} + \frac{1}{28.97} \right)^{\frac{1}{2}}}{1 \times \left((20.1)^{\frac{1}{3}} + (14.9)^{\frac{1}{3}} \right)^2}$$

$$D_{NH_3 \rightarrow aire} \left(\frac{m^2}{s} \right) = 2.2104E10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

- Estimación de difusividad de amoniaco en agua. La estimación de la difusividad del amoniaco en agua se determinó mediante la correlación Wilke – Chang¹⁵⁶, que predice difusividades con desviación media de 10 a 15% para soluciones acuosas, la cual se utiliza cuando el soluto esta diluido con respecto al solvente, aspecto aprobado para el caso de estudio al observar la fracción molar x_0 y x_N obtenidas en el numeral 5.1.1 y 5.2.1.2, respectivamente. En esta ecuación φ es un parámetro de asociación del solvente catalogado para el agua como 2.6, M_B es el peso molecular del solvente, T es la temperatura en K, μ es la viscosidad dinámica del agua y v_A es el volumen molar del soluto que corresponde a 0.0258m³/kmol. La difusividad obtenida tiene un valor de 1.49539E-09 m²/s

$$\text{Ecuación 20. } D_{AB} \left(\frac{m^2}{s} \right) = \frac{(117,3E10^{-18}) \times (\varphi \times M_B)^{0.5} \times T}{\mu \times v_A^{0.6}} \times \frac{1}{2.3}$$

$$D_{NH_3 \rightarrow agua} \left(\frac{m^2}{s} \right) = \frac{(117,3E10^{-18}) \times (2.6 \times 18.01528)^{0.5} \times (40 + 273.15)}{6.5E10^{-4} \times (0.0258)^{0.6}} \times \frac{1}{2.3}$$

¹⁵⁵ GEANKOPLIS, Christie John. Procesos de transporte y principios de procesos de separación. 4th ed. CECSA pág. 439

¹⁵⁶ GEANKOPLIS, Christie John. Procesos de transporte y principios de procesos de separación. 4th ed. CECSA pág. 445.

$$D_{NH_3 \rightarrow agua} \left(\frac{m^2}{s} \right) = 1.4953E10^{-9} \frac{m^2}{s}$$

Nota 1: las ecuaciones para predecir difusividades de solutos diluidos en líquidos son semiempíricas por necesidad, pues la teoría de la difusión en líquidas todavía no está completamente explicada.

- Predicción de coeficientes de película de transferencia de masa de gas: los coeficientes individuales de transferencia de masa de película $k'_{y,a}$ y $k'_{x,a}$ dependen del número de Schmidt, las velocidades de masa de gas y líquido y la forma y el tamaño del empaque. El coeficiente de película $k'_{y,a} \left(\frac{kmol}{s m^3 fracción mol} \right)$ se estima mediante la ecuación 23. Para ello inicialmente es necesario estimar H_G (ecuación 22), conocida como la altura de una unidad de transferencia basada en la película de gas con unidades en metros, donde f_p es una proporción relativa del área total de interfase definida por el empaque seleccionado, en este caso con valor de 1.18 para los anillos de Pall de $1\frac{1}{2}$ "¹⁵⁷, G_L y G_G son las velocidades de masa de fase líquida y gaseosa definidas en la sección 5.2.5, y N_{Sc} corresponde al número de Schmidt (ecuación 21) calculado mediante la viscosidad dinámica de la mezcla gaseosa μ_G , la difusividad de amoníaco en aire $D_{NH_3 \rightarrow aire}$ y la densidad de la mezcla ρ_G . Al utilizar estas ecuaciones se obtiene un $k'_{y,a}$ de $1.3127E-01 \left(\frac{kmol}{s m^3 fracción mol} \right)$.

$$\text{Ecuación 21. } N_{Sc} = \frac{\mu_G}{\rho_G \times D_{NH_3 \rightarrow aire}}$$

$$\text{Ecuación 22. } H_G(m) = \left(\frac{0,226}{f_p} \right) \times \left(\frac{N_{Sc}}{0,660} \right)^{0,5} \times \left(\frac{G_L}{6,782} \right)^{-0,5} \times \left(\frac{G_G}{0,678} \right)^{0,35}$$

$$\text{Ecuación 23. } H_G = \frac{V}{k'_{y,a} \times A} \rightarrow k'_{y,a} = \frac{V}{A \times H_G}$$

- Predicción de coeficientes de película de transferencia de masa de líquido. El coeficiente de película $k'_{x,a} \left(\frac{kmol}{s m^3 fracción mol} \right)$ se estima mediante el uso de la ecuación 21, 24 y 25. En este caso, el número de Schmidt N_{Sc} se calcula al utilizar la difusividad en el medio líquido (amoníaco a través de agua) $D_{NH_3 \rightarrow agua}$ y la viscosidad dinámica y densidad del líquido μ_L y ρ_L , G_L nuevamente es la velocidad de masa de la fase gaseosa y f_p la proporción relativa del área total de interfase. Al reunir todos estos datos se obtuvo un valor de $3.4539E-3 \left(\frac{kmol}{s m^3 fracción mol} \right)$.

¹⁵⁷ MCCABE, Warren L. Operaciones unitarias en ingeniería química. Sexta ed. MCGRAW-HILL, 2007. 592 p. Tabla 18-1 ISBN 9789701061749

$$\text{Ecuación 24. } H_L(m) = \left(\frac{0,3577}{f_p} \right) \times \left(\frac{N_{Sc}}{372} \right)^{0,5} \times \left(\frac{\frac{G_L}{\mu_L}}{\frac{6,782}{0,8937E-3}} \right)^{0,3}$$

$$\text{Ecuación 25. } H_L = \frac{L}{k'_x a \times S} \rightarrow k'_x a = \frac{L}{S \times H_L}$$

Nota 1: las correlaciones de coeficientes de transferencia de masa son empíricas en alto grado. La confiabilidad de estas correlaciones no es muy satisfactoria, pues suele haber desviaciones hasta de un 25%.

- Cálculo de la altura de la torre (z (m)). Se determina la altura de la torre utilizando las ecuaciones 26 a 29. En esta metodología se obtiene la altura obteniendo el promedio entre $z_1(m)$ y $z_2(m)$.

$$\text{Ecuación 26. } z_1(m) = \frac{\frac{V_{mol \text{ promedio}}}{A} \times (y_1 - y_{N+1})}{k'_y a \times (y - y_i)_M}$$

$$\text{Ecuación 27. } (y - y_i)_M = \frac{(y_2 - y_{i2}) - (y_1 - y_{i1})}{\text{Ln}\left(\frac{y_2 - y_{i2}}{y_1 - y_{i1}}\right)}$$

$$\text{Ecuación 28. } z_2(m) = \frac{\frac{L_{mol \text{ promedio}}}{A} \times (x_N - x_0)}{k'_x a \times (x - x_i)_M}$$

$$\text{Ecuación 29. } (x - x_i)_M = \frac{(x_1 - x_{i1}) - (x_2 - x_{i2})}{\text{Ln}\left(\frac{x_1 - x_{i1}}{x_2 - x_{i2}}\right)}$$

$$\text{Ecuación 30. } z_{promedio}(m) = z_1(m) + z_2(m)$$

Para obtener $z_1(m)$, $V_{mol \text{ promedio}}$ corresponde al valor promedio de $V_{mol (N+1)}$ y $V_{mol 1}$, A es el área de sección transversal de la columna (calculada en la sección 5.2.6), y_{N+1} y y_1 son las fracciones molares de amoniaco en la fase gaseosa (véase figura 17). En el caso de y_{i2} y y_{i1} , evaluando la pendiente

$$\text{Ecuación 31. Pendiente punto PM} = -\frac{k'_x a / (1 - x_2)}{k'_y a / (1 - y_2)}$$

Para el caso de $z_2(m)$, $L_{mol \text{ promedio}}$ es el promedio entre $L_{mol (N)}$ y $L_{mol 0}$, A nuevamente es el área de sección transversal de la columna), x_N y x_0 son las fracciones molares de amoniaco en la fase líquida.

Obteniendo un valor promedio de $z_{promedio}(m)$ de 4.33m.

5.2.8 Aspectos de diseño adicionales. El empaque seleccionado a trabajar en el diseño corresponde a un empaque aleatorio de anillos de Pall de tamaño de $1 \frac{1}{2}$ ". Se sugiere que los empaques sean obtenidos con la empresa Chemical Packing, un complejo industrial de origen Chino que por su experiencia de dos décadas

permite fabricar productos de alta calidad.

Es posible que el gas que sale por la parte superior pueda acarrear pequeñas gotas de líquido de rocío, para ello se recomienda instalar un eliminador de rocío en forma de hojas corrugadas o una capada de malla para recolectar las gotitas de líquido.

5.3 PROPUESTA ECONÓMICA

La nitruración de las matrices se desarrolló durante el 2017 por la empresa Ferrotérmicos quien ofrecía el servicio de nitruración debido a que el proceso de nitruración no era posible desarrollar en la empresa por la custodia que presentaba sus aguas residuales frente a entidades de control ambiental. En la tabla 15 se muestran los costos anuales del año 2017 del servicio de nitruración el cual tiene un valor de 68'748,886 COP, que corresponde a 9,800 pesos COP por kilogramo de matriz nitrurada.

Tabla 15. Informe de costos de nitruración externa del 2017.

MES	TOTAL (kg)	Costo total (\$)
ENERO	334.96	\$ 3,282,608
FEBRERO	645.85	\$ 6,329,330
MARZO	337.64	\$ 3,308,872
ABRIL	657.72	\$ 6,445,656
MAYO	697.9	\$ 6,839,420
JUNIO	647.24	\$ 6,342,952
JULIO	280	\$ 2,744,000
AGOSTO	751.32	\$ 7,362,936
SEPTIEMBRE	632.82	\$ 6,201,636
OCTUBRE	445.58	\$ 4,366,684
NOVIEMBRE	1018.28	\$ 9,979,144
DICIEMBRE	259.76	\$ 2,545,648
BALANCE DEL AÑO	6709.07	\$ 65,748,886
COSTO POR KILOGRAMO DE MATRIZ NITRURADA		\$ 9,800

Fuente: Elaboración propia.

Si se desarrollara el proceso de nitruración internamente, el proceso de nitruración obtendría un costo productivo el cual se ve reflejado en el consumo de amoníaco, consumo de agua y energía, y horas trabajadas por los operarios obteniendo un valor por nitruración de \$270,298.52 pesos COP, como se muestra en la tabla 16 donde se muestra el costo promedio de un proceso de nitruración y el costo por cada kilogramo de matriz nitrurada desarrollada en la empresa.

Tabla 16. Costos de producción promedio del proceso de nitruración en la empresa (dato obtenido a partir de la base de datos del año 2014 – 2015)

Gastos		Valor promedio	Costo por unidad	Costo total
Insumo	Amoniaco (kg)	11.54	\$3,448	\$ 39,789.92
Servicios públicos	Energía (kWh)	260.59	\$ 438	\$ 114,138.42
	Agua (m3)	10	\$ 6,711	\$ 67,110
Mano de obra	Operario 1 (h)	4.5	\$ 5,473	\$ 24,630.09
	Operario 2 (h)	4.5	\$ 5,473	\$ 24,630.09
			Costo de proceso de nitruración	\$ 270,298.52
			Masa de matrices promedio por nitruración (kg)	78.9
			Costo por kilogramo de matriz nitrurada	\$ 3,425.83

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la tabla 15 y 16 se comprueba que desarrollar la nitruración en la empresa ofrecería un ahorro de 6,374 pesos COP por kilogramo de matriz nitrurada, que correspondería a un ahorro del 65%; sin embargo, la limitación actual para no ejecutar el proceso internamente radica en la dificultad actual de manejar los vertimientos de agua residual de manera apropiadamente.

También se observa que el 25% de los costos totales de un proceso de nitruración en la empresa se ve reflejado en el consumo de agua, porcentaje que aunque no es alto, evaluando un año obtiene un resultado de hasta \$16'441,950 (costo por unidad de agua * valor promedio consumido * capacidad de 245 procesos de nitruración al año).

A continuación se muestra la inversión requerida, los costos de operación y la viabilidad económica del proceso de extracción de amoniaco por arrastre de aire emitido.

5.2.1 Viabilidad económica. A continuación se muestra el costo de inversión de la propuesta de nitruración y los costos de operación del proceso de nitruración y de la torre de desorción los cuales se compara con el costo actual de nitruración, en este caso, el servicio prestado por la empresa Ferrotérmicos.

Los costos de inversión se ven reflejados en la tabla 17, estos consisten en los elementos de instrumentación y control de proceso, sistema de transporte de fluidos, costo de hora hombre en la fabricación de la torre y costo de los elementos

representativos de la torre. Es importante indicar que estos costos son costos generales del diseño y aproximados, algunas obtenidas por cotizaciones formales.

Tabla 17. Costo de inversión de la torre de desorción.

Ítem	Descripción	Parámetro	Cantidad	Costo por unidad	Costo total
Elementos de instrumentación y control	Válvulas de control de agua	und	3	\$ 70,000	\$ 210,000
	Válvula de control de flujo de aire	und	2	\$ 171,500	\$ 343,000
Sistema de transporte de fluidos (tubería y sus componentes)	Red para agua	m	10	\$ 5,033	\$ 50,330
	Instalación externa de red neumática	m	14	\$ 250,000	\$ 3,500,000
Hora hombre	Operario de mantenimiento	h	36	\$ 9,134	\$ 328,824
Elementos representativos de la torre	Cilindro envolvente	m	4.5	\$ 150,667	\$ 678,000
	Manguera generador de burbujas	m	3	\$ 8,500	\$ 25,500
	Manguera neumática ingreso de aire al sistema	m	12	\$ 8,500	\$ 102,000
	Soporte de empaques	und	1	\$ 30,000	\$ 30,000
	Empaque de anillo de Pall	und	2000	\$ 250	\$ 500,000
Costo total					\$ 5,767,654

Fuente: Elaboración propia.

Algunas características a tener en cuenta en relación al diseño de la torre y los costos de fabricación indicados en la tabla 17 son:

- Se sugiere el uso de válvulas de mariposa. Estas válvulas permiten regular el flujo, se destacan por ser muy precisas y requieren muy poco mantenimiento. Sin embargo, no puede instalarse si no es por medio de bridas (elemento de transición entre un tubo y una válvula).
- Los operarios del área de mantenimiento de la empresa Aluica SAS serán los responsables de fabricar la torre de desorción. El salario de un operario de mantenimiento sin parafiscales tiene un costo por mes de 1'408,470.
- El cilindro envolvente sugerido consiste en un tubo de pared estructural, fabricada en un proceso de doble extrusión, con pared interior lisa y exterior corrugada que cumple con características como hermeticidad, resistencia a la corrosión y abrasión, resistencia al impacto y óptimo comportamiento hidráulico el cual es ofrecido por la empresa PAVCO. El tamaño sugerido corresponde a 250mm de diámetro y 4.50m de longitud.
- Mediante manguera neumática es posible diseñar un generador convencional de burbujas adaptable al proceso establecido.
- Es necesario el uso de un regulador de flujo de aire a la salida y entrada del del sistema el cual permita medir de manera efectiva el flujo volumétrico instalado en la torre.
- La vida útil de un empaque de Pall de polipropileno se encuentra entre 1 a 5 años. Su compra es únicamente una inversión inicial, en el anexo K se muestra una cotización por parte de la empresa *ISAPINHER*.
- La tubería utilizada para el transporte del agua residual debe adaptarse al sistema de transporte actual del proceso de nitruración, esta se encuentra en PVC con un diámetro de 25.4mm y tendrá un recorrido de aproximadamente 10m.
- La salida de la corriente gaseosa tiene un recorrido de tubería en de aproximadamente 14m. Se recomienda que este sistema sea desarrollado por una empresa tercera que brinde el servicio, puede considerarse la empresa SFM compresores, proveedor actual de la empresa Aluica SAS en el manejo, compra y mantenimiento de los compresores y secadores instalados en la empresa.

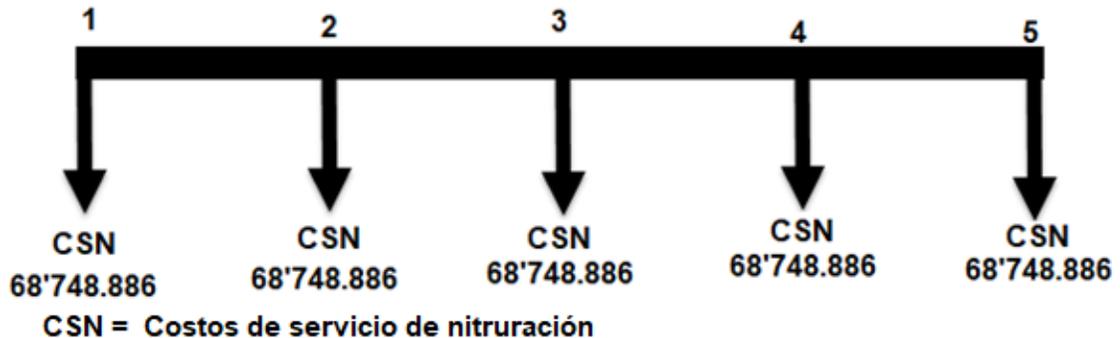
En el caso de los costos de operación, estos se ven reflejados únicamente en el costo del consumo de energía para producción de aire. No se incluye costos como la mano de obra debido a que la torre de desorción puede ser operada por los operarios encargados del proceso de nitruración, en donde los tiempos utilizados en la verificación del proceso de nitruración deben ser aprovechados paralelamente para la verificación y operación de la torre de desorción. Tampoco se incluye el consumo de agua debido a que el costo debe ser emitido directamente al proceso de nitruración, más no en el proceso de tratamiento de agua, ya que sin o con la

torre desorción el uso del agua en la nitruración es necesario y obligatoria. Adicionalmente, el sistema no tiene consumibles continuos en donde por ejemplo, los anillos de Pall tienen una durabilidad entre 1 y 5 años.

Es importante indicar que en la empresa no se tiene claro cuánto es el costo que se está generando en la producción de aire, es por ello que este valor se obtuvo bajo literatura, donde se informa que para producir 80CFM (38L/s) se consumen hasta 16kW/h, obteniendo un costo de 3,000 pesos COP por kW/h, obteniendo un consumo anual de 15'000,000 aproximadamente¹⁵⁸. En el diseño expuesto se requieren 64.45L/s lo cual obtendría un costo anual de 30'000,000 (se supone una relación directamente proporcional entre las variables de consumo de aire, consumo de energía y su costo).

Finalmente, a partir de estos datos se determina el costo – beneficio, también conocido como el índice neto de rentabilidad, que compara directa los beneficios y los costos del proyecto. De esta manera se comparan los costos del proyecto (costo de operación de nitruración en la empresa, costo de inversión de la torre desorción y costo de operación de la misma), con el costo del servicio de nitruración emitido por la empresa Ferrotérmicos anual. La evaluación se desarrolla con un período de tiempo de 5 años donde se suponen constantes los costos evaluados (sin presencia de inflación). En la figura 18 se muestran un esquema representativo de los costos actuales y en la figura 19 los costos con la propuesta técnica evaluado a los cinco años.

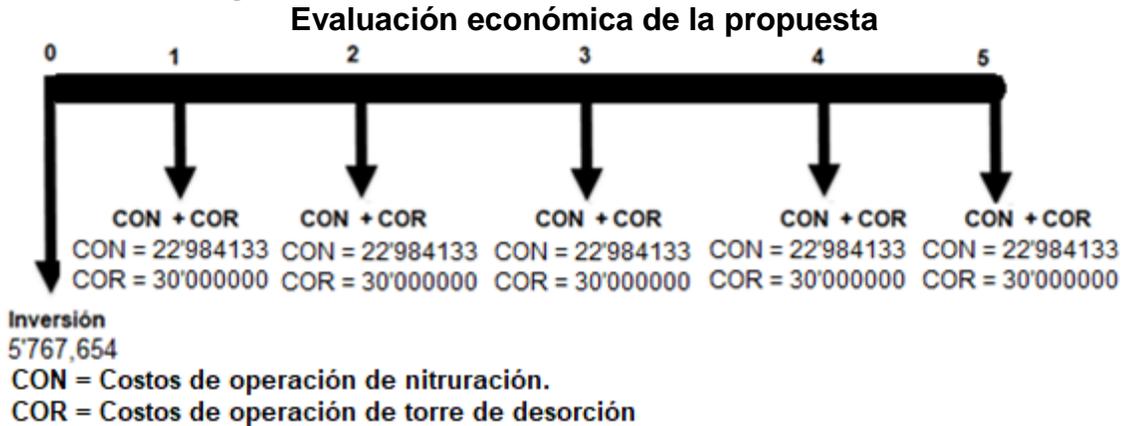
Figura 18. Esquema de representación de los costos actuales
Evaluación económica actual



Fuente: Elaboración propia.

¹⁵⁸ ORDOÑEZ, Jorge Luis. Optimización en la generación de aire comprimido: Menores gastos energéticos, mejores costos operativos. En: M&M.

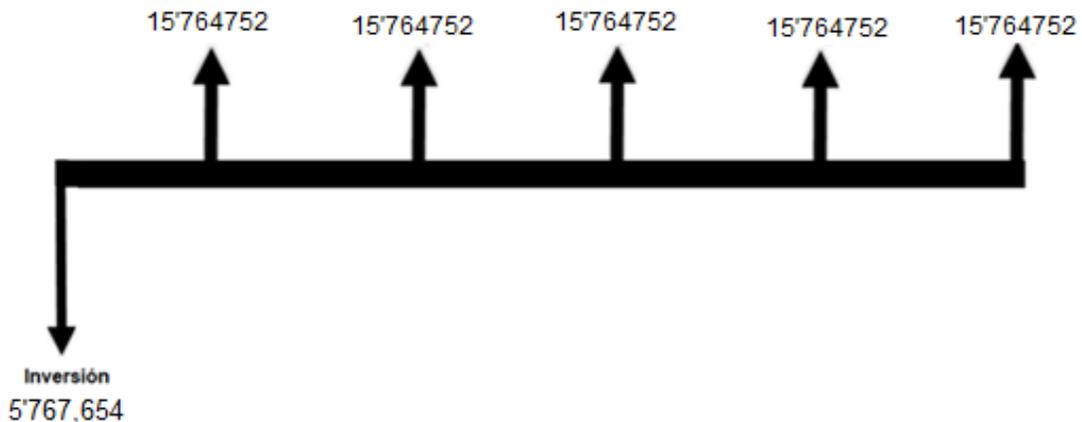
Figura 19. Esquema de representación de los costos de la propuesta técnica del tratamiento de agua.



Fuente: Elaboración propia.

Al evaluar los costos actuales con los costos de la propuesta se observa una recuperación anual de aproximadamente 15'764,752 pesos COP, en la figura 20 se muestran el balance económico obtenido. Ahorro que puede ser aprovechado para desarrollar proyecto de mejora en el mismo proceso productivo de nitruración.

Figura 20. Diagrama de evaluación financiera



Fuente: Elaboración propia.

Así, al determinar el costo – beneficio (B/C) utilizando la ecuación 47, con una tasa interna de oportunidad (i), correspondiente a la rentabilidad mínima que se espera ganar al llevar a cabo dicha inversión de 0.1025, obtiene un valor de 10.29, lo cual indica que el proyecto es viable y rentable, permitiendo la obtención de 10.29 pesos COP en beneficio por cada 1 peso en los costos.

$$\text{Ecuación 32. } B/C = \frac{\frac{CON+COR-CSN}{(1+i)^1} + \frac{CON+COR-CSN}{(1+i)^2} + \frac{CON+COR-CSN}{(1+i)^3} + \frac{CON+COR-CSN}{(1+i)^4} + \frac{CON+COR-CSN}{(1+i)^5}}{Inversión}$$

6. CONCLUSIONES

- Se realizó el diagnóstico del proceso de nitruración observando mediante la gráfica de control de Shewhart que el proceso de nitruración no se encontraba bajo control estadístico, donde entre proceso y proceso se obtenían resultados dispersos, esto generó la revisión física y técnica del equipo desarrollando un mantenimiento preventivo y la actualización del protocolo del proceso de nitruración, aspectos que promovieron el correcto desarrollo del proceso y la minimización de su variabilidad.
- La caracterización física y química del agua residual del proceso de nitruración determinó un pH fuertemente alcalino promedio de 10.62, una temperatura promedio de 40.4°C y un flujo volumétrico de salida promedio de 0.1163 L/s, parámetros que fueron medidos directamente durante el proceso. Adicionalmente, las características evaluadas por el laboratorio Quimicontrol permitieron reconocer una concentración de hasta 3.74mg/L de nitratos, 2.60mg/L de nitritos, 0.216mg/L de hierro, menos de 0.011mg/L de cromo y una concentración de nitrógeno amoniacal que alcanzó un valor de hasta 1330mg/L. Al contrarrestar los resultados con la Resolución 0631 del 2015 se observa el incumplimiento de los parámetros de pH y temperatura frente a los límites permisibles en vertimientos de aguas no domésticas al alcantarillado, en el caso del hierro y cromo los valores obtenidos están dentro de los límites establecidos, para las concentraciones de nitratos y nitritos los valores se catalogan como trazas, mientras que el valor de nitrógeno amoniacal resulta importante de considerar.
- A partir del método de sumas ponderadas se valoraron nueve (9) métodos de tratamiento de agua para la eliminación de amoníaco mediante la evaluación de nueve (9) criterios técnicos, económicos y ambientales. El desarrollo de la matriz de selección de alternativas determinó que la opción más apropiada para ejecutar el tratamiento del agua residual del proceso de nitruración corresponde a la “Extracción de amoníaco por arrastre de aire” el obtuvo un resultado de 3.9612.
- Se realizó la evaluación de dos diseños de extracción de amoníaco por arrastre de aire: (1) torre empacada con anillos de Pall y (2) torre inundada por microburbujeo. Los resultados mostraron una eficiencia en la eliminación de amoníaco del agua residual del proceso de nitruración para la torre empacada con anillos de Pall de 43.55% (en promedio), que supera la eficiencia obtenida en la torre inundada por microburbujeo de 18.42% (en promedio). Los resultados también mostraron una disminución del flujo volumétrico del aire dentro de la torre empacada de 52.54%, menor que la disminución en la torre por microburbujeo que obtuvo un valor de 84.47%.
- Se diseñó una torre empacada con anillos de Pall de 1 1/2” como propuesta para el tratamiento del agua residual del proceso de nitruración. La torre

empacada diseñada cuenta con un diámetro de 24.70cm y una altura de 4.33m con una eficiencia de proceso de 7% a partir de agua residual con concentración aproximada de 15445.92mg/L. El diseño propuesto permite comprobar mediante la medición de la relación costo beneficio que el proyecto de tratamiento de las aguas residuales del proceso de nitruración es una inversión rentable, relación que obtuvo un valor de 10.29.

7. RECOMENDACIONES

- Evaluar en detalle el proceso de nitruración para buscar oportunidades de mejora definidos directamente en la disminución de sus costos.
- Implementar métodos de control de proceso para la nitruración que permitan que el proceso se mantenga bajo control estadístico en función del tiempo.
- 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 microburbujeo.
- Evaluar la eficiencia de eliminación de amoníaco con varios sistemas de generación de microburbujeo.
- Evaluar la eficiencia de un diseño mixto entre la torre empacada con anillos de Pall y la torre inundada por microburbujeo.
- Considerar la transferencia de calor en el diseño desarrollado para evaluar el comportamiento de la temperatura dentro del sistema de recirculación del agua en el proceso de nitruración.
- Definir en detalle el diseño de la torre empacada propuesta y los correspondientes costos del proyecto.
- Evaluar torre de absorción para eliminar el amoníaco del aire mediante una torre a contraflujo con ácido sulfúrico para la producción de sulfato de amonio.

8. BIBLIOGRAFÍA

- ABBAS, Ghulam, et al. Ammonia Nitrogen Removal by Single-stage Process: A Review. En: JOURNAL OF THE CHEMICAL SOCIETY OF PAKISTAN. p. 775-782
- ACEROS SISA. Aceros SISA H13. Mexico: 2012. 1-2
- ACQUATRON S.A. Declaración. 1-2
- ALCATI. Extrusión del aluminio [0]. Disponible en: <http://www.alcati.es/extrusion-aluminio.html>
- ALUICA. Productos Aluica. [0]. [Consultado el 10/03/2018]. Disponible en: <http://www.acerosaluminios.com/pages/detail/obras-civiles.html>
- AMSTUTZ, Veronique, et al. Effects of carbonate on the electrolytic removal of ammonia and urea from urine with thermally prepared IrO₂ electrodes. En: JOURNAL OF APPLIED ELECTROCHEMISTRY. p. 787-795
- AOI, Y., et al. Single-stage autotrophic nitrogen-removal process using a composite matrix immobilizing nitrifying and sulfur-denitrifying bacteria. En: APPLIED MICROBIOLOGY & BIOTECHNOLOGY. p. 124-130
- ARCE, Enrique. Introducción al diseño básico de los procesos químicos. México: Instituto Politécnico Nacional, 2011. 135-146 p.
- Artículos informativos y noticias. Las desventajas del intercambio iónico.
- ARVELO, Ángel Francisco. Gráficas de control. 2006.
- BASAKCILARDAN, Sibel; IPEKOGLU, Nursen & TALINLI, Ilhan. Recovery of Ammonia from Human Urine by Stripping and Absorption. En: ENVIRONMENTAL ENGINEERING SCIENCE. p. 615-624
- 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/queson-burbujas/>
- BESORA. Anillo tipo Pall: Relleno para torres. [1]: Río Tercero, Córdoba, Argentina:
- BO, Tang. Review of recent developments on membrane technology for wastewater treatment. En: OXIDATION COMMUNICATIONS. p. 2589-2599
- BROOKS, Matthew & CHAIRMAN, Adil. Breakpoint chlorination as an alternative means of ammonia nitrogen removal at a water reclamation plant; Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999.
- CAPODAGLIO, Andrea; HLAVINEK, Petr & RABONI, Massimo. Physico chemical technologies for nitrogen removal from wastewater: a review. En: AMBIENTE Y AGUA. May 21,

CARRERA, Julián. Eliminación biológica de nitrógeno en un efluente con alta carga. Estudio de los parámetros del proceso y diseño de una depuradora industrial. Universidad Autónoma de Barcelona,

CAVAZOS, José Luis. Tratamiento térmico de una aleación de aluminio 6063. Universidad Autónoma de Nuevo León, 1998.

CENGEL, Yunus & CIMBALA, John. Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones. 1st ed. McGraw Hill, 2006.

CENTER FOR PUBLIC ENVIRONMENTAL OVERSIGHT. Air Stripping. [0]. [Consultado el 09/04/2018]. Disponible en: <http://www.cpeo.org/techtree/ttdescript/airstr.htm>

CHAMORRO, Jorge. Nitrificación-desnitrificación. Fangos activos. [0]. [Consultado el 14/05/2018]. Disponible en: <https://www.iagua.es/blogs/jorge-chamorro/depuracion-principiantes-v-4-nitrificacion-desnitrificacion-fangos-activos>

CHEN, Jinluan; SHI, Hanchang & LU, Jinghua. Electrochemical treatment of ammonia in wastewater by RuO₂-IrO₂-TiO₂/Ti electrodes. En: JOURNAL OF APPLIED ELECTROCHEMISTRY. Oct.vol. 37, no. 10, p. 1137-1144

CHEN, Xiaofeng, et al. Nitrification and denitrification by algae-attached and freeliving microorganisms during a cyanobacterial Bloom in Lake Taihu, a shallow Eutrophic Lake in China. En: BIOGEOCHEMISTRY. p. 135-146

CHILET, Andres & ESTRELA, Vania. Comparación entre columnas de platos y columnas de relleno. [0]: Lima, Perú: Universidad Nacional del Callao,

COBZARU, Claudia, et al. Ammonia removal from aqueous solution by ion exchange using clinoptilolite and verification of the process through a numerical study. en: progress of CRYOGENICS AND ISOTOPES SEPARATION. p. 27-34

D3A Distribuidores Ambientales S.A.S. Transporte y disposición final adecuada de Residuos Peligrosos y especiales. [0]. Disponible en: <https://d3adistribuidoresambientales.blogspot.com/>

DARWISH, Mohamad, et al. Ammonium - Nitrogen recovery from wastewater by Struvite crystallization technology. En: SEPARATION & PURIFICATION REVIEWS. p. 261-274

DE SILVA, Frank. Folletos Informativos de Tecnología de Aguas Residuales de la EPA : Extracción de Amoníaco por Arrastre de Aire; [0]. [Consultado el 09/04/2018]. Disponible en: <https://www.estrucplan.com.ar/Producciones/imprimir.asp?IdEntrega=1875>

DELGADO, Gabriela. Estudio de filtros cerámicos para el diseño y desarrollo de sistemas domésticos de bajo costo

DEMIRKIRAN,AR; FULLEN,M. & WILLIAMS,C. Physicochemical and oil adsorption characteristics of zeolites clinoptilolites Review. En: OXIDATION COMMUNICATIONS. p. 2704-2721

DR. CALDERON AND LABS. Toma y preservación de muestra. [1]:1999.

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

FEDERACIÓN DE ENSEÑANZA DE ANDALUCÍA. Tratamientos termoquímicos. En: TEMAS PARA LA EDUCACIÓN. May 14,.vol. 1989 - 4023, p. 1-10

FENG, Chuanping, et al. Registro detallado Título: Electrochemical Technology Applied in Treatment of Wastewater and Ground Water. 2012. 2-5 p. ISBN 9781612097725. 9781620816820.

FERNANDEZ, Antonio, et al. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. [0]: Madrid:

FERNANDEZ, German. Operación unitaria de absorción y desorción [0]. Disponible en: <http://www.industriaquimica.net/absorcion-y-desorcion.html>

FERNANDEZ, Jhonatan. Desarrollo de procesos termoquímicos para el tratamiento simultáneo de envejecimiento y nitruración en plasma de aceros Maraging. Pamplona.: Universidad Pública Navarra, 2015.

FERROTÉRMICOS. Tratamientos térmicos; [0]. Disponible en: <http://ferrotermicos.com/nuestros-tratamientos/tratamientos-termicos/>

FRANÇOIS DE DARDEL'S. Métodos de regeneración de una columna de intercambio iónico. [0]:2017.

GARCIA, María del Carmen. Regeneración de Zeolita Clinoptilolita empleada para la remoción de amonio; Universidad Autónoma del Estado de México, 2002.

GEANKOPLIS, Christie John. Procesos de transporte y principios de procesos de separación. 4th ed. CECSA, 669-704 p.

Gestión de compras. Perfiles de aluminio; [0]. Disponible en: <http://www.gestiondecompras.com/es/productos/conformado-de-tubos-y-perfiles/perfiles-de-aluminio>

GILPAVAS, Edison. Heurística de torres; [0]: Medellín Colombia:

GONZALEZ, Rodrigo. Matriz de Pugh: Ayuda a la toma de decisiones. [0]. [Consultado el 14/05/2018]. Disponible en: <https://www.pdcahome.com/2569/matriz-de-pugh-ayuda-a-la-toma-de-decisiones/>

GT LABORATORIO. Nitratos. [0]:1-2

Guía de los tratamientos de las deyecciones ganaderas: Nitrificación y desnitrificación [0]. [Consultado el 09/04/2018]. Disponible en: <http://www.arc-cat.net>

HALBINGER, Christian; RAMIREZ, Rosa & DURAN, Alfonso. Eliminación de amoniaco en aguas residuales clarificadas por el proceso de intercambio iónico con zeolitas. En: INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM. México.

Handbook of pulping and papermaking. 2nd, b.

HANNA INSTRUMENTS SAS, Nitrificación / desnitrificación; [0]. [Consultado el 15/04/2018]. Disponible en: <http://www.hannainst.es/blog/nitrificacion-desnitrificacion/>

HARRIOT, Peter; MCCABE, Warren L. & SMITH, Julián C. Operaciones unitarias en ingeniería química (7a. ed.). México, D.F: McGraw-Hill Interamericana, 2007.

HERVAS, José Antonio. Determinación de nitrógeno total y amoniacal [0]:

HIGALGO, Dolores. Estruvita: Ese oro blanco procedente de los residuos. [0]:2014. 1-4

HUANG, Jianyin, et al. Removing ammonium from water and wastewater using cost effective adsorbents: A review. En: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES. vol. 63, p. 174-197

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

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

IDEAM. Resolución 0010 del 10 de Enero del 2017. (10/01/). 2017.

IDRECO SUDAMERICANA S.A. Generalidad sobre el intercambio iónico. Conceptos introductorios. En: Seminario de agua y energía (25 y 26 de Septiembre). 1990.

INFAS CONTROL. Repetibilidad y reproducibilidad. [0]:2018.

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES MARINAS Y COSTERAS. Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos (aguas, sedimentos y organismos). [0]: Santa Marta: 2013.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. Bogotá D.C. El instituto, 2018. 153P. ISBN 978 -958-8585-67-3.

JABESA, Abdisa & GHOSH, Pallab. Removal of diethyl phthalate from water by ozone microbubbles in a pilot plant. En: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT. vol. 180, p. 476-484

JAFARIA, Mohammad, et al. Experimental optimization of a spray tower for ammonia removal. En: ATMOSPHERIC POLLUTION RESEARCH. p. 1-8

JEON, Jong Woo & LEE, Dong Hoon. Gas Membranes for CO₂/CH₄ (Biogas) Separation: A Review. En: ENVIRONMENTAL ENGINEERING SCIENCE. p. 71-85

JIMENEZ, Daniel. Matriz de prioridades Herramientas para implementar ISO 9001. [0]. [Consultado el 14/05/2018]. Disponible en: <https://www.pymesycalidad20.com/matriz-de-prioridades-iso-9001.html>

KAILEAN CONSULTORES. Los gráficos de control de Shewhart: principios básicos. [0]:2017.

KARRI, Rama; SAHU, Jaya & CHIMMIRI, Venkateswarlu. Critical review of abatement of ammonia from wastewater. En: JOURNAL OF MOLECULAR

KARTOHARDJONO, Sutrasno, et al. The removal of dissolved ammonia from wastewater through a polypropylene hollow fiber membrane contactor; En: INTERNACIONAL JOURNAL OF TECHNOLOGY. p. 116-1152

KEY TO METALS, A G. Gas Nitriding; [0]. [Consultado el 11/02/2018]. Disponible en: <http://www.totalmateria.com/articles/Art132.htm>

KIM, Kwang -. Wook, et al. Electrolytic decomposition of ammonia to nitrogen in a multi-cell-stacked electrolyzer with a self-pH-adjustment function. En: JOURNAL OF APPLIED ELECTROCHEMISTRY. p. 1415-1426

LABORATORIOS DE QUÍMICA AMBIENTAL, IDEAM. Toma y preservación de muestras. [0]. Julio de. [Consultado el 15/01/2018]. Disponible en: http://www.drcalderonlabs.com/Metodos/Analisis_De_Aguas/Toma_De_Muestras.htm

LI, Julia. Anillos de Pall plástico [0]. [Consultado el 04/10/2018]. Disponible en: <http://chemicalpacking.es/6-2-plastic-pall-ring.html>

LIQUIDS. vol. 261, p. 21-31

LONDOÑO, Adela; GIRALDO, Gloria & GUTIERREZ, Adamo. Métodos analíticos para la evaluación de la calidad fisicoquímica del agua; 1st ed. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2010.

Los contactores de membrana Liqui-Cel® mejoran la calidad del agua y el rendimiento de la EDI [0]:2005.

MEDINA, Nedila. Elaboración de un plan de manejo ambiental para la conservación de la sub cuenca del río san pablo en el cantón la maná, provincia de COTOPAXI. Universidad de Colima, 2002. p. 25-26.

MERKEL, Alexander. CLIMATE-DATA.ORG. [0]:

MONTALVÁN ESTRADAI, Adelmo, et al. Análisis multicriterio para la gestión integrada de aguas residuales industriales. En: INGENIERÍA INDUSTRIAL. p. 56-67

MONTES GARIBALDI, José Aurelio. Capítulo III: Tipos de regeneración y selección de regenerantes. p. 64-81.

MOROS, Pablo José. Técnicas analíticas. Escuela de negocios, 2008a. p. 13-22.

MOROS, Pablo José. Técnicas analíticas. Escuela de negocios, 2008b. p. 6.

MUNIRASU, Selvaraj; HAIJA, Mohammad Abu & BANAT, Fawzi. Use of membrane technology for oil field and refinery produced water treatment--A review. En: Process safety & environmental protection: transactions of the institution of chemical engineers part B. p. 183-202

NELSON, Lloyd. The Shewhart Control Chart—Tests for Special Causes. En: JOURNAL OF QUALITY TECHNOLOGY. p. 237-239

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. 6. ANALISIS Y SELECCION DE ALTERNATIVAS. [0]. 8. [Consultado el 14/05/2018]. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/003/v8490s/v8490s08.htm>

OZYONAR, Fuat; KARAGOZOGLU, Bunyamin & KOBYA, Mehmet. Air stripping of ammonia from coke wastewater. En: JESTECH. p. 85-91

PALLARES RUIZ, Jaime. Métodos de decisión multicriterio ELECTRE y TOPSIS aplicados a la aplicación de elección de dispositivos móvil. Universidad de Sevilla, 2015. p. 24-27.

PARMAR, Rajeev & MAJUMDER, Subrata Kumar. Microbubble generation and microbubble-aided transport process intensification—A state of the art report. En: CHEMICAL ENGINEERING AND PROCESSING: PROCESS INTENSIFICATION. p. 79-97

PATRICK WEYMER. Principles of gas nitriding; En: HEAT TREATING PROGRESS. p. 12-13

PERPIÑAN, Adrián Augusto. Metodología para la evaluación y selección de alternativas de aprovechamiento, ahorro y uso eficiente del agua en el sector institucional; Universidad Nacional de Colombia, 2013. p. 127-133.

POLLA, Patricia; CABALLERO, Fernando COLMAN, Esteban. Técnicas analíticas instrumentales. [0]:2016.

RIOS, Luis Guillermo & MUSTAFA, Yamal. Gases ideales: Diagramas termodinámicos; En: SCIENTIA ET TECHNICA. p. 449-454

RIU, Jordi. Gráficos de control de Shewhart. [0]: Universitat Rovira i Virgili:

RODRIGO González González. Matriz de Pugh: Ayuda a la toma de decisiones. [0]. [Consultado el 13/02/2018]. Disponible en: <https://www.pdcahome.com/2569/matriz-de-pugh-ayuda-a-la-toma-de-decisiones/>

SARDANS, Jordi; MONTES, Fernando & PEÑUELAS, Josep. Siguiendo la traza a los elementos traza. En: CENTRE DE RECERCA ECOLÒGICA I D'APLICACIONS FORESTALS.

SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO. Técnicas químicas analíticas. [0]. 22/03/. [Consultado el 20/01/2018]. Disponible en: <http://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Minerales/Tecnicas-quimicas-analiticas.html>

SEVERICHE, Carlos Alberto; CASTILLO, Marlon Enrique & ACEVEDO, Rosa Leonor. Manual de métodos analíticos para la determinación de parámetros fisicoquímicos básicos en aguas. [1]:2013.

SHALABY, Marwa & EL-RAFIE, Shadia. Struvite precipitation and phosphorous removal from urine synthetic solution: Reaction Kinetic Study. En: BULLETIN OF CHEMICAL REACTION ENGINEERING & CATALYSIS. p. 88-97

SOLIPLAST. Estiba: ¿Qué es una estiba? – Soluciones Logísticas. [0]. [Consultado el 10/10/2018]. Disponible en: <http://soliplast.com.co/estiba-una-estiba-soluciones-logisticas/>

Soluciones para desgasificación y gasificación de líquidos. [0]:2012.

SUBDIRECCIÓN DE HIDROLOGÍA GRUPO LABORATORIO DE CALIDAD AMBIENTAL. Instructivo para la toma de muestras de aguas residuales. [0]:2007. 1-17

TASK Environmental Engineering. NH₃ stripping tower absorber. [0]. [Consultado el 09/04/2018]. Disponible en: <http://task.be/en/content/nh3-stripping-tower-absorber>

Técnicas de Medida y Metalografía, S. A. Dureza Rockwell. [0]:2015.

UNIDAD DE REGENCIA QUÍMICA INSTITUCIONAL. Hoja de seguridad 18: Amoníaco. Costa Rica: Universidad de Granada. Espectroscopia atómica; [0]:1-2

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO. Medidas de variación: Rango, desviación estándar y coeficiente de variación. [0]:

VALIENTE, Antonio. Absorción; México D.F.: 2010.

VASQUEZ, Mario. Análisis volumétrico: Fundamentos; [0]. [Consultado el 14/05/2018]. Disponible en: <http://aprendeenlinea.udea.edu.co/lms/ocw/mod/page/view.php?id=170>

VIO, Juan. Guía de uso y manejo de amoníaco en la refrigeración de frutas y hortalizas frescas: plan de emergencias. [0]: Asociación de exportadores de fruta de Chile, 2012.

VIOTTI, Paolo & GAVASCI, Renato. Scaling of ammonia stripping towers in the treatment of groundwater polluted by municipal solid waste landfill leachate: study of the causes of scaling and its effects on stripping performance; En: AMBIENTE & AGUA. p. 240-252

WANG, Hongqiang & ZHANG, Lieyu. Research on the nitrogen removal efficiency and mechanism of deep subsurface wastewater infiltration systems by fine bubble aeration. En: ECOLOGICAL ENGINEERING. vol. 107, p. 33-40

WANG, Shunli, et al. Struvite precipitation as a means of recovering nutrients and mitigating ammonia toxicity in a two-stage anaerobic digester treating protein - rich feedstocks. En: MOLECULES. Wastewater treatment plant operator certification training. [0]:2016.

WEI, Irvine. Dynamics of breakpoint chlorination. [0]:3

YUAN, Min Hao, et al. Ammonia removal from ammonia rich wastewater by air stripping using rotating packed bed. En: PROCESS SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION. p. 777-785

Zaixing, Li, et al. Struvite precipitation for ammonia Nitrogen removal in 7-Aminocephalosporanic Acid wastewater; En: MOLECULES. p. 2126-2139

ZHANG, Yi-Min; HUANG, Wei & BAO, Shen-Xu. Treatment of industrial wastewater containing high levels of ammonia and salt using vacuum membrane distillation; En: APPLIED MECHANICS AND MATERIALS. p. 805-810

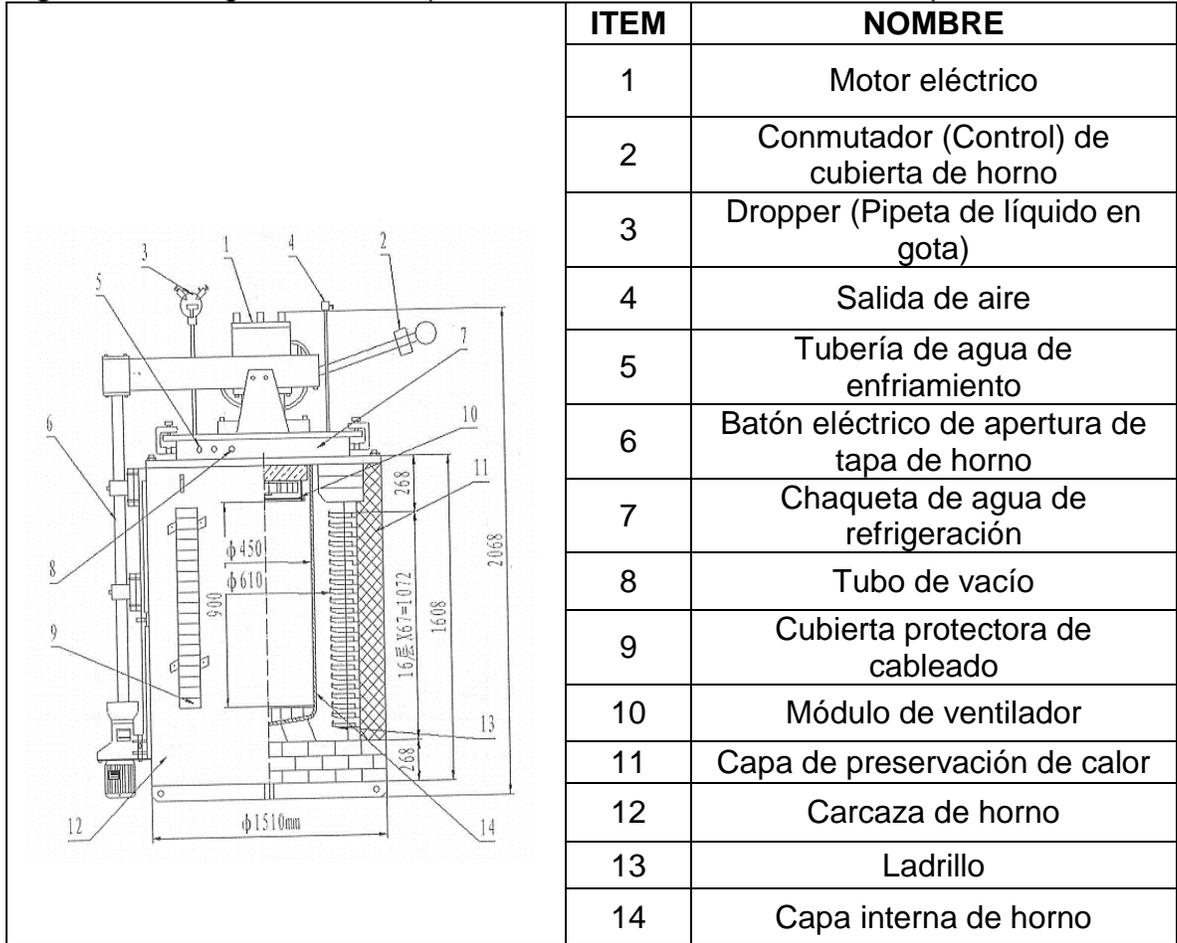
ZHENG, Tianlong, et al. Microbubble enhanced ozonation process for advanced treatment of wastewater produced in acrylic fiber manufacturing industry. En: JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS. vol. 287, p. 412-42

ANEXOS

ANEXO A

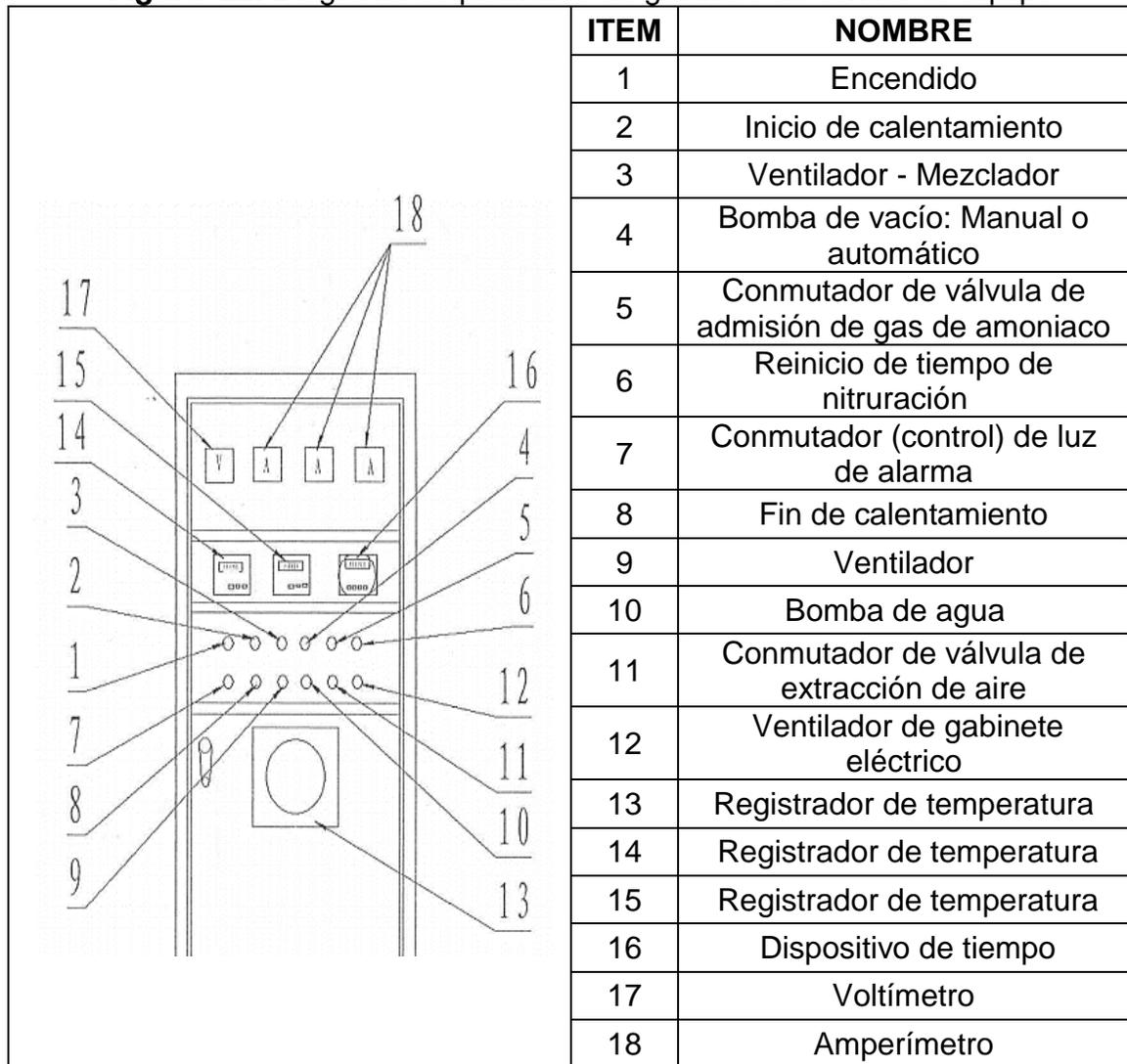
DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE HORNO DE NITRURACIÓN DE LA EMPRESA ALUICA S.A.S.

Figura 21. Diagrama de cuerpo de horno de nitruración de la empresa Aluica SAS



Fuente: Elaboración propia.

Figura 22. Diagrama esquemático de gabinete de control de equipo



Fuente: Elaboración propia.

ANEXO B

CÁLCULOS PARA EL DESARROLLO DE LA GRÁFICA DE CONTROL DE SHEWHART

A continuación se muestra la información de un lote del proceso de nitruración. Se recuerda que fueron revisados 128 lotes de la base de datos del año 2014 y 2015. Cada uno cuenta con la misma información registrada. La variable a evaluar es el aumento de dureza.

Tabla 18. Ejemplo de información suministrada por lote de nitruración.

Número de lote				574
Fecha				10/10/2018
Nombre de matriz	Masa de Matriz (kg)	Dureza inicial (Webster)	Dureza final (Webster)	Aumenta de dureza (Webster)
GTC001	16.4	46.7	50.1	3.4
CSP046M	6.7	46.8	50.1	3.3
FMC002	6.6	47.9	50.9	3
CSP046	8.6	54.3	56.9	2.6
T167M	10.4	47.5	49.9	2.4
ALU176M	6.9	48	49.9	1.9
T167	8	47.8	49.4	1.6
ALU176	7.7	49.5	51	1.5
CSP028	6.6	44	45.4	1.4
Total de matrices	9			
Masa total (kg)	77.9			
Amoniaco inicial (kg)		Amoniaco final (kg)		Consumo de amoniaco (kg)
154.2		142.4		11.8
Lectura energía inicial (kW/h)		Lectura energía final (kW/h)		Consumo de energía (kW/h)
7809.96		8089.79		279.83
Lectura de agua inicial (m3)		Lectura de agua final (m3)		Consumo de agua (m3)
111		116		5

Fuente: Elaboración propio.

Teniendo en cuenta la información suministrada se realizaron los siguientes cálculos para cada uno de los lotes (uso de programa Excel):

- Promedio de variable a evaluar por lote, \bar{X}_i : Calculado con la función "PROMEDIO", donde i representa cada lote de producción.

$$\text{Promedio de aumento de dureza lote \# 784} = 2.3$$

- Desviación estándar de variable a evaluar por lote, σ_i : Calculado con la función “DESVEST.M” que calcula la desviación estándar en función de una muestra, donde i representa cada lote de producción.

$$\text{Desviación estándar de aumento de dureza lote \# 784} = 0.7812$$

Al obtener el promedio y desviación estándar de la variable a evaluar en cada uno de los lotes se procede a calcular:

- Cálculo de línea central, $\bar{\bar{X}}$: La línea central representa la media o promedio global de la variable evaluada, la cual se obtiene sumando el promedio de cada lote \bar{X}_i dividido por el número total de lotes evaluados, el cual obtuvo un resultado de 2.803.

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n} = 2.803$$

- Desviación estándar global, σ_{global} : La desviación estándar global se calculó obteniendo el promedio de la desviación estándar de los lotes de producción, este tuvo un resultado de 1.630.
- Límite superior e inferior: A partir de un nivel de desviación de hasta 2 sigma, se calculó el límite superior y el límite inferior.

$$\text{Limite superior} = \bar{\bar{X}} + 2 * \sigma_{global} = 2.8403 + 2 * 1.630 = 6.063$$

$$\text{Limite inferior} = \bar{\bar{X}} - 2 * \sigma_{global} = 2.8403 - 2 * 1.630 = -0.457$$

A partir de los datos calculados por se diseña la gráfica de control la cual se muestra en la gráfica 1, en ella se ve representado el promedio de la variable a evaluar por lote, el límite central, límite superior e inferior. La descripción de la gráfica se indica en la sección 2.5.2.

ANEXO C

INFORME DE MANTENIMIENTO E INSPECCIÓN DE HORNO DE NITRURACIÓN DESARROLLADO POR LA EMPRESA SOLUCIONES ELECTRO INDUSTRIALES



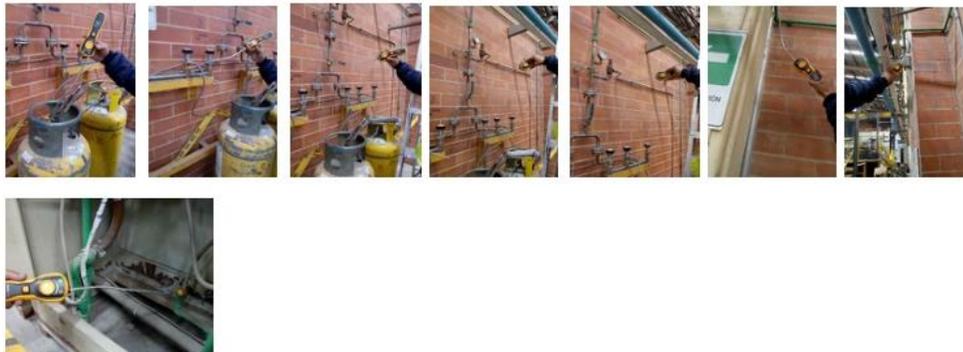
Bogotá 13 de Marzo de 2018

Señor(es):
ALUICA
Atn. JUAN DIEGO
Hemberth Bonilla
Carlos Usma
Calle 10ª #13B-02
Mosquera

INFORME INSPECCION HORNO NITRURADO

Detección de gas de amoníaco:

Se realiza inspección con el detector de gas de amoníaco, para verificar fugas a lo largo de la trayectoria de la tubería, desde los cilindros de distribución hasta la cuba del horno de nitrurado.



Las fotos muestran la Inspección, desde los cilindros de distribución hasta la entrada en el tablero de control de amoníaco. En toda esta trayectoria no se detectó fugas de amoníaco, la línea está presurizada con 80 PSI del gas de amoníaco. Los puntos inspeccionados son: válvulas de los cilindros, mangueras en acero inoxidable, válvulas de manifold, flanches, válvula de paso, uniones, manómetro, codos, tubería polipropileno y punto de descarga o de alivio.



Dentro del tablero se inspecciona las electroválvulas de distribución de gas que alimentan el manifold interno del tablero



Se detectó fuga en la entrada del caudalímetro, en el acople de la manguera, se elimina ajustando la tuerca de sellado.



Se realiza una prueba haciendo el ciclo completo de ingreso de amoníaco hasta la cuba, con el detector de gas de amoníaco se hacen mediciones alrededor del horno y no se detecta fugas.

INSPECCIÓN ELECTRICA

Se realiza la inspección del estado de los componentes eléctricos, físicamente se encuentran en buen estado, al comprobar su funcionamiento, están trabajando perfectamente.

En la inspección de funcionamiento de los motores de mide un cambio de corriente en el ventilador de recirculación (fan) se inspecciona las conexiones y se encuentran los cables recalentados y flojos, se procede a cortar la parte cristalizada del cable y conectar nuevamente el motor. Esto hace que el motor sufra un recalentamiento, y un desbalanceo de corrientes, que con el tiempo pueden llegar a dañar el bobinado del motor, las medidas de corriente se encuentran en la tabla al final de este informe.



Se reaprietan todos los terminales de conexión de cada componente eléctrico, se limpian y se hacen las mediciones de los componentes más relevantes del tablero.

FORMATO ENTREGA HORNO NITRURADO

INSPECCION Y MEDICION		ESTADO	MEDIDA
TUBERIA POLIPROPILENO	estado de la tubería físicamente por inspección visual	la tubería y los componentes que hacen parte del recorrido de gas de amoniaco se encuentran en buen estado	al medir cada componente no se detectan fugas
MANGUERAS INOXIDABLES	estado de las mangueras inspección visual	las mangueras inoxidable se encuentran físicamente buenas	Al medir fugas solo se encuentra una en la entrada caudalimetro, la cual se corrige.
CAUDALIMETRO	estado inspección visual	el caudalimetro que está en uso, se encuentra limpio, y en buen estado en apariencia	Al hacer pasar amoniaco por el caudalimetro no se detecta fugas.
VALVULAS DE AMONIACO	estado inspección visual	las válvulas eléctricas físicamente se ven en buen estado	al medir la corriente y hacer pasar gas por ellas se determina que están trabajando perfectamente y no hay presencia de amoniaco en el ambiente
	estado empaquetaduras	las empaquetaduras están en buen estado, se limpian y quedan perfectas	
	estado conectores	los conectores no están golpeados, físicamente están buenos	se reaprietan las conexiones quedan perfectos
	estado bobinas	las bobinas no están golpeadas y físicamente se ven muy bien	al medirlas se determina que están bien, trabajando perfectamente

TABLERO ELECTRICO	limpieza del tablero	el tablero está muy sucio , oxidado en la parte de los zócalos (base del tablero)	
	inspección visual de los componentes	los componentes se encuentran sucios pero en buen estado, ninguno esta maltratado	se le hacen pruebas de funcionamiento a cada componente, todos trabajando bien
	reapriete de borneras, conectores	las borneras se encuentran en buen estado	se procede a reapretarlas y limpiarlas
BOMBA VACIO (VACUM)	inspección visual del su estado	La bomba se encuentra falto de pintura, se detecta un goteo de agua en la cámara de la bomba, pero no influye en la producción de vacío, si sería bueno arreglarla.	
	medición corriente vacío		10 A
	medición voltaje		224 V
	medición corriente con carga		14,54 A
VENTILADOR RECIRCULACION (FAN)	inspección visual del su estado	el ventilador de recirculación (FAN) se encuentra falto de pintura,	
	medición corriente vacío	esta variación de corriente de debe que el motor sufrió recalentamiento por tener los bornes sueltos,	4,5 A - 3,5 ^a - 2,5 A
	medición voltaje		224V
	medición corriente con carga		4,5A - 3,5A - 2,5 A
VENTILADOR ENFRIAMIENTO (BLOWER)	inspección visual del su estado	el blower se encuentra falto de pintura	
	medición corriente vacío		1,23 A
	medición corriente con carga		1,70 A
	medición voltaje		225 V



SOLUCIONES ELECTRO INDUSTRIALES

MOTOR INVERSOR TAPA	inspección visual del su estado	El motor se encuentra falto de pintura	
	medición corriente subiendo la tapa		4,28 A
	medición corriente bajando la tapa		2,5 A
	medición voltaje		224 V
CUBA O RECIPIENTE	estado de la cuba inspección visual	La cuba se encuentra con oxido en su interior, los sellos de la tapa están muy aplastados, los seguros llenos de óxido.	
	estado de la empaquetadura	La empaquetadura esta aplastada, se visualiza desgaste en algunos puntos, mas donde se hace la presión con los seguros	
	estado de los seguros de sellado	los seguros funcionan bien, pero algo oxidados	
	medición voltaje		224 V
	medición corriente grupo 1		16-15-16 A
medición corriente grupo 2		12-15-11 A	
VALVULAS LLENADO DE AGUA	inspección visual del su estado	Las válvulas están nuevas	La válvula de llenado de agua que se encuentra en la parte inferior del tanque, no se cierra por efecto de la presión hidrostática, por eso siempre se ve que el rotámetro esta en movimiento consumiendo agua. Se puede colocar una válvula anti retorno para solucionar este inconveniente

ANEXO D

NUEVO PROTOCOLO DE PROCESO DE NITRURACIÓN.

1	Alistamiento de carga
2	Registro de agua, luz y amoniaco inicial
3	Verificación de nivel de agua en tanques
4	Activación de panel de control: "Power"
5	Activación de bomba de recirculación de agua "Exhaust fan".
6	Apertura del horno
7	Ingreso de la carga al horno
8	Sellamiento de tapa de horno
9	Encendido de resistencias de horno: "Heating up"
10	Revisión de temperatura de agua: Menor a 40°C
11	Encendido de ventilador de horno: "Fan"
12	Verificación de lectura de temperatura interior del horno hasta 450°C.
13	Encendido bomba de vacío: "Auto vacuum pump - Air evaporation valve"
14	Revisión de vacío de horno: No menor a -0.06Mpa
15	Apertura de válvula de cilindro de gas amoniaco
16	Verificación de presión de sistema: 50psi
17	Apertura de válvula de distribución de gas amoniaco en la red
18	Apertura de válvula de bola para ingreso de gas amoniaco al horno.
19	Activar ingreso automático de amoniaco al horno: "Auto ammonia gas".
20	Verificación de temperatura de resistencia mayor a 500°C
21	Revisar pilotos de mando activados de "vacuum pump", "ammonia gas" y "air evaporation valve"
22	Accionar el botón "Reclocking" y la "Alarma"
23	Verificar activación de temporizar al llegar a temperatura objetivo de 530°C
24	Proceso de nitruración: Tiempo de 12 horas
25	Suspensión automática de flujo de amoniaco, resistencias de calentamiento.
26	Encendido automático de ventilador de enfriamiento: "Blower auto"
27	Cierre de válvula de cilindro de amoniaco
28	Revisión de temperatura de horno menor a 100°C
29	Apagado de vacío de -0.06MPa a 0
30	Retiro de seguros de tapa de horno
31	Extracción de carga de horno
32	Cierre de válvula de agua
33	Apagado de recirculación de agua "Exhaust fan"
34	Desactivación de panel de control de horno
35	Revisión de consumo de agua, energía y amoniaco
36	Enfriamiento de carga al aire libre

ANEXO E

CERTIFICACIÓN DE INSPECCIÓN DEL ACERO H13 DE MATRICES DE EXTRUSIÓN



Our quality system is certified according to ISO 9001, TS 16949, NBR 15100 (AS 9100) and NADCAP (heat treatment and ultrasonic test). ISO 14001 Environmental Certification.

INSPECTION CERTIFICATE

ACC. TO EN 10204 3.1

CERTIFICATE 805094

Page 1/ 2

INVOICE 1852E16

CUSTOMER <i>EXCO TOOLING SOLUTIONS SAS</i>							
PURCHASE ORDER / ITEM <i>91806- / 01.07.2016</i>							
JOB ORDER	LOT	PACKAGE	NET WEIGHT	QUANTITY			
1698253	1698253	1698253/02	3,665 KG	1			
VILLARES GRADE				SIMILAR GRADE			
VH13/ISO				AISI H13			
DIMENSIONS		LENGTH RANGE		DRAWING NUMBER			
16.125 (-)0.000 (+)0.118		2,000 / 5,000					
PRODUCT		HEAT TREATMENT CONDITION			FINISHING		
Round Bar		Annealed			Rough Turned		
PRODUCT LINE		MELTING PROCESS				HEAT	
Forged		ELECTRIC ARC FURNACE				4852478	
CHEMICAL COMPOSITION (% in weight)							
Chemical Composition (% in weight)							
<i>C 0.37</i>	<i>Si 0.95</i>	<i>Mn 0.32</i>	<i>P 0.015</i>	<i>S 0.0017</i>	<i>Cr 5.11</i>	<i>Mo 1.26</i>	<i>Ni 0.11</i>
<i>V 0.84</i>	<i>W 0.02</i>	<i>Cu 0.13</i>	<i>Nb <0.01</i>	<i>Al 0.018</i>	<i>B <0.0005</i>	<i>Pb <0.0025</i>	<i>Sn 0.0073</i>
<i>As <0.005</i>	<i>Bi <0.005</i>	<i>H <0.00010</i>	<i>N 0.0104</i>				
SPECIFICATIONS							
NADCA 207 / 2016							
Microstructure according to specification NADCA							
<i>Result: Approved</i>							
APPROVED ACCORDING TO NADCA 207-2011, MICROSTRUCTURE: AS9, BAND.: ACCEPTABLE							
Cleanliness according to specification ASTM E45							
<i>A Thin: 0</i>		<i>B Thin: 1.5</i>		<i>C Thin: 0</i>			
<i>D Thin: 1.5</i>		<i>A Heavy: 0</i>		<i>B Heavy: 0</i>			
<i>C Heavy: 0</i>		<i>D Heavy: 0</i>					
<i>(ASTM E45 METHOD A)</i>							

ANEXO F

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DEL GAS AMONIACO



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DE MATERIALES

NOMBRE DEL PRODUCTO: AMONIACO

1. Producto Químico e Identificación de la Compañía

Cryogas S.A,
Carrera 50 # 52 – 50 Piso 10
Edificio Club Unión

NÚMERO DE TELÉFONO: (4) 5 14 50 00

NÚMERO DE TELÉFONO LAS 24 HORAS, PARA EMERGENCIAS:
Medellín: 3736950, Resto del País: 01 8000 514 300

NOMBRE DEL PRODUCTO: AMONIACO

NOMBRE QUÍMICO: Amoniaco

NOMBRES COMUNES /SINÓNIMOS: Amoniaco Anhidro; Anhidro Amoniaco

CLASIFICACIÓN IMO: 2.4 (9.2)

CLASIFICACIÓN WHMIS: A, E

PREPARADO POR: Departamento SHEQ

FECHA DE PREPARACIÓN: 06/01/1995

FECHA DE REVISIÓN: 04/2009

2. Composición, Información sobre los Ingredientes

INGREDIENTE	% VOLUMEN	PEL-OSHA ¹	TLV-ACGIH ²	LD ₅₀ o LC ₅₀ Ruta/Especie
Amoniaco FORMULA: NH ₃ CAS: 7664-41-7 RTECS #: BO0875000	100.0	50 ppm TWA	25 ppm TWA 35 ppm STEL	LC ₅₀ 2000 ppm/4H

¹ Como se indica en 29 CFR 1910, Subparte Z (revisado Julio 1, 1993)

² Como se indica en ACGIH 1994-95 Valores limite de umbral para Substancias Químicas y Agentes Fisicos

ANEXO G

PROTOCOLO DE MUESTREO DE AGUA RESIDUAL¹⁵⁹

Antes del muestreo

- Complete el formato de cadena de custodia suministrado directamente por el laboratorio la cual contiene la siguiente información: responsable de toma de muestra, información del muestreo, información de puntos de muestreo y de la muestra, variables a analizar, preservación, observaciones de campo, transporte, recepción de laboratorio y personal que entrega y recibe la muestra
- Organice las botellas, los reactivos e insumos del muestreo.
- Antes de dirigirse al punto de muestreo, etiquete cada una de los recipientes. El formato de la etiqueta contiene la siguiente información: fecha, hora, número de muestra, nombre del responsable, nombre del proceso, lugar de recolección, tipo de muestra, volumen de muestra y preservación realizada. Cubra el rótulo con una cinta adhesiva para evitar el deterioro.
- Realice la calibración del pHmetro.

En el lugar de muestreo

- Debido a que el laboratorio suministra los recipientes, no realice purga. Los preservativos presentes en el recipiente son:
 - Para amoníaco: H_2SO_4 a $\text{pH} < 2$.
 - Para nitrato y nitrito: almacenamiento de botellas dentro de nevera de icopor con bolsas de hielo suficiente para refrigerar manteniendo una temperatura de 4°C .
 - Para metales disueltos en general: HNO_3 a $\text{pH} < 2$. Se recomienda filtrar previamente.
- Mida el caudal del efluente por el método volumétrico manual. Coloque un balde bajo la descarga de tal manera que reciba todo el flujo; simultáneamente active el cronómetro. Tome un volumen de muestra entre 1 y 10 litros, dependiendo de la velocidad de llenado, mida el tiempo transcurrido desde el inicio hasta el final de la recolección de la descarga.
- Repita el proceso tres veces y determine el caudal promedio.
- A partir de la primera muestra tomada en el balde mida el pH y la temperatura.
- Descarte la muestra donde se determinaron los parámetros *in-situ* luego de su determinación, así como la segunda muestra.
- Con la tercera muestra llene el recipiente plástico mientras homogeniza el contenido (No agite directamente con la mano ni por rotación del balde). Deje un

¹⁵⁹ Gestión ambiental. Calidad del agua. Muestreo. Muestreo de aguas residuales

espacio de aire equivalente a aproximadamente 1% del volumen del recipiente, para permitir la expansión térmica durante el transporte.

- Evite la inclusión de objetos flotantes y/o sumergidos en la muestra.
- Tape cada botella y agítela. Seque la parte superior de la botella con papel absorbente o un trapo limpio.
- Selle el recipiente con papel auto adhesivo, este también debe contener el número de muestra, fecha y hora de muestreo. Adherir el sello de tal manera que sea necesario romperlo para abrir el recipiente de la muestra.
- No exponga las muestras a luz solar directa.

Después del muestreo

- Enjuague con agua destilada los baldes y todos los elementos utilizados en el muestreo.
- Lave los electrodos con abundante agua ya que los valores extremos que pueden presentar los efluentes industriales los deterioran rápidamente.

Coordinación para el transporte de las muestras

- Enviar junto a la muestra el formato de solicitud de análisis al laboratorio y el formato de cadena custodia. El laboratorio debe realizar la inspección del sello de la muestra, comparar la información de la etiqueta con el sello y con el registro y asignar un número para la entrada de laboratorio.

ANEXO H

INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE AGUA DE LABORATORIO

Muestra simple inicio



INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO

INFORME 2 OCA 1039-AG
9 de abril de 2018

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

Ingeniero
Juan Sebastián Fernandez Munillo
ALUICA S.A.S
Teléfono: 8931100 ext, 106
Dirección: Calle 10A #13B-02 Mz C, Bg6
e-mail: juan.fernandez@aluica.com.co
Bogotá D.C

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

ORDEN DE SERVICIO: 4723
FECHA RECEPCIÓN MUESTRA: 28 de marzo de 2018
MATRIZ: ARI
FECHA DE MUESTREO: 27 de marzo de 2018
TIPO DE MUESTREO: Puntual
PUNTO DE MUESTREO: Salida Proceso Nitruración Simple 12:00 pm
IDENTIFICACIÓN MUESTRA: 18-AG2399
OBSERVACIONES: Muestra tomada por el cliente y enviada al laboratorio



Variable	Unidad	Método	Fecha Análisis	Resultados	Incertidumbre
Nitratos, N-NO ₃ ⁻	mg/L	J. Rodier, Salicilato de Sodio	2018-04-02	3,21	±0.1284
Nitritos, N-NO ₂ ⁻	mg/L	J. Rodier, Reactivo de Zambelli	2018-03-28	0,684	±0.0274
Nitrógeno amoniacal, N-NH ₃	mg/L	SM 4500-NH ₃ B, C, Destilación y Volumétrico	2018-04-04	1333	±45.322
Cromo total, Cr	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llama	2018-04-07	< 0,011	±0.0006
Hierro total, Fe	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llama	2018-04-07	0,216	±0.0046

SM: "STANDARD METHODS For The Examination Of Water And Wastewater" 22ND EDITION, 2012. (A.A.): Absorción Atómica. (<): Menor que limite de cuantificación del método ARI. Agua Residual Industrial.

NOTA 1: Los resultados que se relacionan en este informe corresponden únicamente a la muestra analizada.

NOTA 2: La reproducción parcial de este informe será autorizada por el Laboratorio Quimicontrol Ltda.

NOTA 3: Las muestras serán eliminadas cuarenta y cinco (45) días después de haber sido recibidas.

NOTA 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.

Muestra compuesta



INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO

INFORME 1 OCA 1039-AG
9 de abril de 2018

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

Ingeniero
Juan Sebastián Fernández Murillo
ALUICA S.A.S
Teléfono: 8931100 ext. 106
Dirección: Calle 10A #13B-02 Mz C, Bg6
e-mail: juan.fernandez@aluica.com.co
Bogotá D.C

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

ORDEN DE SERVICIO: 4723
FECHA RECEPCIÓN MUESTRA: 28 de marzo de 2018
MATRIZ: ARI
FECHA DE MUESTREO: 27 de marzo de 2018
TIPO DE MUESTREO: Compuesto
PUNTO DE MUESTREO: Salida Proceso Nitruración
IDENTIFICACIÓN MUESTRA: 18-AG2398
OBSERVACIONES: Muestra tomada por el cliente y enviada al laboratorio



Variable	Unidad	Método	Fecha Análisis	Resultados	Incertidumbre
Nitratos, N-NO ₃ ⁻	mg/L	J. Rodier, Salicilato de Sodio	2018-04-02	3,74	±0.1494
Nitritos, N-NO ₂ ⁻	mg/L	J. Rodier, Reactivo de Zambelli	2018-03-28	2,6	±0.1039
Nitrógeno amoniacal, N-NH ₃	mg/L	SM 4500-NH ₃ B, C, Destilación y Volumétrico	2018-04-04	1090,8	±37.0872
Cromo total, Cr	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llama	2018-04-07	< 0,011	±0.0006
Hierro total, Fe	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llama	2018-04-07	0,123	±0.0026

SM: "STANDARD METHODS For The Examination Of Water And Wastewater" 22ND EDITION, 2012. (A.A.): Absorción Atómica. (<): Menor que límite de cuantificación del método ARI Agua Residual Industrial.

NOTA 1: Los resultados que se relacionan en este informe corresponden únicamente a la muestra analizada.

NOTA 2: La reproducción parcial de este informe será autorizada por el Laboratorio Quimicontrol Ltda.

NOTA 3: Las muestras serán eliminadas cuarenta y cinco (45) días después de haber sido recibidas.

NOTA 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.

Muestra simple final



INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO



INFORME 3 OCA 1039-AG
9 de abril de 2018

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

Ingeniero
Juan Sebastián Fernández Murillo
ALUICA S.A.S
Teléfono: 8931100 ext. 106
Dirección: Calle 10A #13B-02 Mz C, Bg6
e-mail: juan.fernandez@aluica.com.co
Bogotá D.C

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

ORDEN DE SERVICIO: 4723
FECHA RECEPCIÓN MUESTRA: 28 de marzo de 2018
MATRIZ: ARI
FECHA DE MUESTREO: 27 de marzo de 2018
TIPO DE MUESTREO: Puntual
PUNTO DE MUESTREO: Salida Proceso Nitruración Simple
IDENTIFICACIÓN MUESTRA: 18-AG2400
OBSERVACIONES: Muestra tomada por el cliente y enviada al laboratorio

Variable	Unidad	Método	Fecha Análisis	Resultados	Incertidumbre
Nitratos, N-NO ₃ ⁻	mg/L	J. Rodier, Salicilato de Sodio	2018-04-02	2,71	±0.1082
Nitritos, N-NO ₂ ⁻	mg/L	J. Rodier, Reactivo de Zambelli	2018-03-28	0,076	±0.003
Nitrógeno amoniacal, N-NH ₃	mg/L	SM 4500-NH ₃ B, C, Destilación y Volumétrico	2018-04-04	845,2	±28.7368
Cromo total, Cr	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llama	2018-04-07	< 0,011	±0.0006
Hierro total, Fe	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llama	2018-04-07	0,112	±0.0024

SM: "STANDARD METHODS For The Examination Of Water And Wastewater" 22ND EDITION, 2012. (A.A.): Absorción Atómica. (<): Menor que límite de cuantificación del método ARI: Agua Residual Industrial.

NOTA 1: Los resultados que se relacionan en este informe corresponden únicamente a la muestra analizada.

NOTA 2: La reproducción parcial de este informe será autorizada por el Laboratorio Quimicontrol Ltda.

NOTA 3: Las muestras serán eliminadas cuarenta y cinco (45) días después de haber sido recibidas.

NOTA 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.

ANEXO I

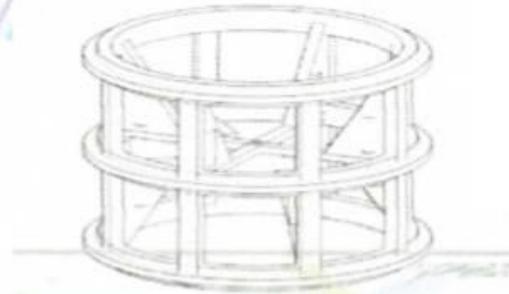
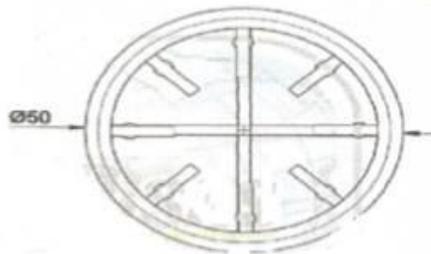
FICHA DE TÉCNICA DE LOS ANILLOS DE PALL

Fabricación de plantas de tratamiento de agua potable y residual
tanques de almacenamiento canaletas parshal, falso fondos,
torres de aireación, filtros etc.



DESCRIPCIÓN

Los anillos PALL RING son un sistema novedoso y muy efectivo para la absorción de hierro ideal para torres de aireación que tratan aguas provenientes de pozos profundos.



ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Material	Polipropileno de alta densidad.
Color	Traslucido natural.
Diámetro	50 mm
Altura	60 mm
Área de contacto	38 cm ² /cm ³
Peso	
Unidades / m ³	7000
Método de producción	Inyección
Recuperabilidad	100%

ANEXO J

FORMATO PARA REGISTRO DE DATOS DE EXPERIMENTACIÓN

“Evaluación de eficiencia de diseño de torre de desorción, (1) torre de desorción empacada con anillos Pall y (2) torre de desorción a partir de microburbujeo de aire”.

Tabla 19. Formato para registro de datos de experimentación.

Nitruración evaluada			AGUA RESIDUAL				
DISEÑO DE TORRE EVALUADA			pH entrada				
Torre empacada							
Torre por microburbujeo			1	2	3	4	
Volumen (L)		Fase líquida					
Tiempo (s)							
Flujo volumétrico (L/s)							
AIRE	1	Volumen (mL)	Fase gaseosa				
		Tiempo (s)					
		Flujo volumétrico (L/s)					
		pH salida		Fase líquida			
	2	Volumen (mL)	Fase gaseosa				
		Tiempo (s)					
		Flujo volumétrico (L/s)					
		pH salida	Fase líquida				
	3	Volumen (mL)	Fase gaseosa				
		Tiempo (s)					
		Flujo volumétrico (L/s)					
		pH salida	Fase líquida				
	4	Volumen (mL)	Fase gaseosa				
		Tiempo (s)					
		Flujo volumétrico (L/s)					
		pH salida	Fase líquida				

ANEXO K

COSTO DE ANILLOS DE PALL: COTIZACIÓN

FECHA 11/10/2018

Cot. N° 43384-173



Agradecemos la confianza depositada en nuestra empresa, de acuerdo a su solicitud encontrará nuestra mejor propuesta económica para el suministro de productos a continuación descritos:

<i>NIT</i>	<i>CLIENTE</i>	<i>CONTACTO</i>	<i>CIUDAD</i>
0	ALUICA S.A.S.	JUAN FERNANDEZ	MOSQUERA
<i>TEL.</i>	<i>DIRECCIÓN</i>	<i>E-MAIL</i>	<i>FORMA DE PAGO</i>
3017877841	CALLE 10A # 13B-02	juan.fernandez@aluica.com.co	CONTADO PREVIO AL DESPACHO

<i>REF</i>	<i>Producto</i>	<i>Presentación</i>	<i>Cantidad</i>	<i>VALOR UNITARIO</i>	<i>TOTAL</i>
1024	PALL RING - hasta 21.000 unidades	UNIDAD	1400	\$ 250	\$ 350.000