

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA GABRIEL RENÉ MORENO
ESCUELA DE POSTGRADO
Escuela de Ingeniería de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología



**PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA UNIDAD DE
TRATAMIENTO DE EFLUENTES LIQUIDOS PARA LA PLANTA DE
AMONIACO Y UREA DE YPFB CORPORACION**

POR

CESAR LUIS APAZA MAQUERA

Tesis presentada a la Escuela de Ingeniería de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Autónoma Gabriel René Moreno para optar al Grado de Magíster en Operaciones Petroleras.

Director de Tesis:

M.Sc. Ing. Einar Montaña Suarez

Octubre, 2023

Santa Cruz de la Sierra, Bolivia

© 2023, César Luis Apaza Maquera

AGRADECIMIENTOS

“Quiero dar agradecimientos a mi tutor que ha sido el soporte para el avance de este proyecto, a los docentes de esta prestigiosa institución INEGAS, al personal de operación de la planta de amoniaco y urea por su colaboración en la recopilación de datos y a mis padres quienes me brindan la motivación para seguir adelante”

DEDICATORIA

“Este trabajo va dedicado a mis padres, hermanos y amigos que son el sostén de mi persona y apoyo incondicional en mi travesía profesional”

Resumen ejecutivo

Esta investigación ha abordado el tema de la propuesta de implementación de una unidad de tratamiento de efluentes líquidos para la planta de amoníaco y urea de YPFB Corporación, debido a que el complejo petroquímico no cuenta con un sistema de tratamiento de efluentes líquidos de tipo amoniacal que ocasionan un impacto ambiental a los cuerpos de agua circundantes a la planta de urea.

El objetivo principal de la investigación fue realizar una propuesta de implementación de una unidad de stripping con aire por medio del diseño de sus componentes para mejorar la calidad de los efluentes líquidos conforme a la normativa ambiental. Para esto se planteó una metodología de tipo descriptiva, que ha abarcado el desarrollo teórico con la revisión de la documentación académica que aborden las tecnologías de tratamiento de efluentes líquidos, sus características y fortalezas; y desde la perspectiva práctica se ha desarrollado el estudio de ingeniería sobre el stripping con aire por una torre de lecho empacado como método de tratamiento elegido en función de las características del agua amoniacal generada en planta, y finalmente se realizó un análisis de los costos que involucrarían la implementación de esta unidad versus los beneficios sociales, ambientales, empresariales de la institución y la comunidad en general.

De acuerdo con el análisis realizado, se concluye que la implementación de una unidad de stripping con aire sí reduce el impacto ambiental de los efluentes líquidos de tipo amoniacal y es un método válido desde lo técnico a lo económico.

Abstract

This investigation is intended to treat the proposal for the implementation of a liquid effluent treatment unit for the ammonia and urea plant in YPFB Corporación, since the petrochemical complex does not have an ammonia liquid effluent treatment system that cause an environmental impact to water streams surrounding the area.

The main objective of the research was to make a proposal for the implementation of an air stripping unit through the design of its components to improve the quality of liquid effluents in accordance with environmental regulations. For this, a descriptive methodology was proposed, which has covered theoretical development with the review of academic documentation that shows existing liquid effluent treatment technologies, their characteristics and strengths; and from the practical perspective, the engineering study of stripping with air on a packed bed tower has been developed as the treatment method chosen based on the characteristics of the ammoniacal water generated in the plant, and finally an analysis of the costs that would involve the implementation of this unit versus the social, environmental, and benefits for the institution and the community in general.

According to this analysis, it is concluded that the implementation of an air stripping unit does reduce the environmental impact of liquid ammonia effluents and is a valid method from the technical to the economic perspective.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA	5
4. OBJETIVOS	7
4.1. Objetivo general	7
4.2. Objetivos específicos	8
5. JUSTIFICACION	8
5.1. Justificación económica	8
5.2. Justificación social	9
5.3. Justificación técnica	9
6. ALCANCE Y DELIMITACIÓN.....	9
6.1. Alcance geográfico.....	9
6.2. Alcance temporal	9
6.3. Alcance de contenido	10
7. TIPO DE INVESTIGACION	10
7.1. Investigación primaria	10
7.2. Investigación descriptiva	10
7.3. Investigación explicativa	10
7.4. Investigación propositiva.....	11
8. METODOLOGIA DE TRABAJO	11
8.1. Trabajo de campo	11
8.2. Trabajo de gabinete	11
8.3. Cuadro de descripción de metodología.....	12
9. FUENTES DE INFORMACION	13

9.1. Información primaria	13
9.2. Información secundaria	13
CAPITULO 1 MARCO TEÓRICO	15
1.1 Marco conceptual	15
1.1.1. Características de efluentes líquidos de una planta de amoníaco y urea	15
1.1.1.1. Características del agua residual	18
1.1.2. Métodos de tratamiento de efluentes en base amoniacal y orgánico.....	20
1.1.2.1. Intercambio iónico	20
1.1.2.2. Tratamiento Biológico.....	24
1.1.2.3. Oxidación Química/Electroquímica	28
1.1.2.4. Adsorción	30
1.1.2.5. Separación de Membrana	31
1.1.2.6. Extracción con aire	32
1.1.3. Despojamiento por aire	33
1.1.3.1. Ley de Henry	34
1.1.3.2. Despojamiento de amoniaco por aire.....	35
1.1.3.3. Características de Stripper de aire por contracorriente	41
1.1.3.4. Procedimiento de diseño de stripper de aire por contracorriente	41
1.1.3.4.1. Selección de pretratamiento.....	41
1.1.3.4.2. Constante de Henry	43
1.1.3.4.3. Balance de masa de stripper de aire.....	44
1.1.3.4.4. Selección de columna	46
1.1.3.4.5. Parámetros de diseño de stripper de aire	47
1.2. Marco Normativo	61
1.2.1. ASTM – D 1293.....	61

1.2.2. ASTM – D 1426.....	61
1.2.3. ASTM – D 888.....	62
1.2.4. APHA N-4500.....	62
1.2.4. ASME BPVC Sección VIII	63
1.2.5. API 610 11th	63
1.3. Marco Legal.....	63
1.3.1. Ley del Medio Ambiente 1333 del 27 de abril de 1992	63
CAPITULO 2 DIAGNÓSTICO	67
2.1 Diagnóstico mundial sobre tratamiento de aguas residuales	67
2.2 Diagnóstico Organizacional de YPFB Corporación sobre el tratamiento de efluentes de amoniaco	68
2.2.1 Nombre de la empresa.....	68
2.2.2. Misión.....	68
2.2.3 Visión	68
2.2.4 Principios y valores	68
2.2.6 Historia de YPFB sobre el tratamiento de efluentes de amoniaco	69
2.2.7 Ubicación	69
2.2.8 Sucursales y Participación en el mercado.	70
2.3 Diagnóstico del Sistema de Tratamiento de Efluentes Líquidos de la Planta de amoniaco y urea.....	70
2.3.1 Descripción de la Planta de Amoniaco y Urea.	70
2.3.2 Descripción del agua residual de la planta de amoniaco y urea	74
2.3.3. Descripción del tratamiento de aguas residuales de la planta de amoniaco y urea.....	75
2.3.4. Flujograma de unidad de tratamiento de aguas residuales de la planta de amoniaco y urea.....	76

2.3.6. Análisis de Laboratorio de aguas residuales de planta de amoniac y urea	77
2.3.7. Análisis de dispersión	78
2.3.8. Determinación de la cantidad de efluentes descargados por la planta de amoniac y urea.....	81
CAPITULO 3 DESARROLLO	83
3.1. Caso de estudio	83
3.2. Determinación de capacidad de zona de tratamiento de efluentes amoniacaes de la planta de amoniac y urea.	84
3.2.1. Selección de método de tratamiento para la planta de amoniac y urea	85
3.2.2. Tanque de sedimentación primaria	86
3.3. Determinación de las unidades de tratamiento de efluentes nitrogenados	87
3.3.1. Constante de Henry del amoniac	87
3.3.2. Determinación de las concentraciones de entrada y salida de amoniac	88
3.3.3. Selección de material de relleno	89
3.3.4. Selección de factor de stripping y relación de líquido – gas.....	89
3.3.5. Determinación de la tasa de carga gaseosa y líquida.....	89
3.3.6 Determinación del diámetro de la columna stripper	91
3.3.7 Determinación de altura de la columna stripper	91
3.3.8 Determinación de la concentración de gas a la salida	92
3.3.9 Determinación de flujo mínimo de aire requerido	92
3.4. Dimensionamiento de torre stripper con lecho empacado	93
3.4.1. Selección de bomba centrífuga de agua	94
3.4.2. Dimensionamiento de ventilador de aire	99
3.5. Esquema final de facilidades de tratamiento de efluentes nitrogenados.....	100
3.6. Propuesta económica del proyecto	101
3.6.1. Costos directos.....	101

3.6.2. Costos indirectos.....	104
CAPITULO 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	107
4.1. Conclusiones.....	107
4.2. Recomendaciones.....	108
REFERENCIAS.....	109
ANEXOS	116

Índice de Tablas

Tabla 1. Cuadro de acciones y resultados	12
Tabla 1.1. Parámetros de tanques sedimentadores rectangulares	43
Tabla 1.2. Comparación de columna de platos y relleno.....	46
Tabla 1.3. Factor de relleno Cf para distintos tipos y tamaños de relleno	52
Tabla 1.4. Parámetros de diseño típicos de stripper para amoniaco.....	52
Tabla 2.1. Cuadro de análisis de laboratorio de PAU en la gestión 2019	77
Tabla 2.2. Comportamiento de flujo de agua residual en PAU.....	82
Tabla 3.1. Parámetros de agua residual de planta.....	86
Tabla 3.2. Datos obtenidos de la columna despojadora de aire.....	93
Tabla 3.3. Constantes de pérdida de carga de accesorios del sistema	97
Tabla 3.4. Costo de torre de lecho empacado.....	102
Tabla 3.5. Costo de internos de torre	102
Tabla 3.6. Costo de anillos Pall	102
Tabla 3.7. Costo de bomba centrífuga	103
Tabla 3.8. Costo de ventilador de aire.....	103
Tabla 3.9. Costo equipamiento adicional	103
Tabla 3.10. Costo directo	104
Tabla 3.11. Costo trabajo en terreno.....	105
Tabla 3.12. Costo construcciones civiles	105
Tabla 3.13. Costo estudios e ingeniería	105
Tabla 3.14. Costo indirecto.....	105
Tabla 3.15. Análisis costo beneficio	106

Índice de Figuras

Figura 1. Cuadro de causas y efectos.....	5
Figura 2. Diagrama de causa efecto	6
Figura 3. Esquema de acciones y soluciones	7
Figura 1.1. Ciclo del nitrógeno.....	16
Figura 1.2. Esquema de Planta de Tratamiento de Efluentes	17
Figura 1.3. Turbidez del agua.....	19
Figura 1.4. Intercambio iónico del agua	21
Figura 1.5. Resina de intercambio iónico	22
Figura 1.6. Ciclo de trabajo de resina iónica	23
Figura 1.7. Nitrificación y desnitrificación	25
Figura 1.8. Filtros Percoladores	27
Figura 1.9. Disco biológico	28
Figura 1.10. Esquema de instalación de oxidación total	29
Figura 1.11. Principio de adsorción de zeolita.....	30
Figura 1.13. Sistema de extracción de amoniaco con aire.....	32
Figura 1.14. Efecto del pH y temperatura en distribución de amoniaco e ion amonio en el agua.....	36
Figura 1.15. Cantidad de cal para aumentar pH de dos muestras a varios niveles...	37
Figura 1.16. Distribución del amoniaco en aire y agua a presión atmosférica	40
Figura 1.17. Balance de masa stripper de aire.....	44
Figura 1.18. Relación entre NTU y S.....	50
Figura 1.19. Curvas de caída de presión para columna con lecho empacado	51
Figura 1.20. Diagrama de Moody	56
Figura 2.3. Variación del amoniaco en la planta de amoniaco	79

Figura 2.4. Variación del amoniaco en la planta de urea	80
Figura 2.5. Variación del amoniaco en la planta de Servicios Auxiliares.....	81
Figura 3.1. Unidad de tratamiento de la planta de amoniaco y urea	84
Figura 3.2. Determinación de carga líquida y gaseosa	90
Figura 3.3. Esquema preliminar de sistema de bombeo	94
Figura 3.4. Determinación del coeficiente de fricción	96
Figura 3.5. Curva de rendimiento Bomba Pedrollo F50-125	98
Figura 3.6. Curva de rendimiento ventilador centrífugo Sodeca.....	100
Figura 3.7. Diagrama final de sistema de tratamiento	101

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Amoniacó molecular	15
Ecuación 2. Amonio en estado disociado.....	15
Ecuación 3. Constante de Henry.....	35
Ecuación 4. Relación lineal de concentración, agua y aire	39
Ecuación 5. Relación Gas Líquido	39
Ecuación 6. Carga superficial.....	42
Ecuación 7. Área de tanque rectangular	42
Ecuación 8. Volumen de tanque rectangular.....	42
Ecuación 9. Tiempo de retención	43
Ecuación 10. Constante de Henry en función de temperatura	44
Ecuación 11. Balance de masa stripper de aire	45
Ecuación 12. Concentración de soluto A.....	45
Ecuación 13. Determinación de concentración de soluto de salida.....	46
Ecuación 14. Determinación de relación aire líquido.....	46
Ecuación 15. Coeficiente de transferencia de masa de una sustancia	48
Ecuación 16. Altura de una unidad de transferencia	48
Ecuación 17. Número de unidades de transferencia.....	49
Ecuación 18. Determinación de altura de columna	49
Ecuación 19. Determinación de diámetro de columna	49
Ecuación 20. Determinación del factor de stripping	50
Ecuación 21. Determinación de eje X en función de tasa de carga	52
Ecuación 22. Determinación de eje Y en función de tasa de carga	52
Ecuación 23. Cálculo de carga dinámica total de bombeo.....	54
Ecuación 24. Cálculo de pérdida de carga por fricción en metros.....	55

Ecuación 25. Número de Reynolds	55
Ecuación 26. Determinación de la rugosidad relativa.....	55
Ecuación 27. Cálculo de las pérdidas menores de los accesorios en metros	56
Ecuación 28. Fórmula de continuidad del fluido	57
Ecuación 29. Determinación de diámetro de tubería.....	57
Ecuación 30. Determinación de la potencia de bombeo en kW (hp)	58
Ecuación 31. Eficiencia de una bomba	58
Ecuación 32. Eficiencia general de una bomba.....	58
Ecuación 33. Cálculo de NPSH disponible.....	59
Ecuación 34. Relación de caudal y presión de resistencia.....	60
Ecuación 35. Determinación de diámetro específico.....	60

1. INTRODUCCIÓN

Durante el desarrollo de la industria se ha mejorado la vida de las personas, específicamente el sector de fertilizantes ha favorecido el crecimiento de la agricultura y mejorado la calidad de los productos agregando sostenibilidad. Sin embargo, la industria en general emplea materia prima que no es aprovechada en su totalidad, generando desechos y residuos que contaminan el ambiente en el cual son depositados.

El agua es primordial en varios de los procesos industriales, tanto como materia prima o para proporcionar un servicio; éste una vez usado se convierte en agua residual. A nivel mundial, el agua residual, en su gran parte, es vertida en el medio ambiente sin previo tratamiento, especialmente en los países no desarrollados.

Por ejemplo, el manejo de aguas residuales varía en las regiones de acuerdo al ingreso económico que tengan; por ejemplo, en países con altos ingresos se llega a procesar alrededor del 70% del total de agua residual generado en urbes e industrias, mientras que en países con bajo ingreso económico solamente se alcanza el 8% de tratamiento. A nivel global el 80% de las aguas residuales no reciben tratamiento.

El sector industrial consume alrededor del 3% del agua a nivel global y genera 16% de aguas residuales considerados más dañinos para el ser humano, por tanto, se debe realizar tratamientos para disminuir el vertido de efluentes lo más bajo posible haciendo reciclaje del mismo. Los gobiernos establecen normativas para el control de aguas residuales en el sector de la industria definiendo límites para la disposición de efluentes en ciudades y sectores rurales donde haya afectación a las personas. (WWAP, 2017, pág. 24)

En el mundo hay una gran cantidad de bloques industriales, y en particular referente al sector de petroquímica y fertilizante se concentra principalmente en Medio Oriente, Asia y América del Norte; como ejemplo se puede indicar a China que cuenta actualmente con 118 complejos de producción de Urea, los cuales generan cantidades significativas de agua residual. En un esfuerzo por disminuir la emisión de efluentes en este tipo de plantas, los gobiernos aplican leyes y reglamentos que regulan los

valores permisibles para emisión de efluentes y ante ello se implementan técnicas de tratamiento en instalaciones dedicadas al reciclaje de agua. Constantemente se van mejorando las tecnologías para tratamiento de aguas residuales, así como la investigación de nuevos métodos para encarar los próximos desafíos de las siguientes generaciones.

Se considera las aguas residuales como una oportunidad de desarrollo sostenible, fundamentado en el aumento del consumo de agua a nivel mundial. Para ello se busca implementar medidas de reciclaje y reutilización por medio de tratamientos y mejora de las políticas y normativas en los países hasta el 2030 y encontrar soluciones para el Desarrollo Sostenible de la Humanidad. (WWAP, 2017, pág. 32)

A nivel regional, América del Sur y el Caribe son las que más cantidad de aguas residuales genera dentro del continente y el porcentaje que recibe tratamiento es aproximadamente 20%, por lo que estos vertidos incrementan la contaminación en cuerpos de agua, que son utilizados en las poblaciones. La mayor cantidad de agua residual es generada por actividades en la minería, extracción de petróleo y actividades industriales. (WWAP, 2017, pág. 24)

En América del Sur, la industria petroquímica y de fertilizantes no está ampliamente difundida teniendo presencia en Brasil, Argentina, Venezuela, Trinidad y Tobago, Colombia y recientemente Bolivia. Algunos de los complejos petroquímicos por su antigüedad carecen de sistemas óptimos de tratamiento de aguas residuales, y solamente los más recientes llevan un sistema de tratamiento de efluentes que intenta alcanzar los requerimientos mínimos para disposición de aguas contaminadas.

En Bolivia, el problema de la contaminación es un tema bastante crítico para la industria debido a la responsabilidad social que tienen las empresas con la sociedad. El sector industrial del país viene mejorando las medidas de control para disminuir la contaminación, como es el caso de la Planta de Amoniaco y Urea que es operada por YPFB Corporación.

El complejo petroquímico de Bulo Bulo con la Planta de Amoniaco y Urea produce Urea granulada para el ámbito nacional e internacional por lo cual el control de calidad

es importante. Dentro de este entorno, se ha visto necesario mejorar el control de aguas residuales, los cuales reciben un tratamiento previo, debido a la carencia de un sistema de tratamiento de aguas residuales contaminados con nitrógeno amoniacal. La planta de Amoniaco y Urea cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales, sin embargo, solamente para neutralización del agua y remoción de aceites. Por tal razón es necesario ver la factibilidad de instalar una planta de tratamiento de aguas residuales con contenido amoniacal de forma segura y responsable con el medio ambiente.

2. ANTECEDENTES

La generación de aguas contaminadas con amoniaco es un asunto cada vez más relevante en el tratamiento de efluentes tanto doméstico, agrario e industrial. Alrededor del mundo se han realizado estudios sobre el uso de torres stripper para la remoción de nitrógeno amoniacal del agua residual como se demuestra en los siguientes ejemplos.

La refinería IKORC en Irán tiene aguas contaminadas con CO₂, ácido sulfhídrico y amoniaco, además de remanentes de petróleo los cuales son tratados en una unidad DAF para retirar los aceites. Debido a la gran cantidad de amoniaco se procedió a la instalación de una unidad de stripper con aire con capacidad de procesar 240 m³/h de efluente con una concentración de amoniaco de 300 ppm, llegando a alcanzar una eficiencia del proceso del 90%, obteniendo un efluente con una concentración de 30 ppm de amoniaco que es utilizado como agua de reposición para la operación de la torre de enfriamiento del complejo. (Bahrani et al., 2020, pág. 21894)

El lago South Tahoe en Estados recolecta aguas residuales de tipo doméstico e industrial los cuales son tratados en la planta piloto de Blue Plains, la cual tiene una unidad de stripper de aire por contracorriente que procesa un caudal de 28390 m³/día para una tasa de remoción de amoniaco del 95% durante los periodos cálidos. (Environmental Protection Agency (EPA), 2000, pág. 3)

La fábrica de fertilizantes Rashtriya Chemicals and Fertilizers Ltd en Mumbai, India tiene una unidad de tratamiento de efluentes por medio de stripping con vapor cuyo

rendimiento para procesamiento de amoníaco y urea alcanza el 98% de remoción de contaminantes. El agua tratada es reciclada en la planta como agua de reposición para la torre de enfriamiento. (Patwardhan, 2008, pág. 261)

En Bolivia, el tratamiento de aguas residuales a nivel municipal se encuentra cubierto alrededor de un 74% a nivel nacional con plantas de tratamiento que emplean diferentes tecnologías. Sin embargo, la funcionalidad de las plantas de tratamiento en cuanto a operación solo alcanza un 63% con baja eficiencia. (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2013, págs. 50,58)

Actualmente no se cuenta en Bolivia con una planta de tratamiento que cumpla con los requisitos de emisión de efluentes hídricos de 4 mg/l de nitrógeno amoniacal, para lo cual es menester realizar un relevamiento de los cuerpos de agua receptores y uso de agua. (Wagner, 2010, pág. 14)

El 14 de septiembre de 2017 se inaugura oficialmente la planta de Amoníaco y Urea, ubicada en Bulo Bulu, Cochabamba. El complejo petroquímico produce urea granulada a partir del amoníaco y dióxido de carbono, el cual es almacenado y posteriormente transportado para su distribución en el mercado nacional y extranjero. (Viceministerio de Comunicación, 2017)

Durante la operación de la planta, se registraron los siguientes eventos que se detallan a continuación:

Según el artículo (Diario Pagina Siete, 2018) menciona que en diciembre de 2017 se registró una parada de planta por problemas en la turbina de gas para compresión de aire.

Posteriormente, en junio de 2018 se registró una fuga de amoníaco en un stripper que significó parada de planta para su reparación, además de una posible contaminación del arroyo Muñecas en la localidad de Bulu Bulu.

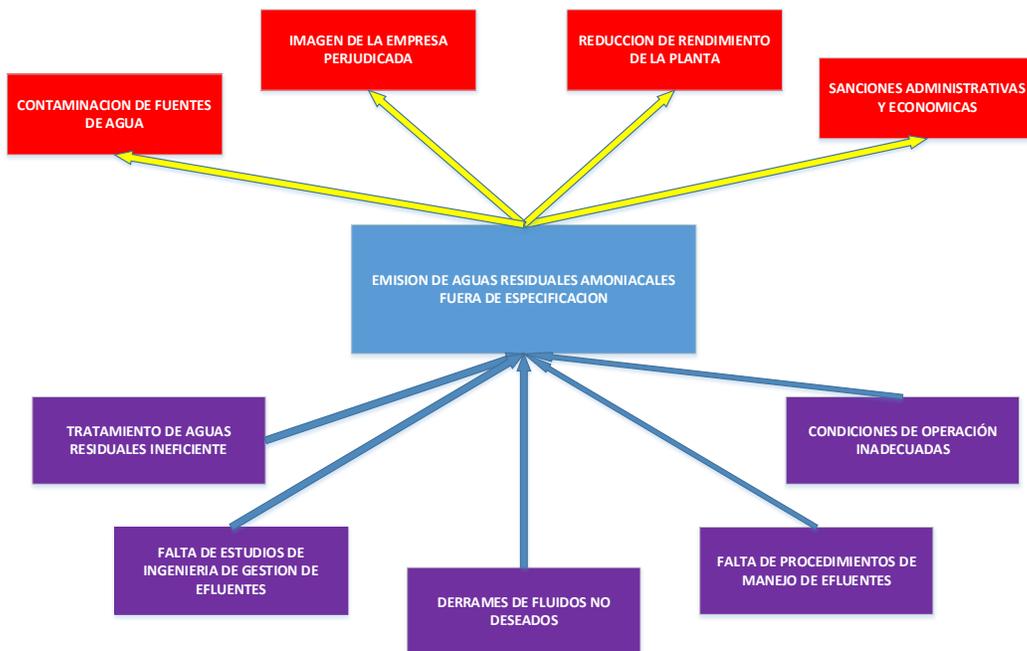
3. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

La planta de Amoniaco y Urea cuenta con un sistema de tratamiento de efluentes líquidos para regulación de pH y control de aceites, pero no está destinado para el tratamiento de aguas amoniacales.

El agua amoniacal se genera por los procesos de producción de amoniaco y urea propias de las plantas de amoniaco y urea, los cuales se obtienen por la agregación del amoniaco al agua generando aguas con contenido amoniacal elevado el cual ocasiona impacto ambiental en los cuerpos acuíferos circundantes a la planta.

Según nota de prensa (Diario Opinión, 2018) se indica que la planta de amoniaco y urea descargó contaminantes en el arroyo Muñecas de la comunidad de Buló Buló, cuyo resultado fue la muerte de peces a las cercanías del lugar, afectando de esta manera a la flora y fauna de acuerdo a las versiones de los comunarios. Estos hechos generan un impacto negativo a las operaciones de la planta e imagen de la empresa como tal.

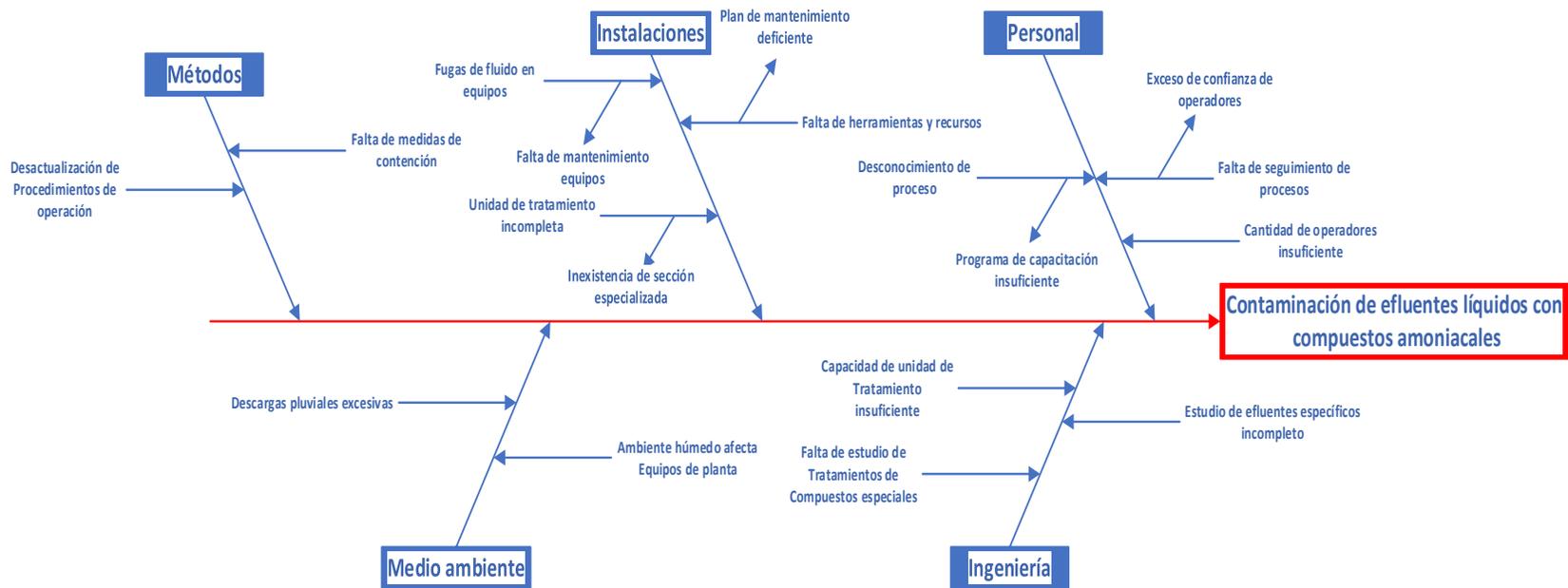
Figura 1. Cuadro de causas y efectos



Fuente: Elaboración Propia

Por medio del esquema preliminar de causas y efectos producidos por la contaminación por efluentes líquidos en la planta de amoniaco y urea se obtiene el siguiente diagrama de pescado que detalla más información.

Figura 2. Diagrama de causa efecto



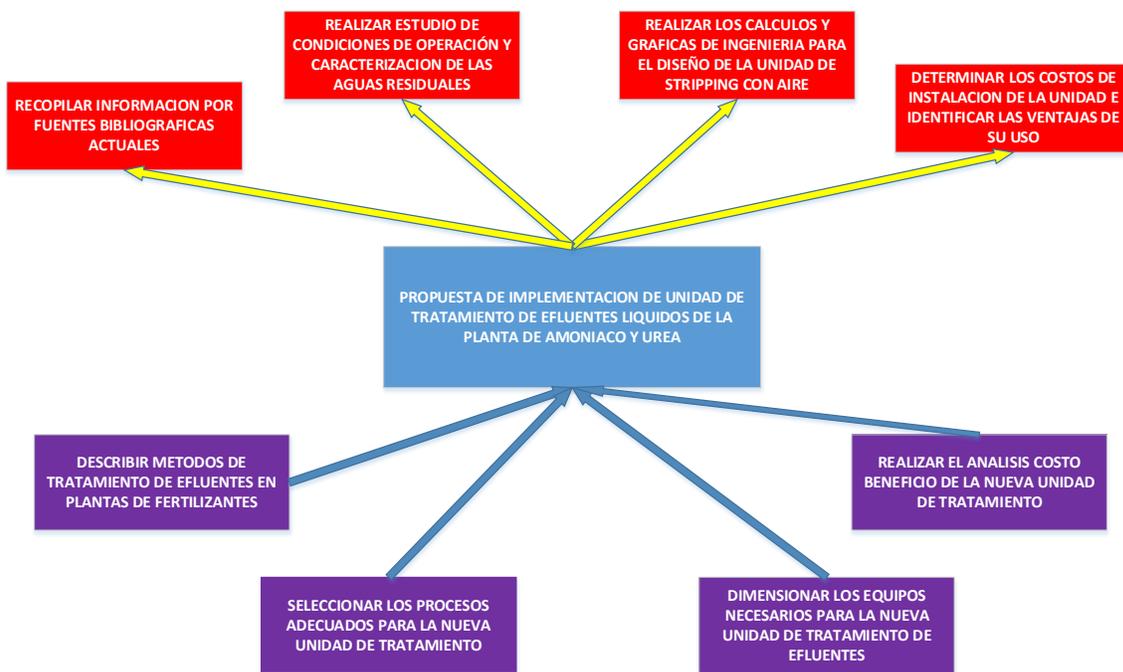
Fuente: Elaboración Propia

La relación que existe entre los puntos Instalaciones, Ingeniería y Métodos respecto a la incapacidad de poder realizar el tratamiento de aguas contaminadas con componentes amoniacales que tiene su origen en la falta de estudios sobre métodos de tratamiento y que conlleva a la falta de equipamiento e instalaciones en planta necesarios para tratar dichos contaminantes, lo cual se manifiesta en falta de medidas y procedimientos sobre el manejo de estos efluentes.

Otros aspectos relacionados sobre el personal y el mantenimiento de los equipos son puntos que deben ser atendidos de igual manera, debido a que repercuten de alguna manera en el funcionamiento correcto de las facilidades.

A partir del esquema de causas y consecuencias para la planta de amoniaco y urea de YPF, se ve identificado el problema de contaminación de agua residual con componentes amoniacales por lo que se requiere de la instalación de la unidad propuesta para su tratamiento según muestra el cuadro a continuación.

Figura 3. Esquema de acciones y soluciones



Fuente: Elaboración Propia

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Realizar una propuesta de implementación de una unidad de tratamiento de efluentes líquidos de la planta de amoniaco y urea de YPF Corporation por medio del diseño de ingeniería de una unidad de stripping con aire para mejorar la calidad de las aguas residuales acorde a la normativa ambiental vigente.

4.2. Objetivos específicos

Describir los métodos de tratamiento de efluentes disponibles para plantas de producción de fertilizantes por medio de revisión bibliográfica de libros, tesis y otros para la selección del método de stripping adecuado.

Dimensionar los sistemas y equipos necesarios para la unidad de tratamiento de aguas residuales a través del uso de correlaciones matemáticas y gráficas de ingeniería para stripping con aire para cumplir los límites permisibles de descarga en cuerpos receptores de agua.

Realizar el análisis de costo beneficio de la unidad propuesta de tratamiento de aguas residuales por medio de evaluación de costos de instalación de las unidades de stripping con aire y valoración de las ventajas al implementar los equipos de tratamiento de aguas amoniacales para cumplimiento de la visión de la empresa.

5. JUSTIFICACION

5.1. Justificación económica

La implementación de la unidad propuesta de tratamiento de efluentes amoniacales es necesaria para cumplir con la normativa ambiental de acuerdo a la Ley 1333 y de esa manera evitar sanciones económicas que afectan la imagen de la empresa, además de gastos no contemplados para la remediación de efluentes contaminados que afectan los costos operativos de la planta y los conflictos de la comunidad involucrada que pueda afectar a la operatividad de la planta de amoniaco y urea produciendo impacto negativo en la producción y de esa manera a las ganancias por producción de producto.

La estimación del costo de instalación, acondicionamiento y operación de la nueva unidad de tratamiento estará alrededor de los 200 000 dólares, dependiendo del tipo de tratamiento a usar, para lo cual serán evaluadas las opciones más convenientes para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

5.2. Justificación social

El tratamiento adecuado de efluentes líquidos tendrá un impacto favorable para la población del lugar, debido a que el agua residual de planta es retornada a los cuerpos acuíferos cercanos para uso de la comunidad. Por tanto, el tratamiento efectivo de las aguas residuales de acuerdo a la ley 1333 y sus reglamentos de Medio Ambiente brindará a la población local una fuente confiable de agua para su uso; prestigio y buena imagen de la planta por llevar las acciones con compromiso y responsabilidad.

5.3. Justificación técnica

La planta de amoniaco y urea posee un sistema de tratamiento de efluentes líquidos que controla la neutralidad del agua mediante control por pH y aceites, sin embargo, no contempla la disposición segura de agua con alto contenido de nitrógeno en forma de amonio. La planta de amoniaco produce amoniaco que es aprovechado como materia prima en la planta de urea, por tanto, existe la probabilidad de obtener efluentes contaminados con amoniaco de ambas plantas. Además, existe la posibilidad de producir efluentes con otros contaminantes de tipo orgánico que tampoco pueden ser procesados en la planta de tratamiento de efluentes.

6. ALCANCE Y DELIMITACIÓN

6.1. Alcance geográfico

El presente trabajo se desarrollará en los predios de la planta de Amoniaco y Urea que se encuentra localizada en la localidad de Bulu Bulu, perteneciente a la provincia Carrasco del departamento de Cochabamba cuyas coordenadas son -17,25601 y -64,40501. La superficie actual del complejo es de 30 000 metros cuadrados que contempla las plantas de Amoniaco, Urea y Servicios Auxiliares.

6.2. Alcance temporal

El presente trabajo se desarrollará desde el 26 de mayo de 2020 hasta el 26 de noviembre de 2021. El periodo de validez de este documento será de un año contemplando las especificaciones actuales de la planta.

6.3. Alcance de contenido

El alcance de este trabajo contempla el estudio del manejo de efluentes en las plantas de Amoniaco, Urea y Servicios auxiliares desde el punto de vista de contaminantes basados en nitrógeno, así como los métodos de tratamiento de los mismos en la planta de Servicios Auxiliares, la cual procesa los efluentes líquidos de todo el complejo.

7. TIPO DE INVESTIGACION

7.1. Investigación primaria

El propósito de realizar este trabajo es demostrar si el método de tratamiento de efluentes líquidos seleccionado será el adecuado para mejorar la calidad de agua residual de la planta de Amoniaco y Urea.

7.2. Investigación descriptiva

Dentro de la investigación descriptiva de la planta de Amoniaco y Urea se puede indicar las siguientes condiciones para el tratamiento de aguas residuales. Las plantas de amoniaco y urea poseen un sistema de drenajes abiertos para lluvia, los cuales desembocan en un canal principal ubicado en la planta de Servicios Auxiliares. El canal principal de Servicios Auxiliares se encarga de captar todos los drenajes que provengan de las plantas de amoniaco y urea y posteriormente se direccionan a una fosa de acumulación.

El flujo de efluentes se deposita en un sistema de cámaras donde se realiza el tratamiento químico y físico para regulación de la alcalinidad del agua y remoción de aceites.

7.3. Investigación explicativa

Para la investigación explicativa es importante indicar que el sistema de tratamiento actual de efluentes no contempla la disposición segura de aguas residuales de carácter amoniacal. Esto se explica por la posibilidad de haber fugas y derrames de productos como son el amoniaco y la urea en su estado líquido, los cuales desembocan en ciertas ocasiones a los drenajes abiertos que son evacuados de planta al medio ambiente.

7.4. Investigación propositiva

Como propuesta para solucionar la calidad de agua residual se tienen las opciones de implementar medidas de control preventivas como ser maniobras operativas y procedimientos de seguridad industrial y medio ambiente en las plantas de Amoniaco y Urea, además de instalar facilidades para la contención y posterior tratamiento de efluentes amoniacaes. Los sistemas considerados son métodos físicos, fisicoquímicos y biológicos que serán evaluados a las condiciones actuales de la planta para su selección apropiada.

8. METODOLOGIA DE TRABAJO

8.1. Trabajo de campo

Para el presente trabajo se han realizado visitas dentro del complejo de Amoniaco y Urea, entrevistas a trabajadores en las diferentes plantas, evaluación de equipos e instrumentos empleados para el tratamiento de efluentes, evaluación de puntos de evacuación de efluentes, análisis de laboratorio en puntos de acumulación de agua.

8.2. Trabajo de gabinete

Con base a la información recolectada se ha procedido a redactar el texto sobre el sistema de tratamiento actual, sus componentes y puntos de recolección, también se realizarán cuadros de comparación de los métodos de tratamiento propuestos para el complejo. Se realizarán cuadros estadísticos sobre el comportamiento de los efluentes en planta, además de analizar los peores escenarios para control de efluentes.

Además, se ha complementado el presente trabajo con la búsqueda de información por medios digitales: internet, bibliotecas online, tesis que aborden casos similares para el tratamiento de efluentes líquidos para este tipo de complejos.

8.3. Cuadro de descripción de metodología

Tabla 1. Cuadro de acciones y resultados

OBJETIVO	ACCION	HERRAMIENTAS	RESULTADO ESPERADO
Describir los métodos de tratamiento de efluentes disponibles para plantas de fertilizantes	Recopilar información tratamiento para aguas amoniacales	Libros de tratamiento de aguas residuales	Selección de método de tratamiento de aguas amoniacales
	Identificar casos de estudio sobre tratamiento de efluentes amoniacales	Tesis, informes, casos de estudio	Identificación de parámetros esenciales para la nueva unidad de tratamiento
	Elaborar la descripción de stripping con aire	Libros, tesis, informes	Descripción de proceso y características
Dimensionar los sistemas y equipos necesarios para la unidad de tratamiento de aguas residuales	Determinar la cantidad de agua contaminada	Ecuaciones de flujo de agua, flujómetro en línea	Cálculo de capacidad de fosa de recolección
	Calcular las dimensiones del stripper con lecho empacado	Curvas de concentración, ecuaciones de relación agua gas	Determinación de altura y ancho de la columna, tipo de relleno.
	Seleccionar los equipos auxiliares para el stripper con aire	Ecuación de potencia de bomba, ventilador, curvas de rendimiento	Selección de bombas, ventilador, bombas dosificadoras

Realizar el análisis costo beneficio de la nueva unidad de tratamiento de aguas residuales	Determinar los materiales a emplear en la unidad de tratamiento	Análisis de laboratorio, curvas de concentración	Selección de material para equipos rotativos, tubería, stripper, relleno
	Calcular los costos de instalación de equipos de la unidad de tratamiento	Ecuaciones de consumo de energía, costo de fabricación, tablas de precios	Determinación del costo total del proyecto
	Identificar los beneficios de instalación de la nueva unidad de tratamiento	Tabla de resultados obtenidos con el nuevo tratamiento	Tabla comparativa de costos versus beneficios del proyecto

Fuente: Elaboración Propia

9. FUENTES DE INFORMACION

9.1. Información primaria

La información se ha recolectado de Procedimientos de Operación, Planos de construcción, planos PFD, P&ID, ubicación de drenajes, manual de operaciones.

Además, de haber realizado entrevistas con operadores, personal de seguridad y medio ambiente, supervisores respecto al control de efluentes y tratamiento de aguas residuales dentro del complejo de Amoniaco y Urea.

9.2. Información secundaria

Se ha obtenido información de bibliografía sobre métodos de Tratamiento de Efluentes de tipos amoniaco y orgánico, equipamiento necesario e instrumentación, estadísticas de uso de técnicas, documentación y reglamentación sobre efluentes líquidos,

estimación de costos de implementación obtenidas por libros, contenido digital y tesis relacionados al tema.

CAPITULO 1 MARCO TEÓRICO

1.1 Marco conceptual

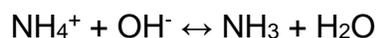
1.1.1. Características de efluentes líquidos de una planta de amoníaco y urea

Se considera efluente líquido a las descargas de agua al ambiente provenientes de diferentes fuentes como ser doméstico, industrial, municipal, etc.

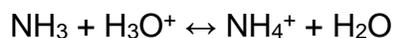
El tratamiento de efluentes líquidos en cualquier planta industrial es diverso y complejo que depende del tipo de materiales potencialmente contaminantes. Para realizar un tratamiento efectivo se debe estudiar las características físicas, químicas y biológicas de dichos efluentes.

Dentro de la industria hay una variedad de contaminantes dependiendo del rubro de fabricación. Por ejemplo, en la industria de los fertilizantes, aquí se considera la planta de amoníaco y urea y otras similares, normalmente se registran compuestos orgánicos, alcoholes, amoníaco, nitratos, fósforo, metales pesados en forma de sólidos suspendidos en los efluentes de salida de planta. (Bhandari, Gayatri Sorokhaiban , & Ranade, 2016, pág. 1)

Según Jorgensen (2002) para el caso del amoníaco, al salir como efluente de planta se convierte en nitrógeno amoniacal o también puede presentarse como producto de la oxidación biológica del nitrógeno orgánico. El nitrógeno amoniacal en el agua se encuentra de dos formas: amoníaco molecular o amonio en su estado disociado como se muestra a continuación. (pág. 10)



Ecuación 1. Amoníaco molecular

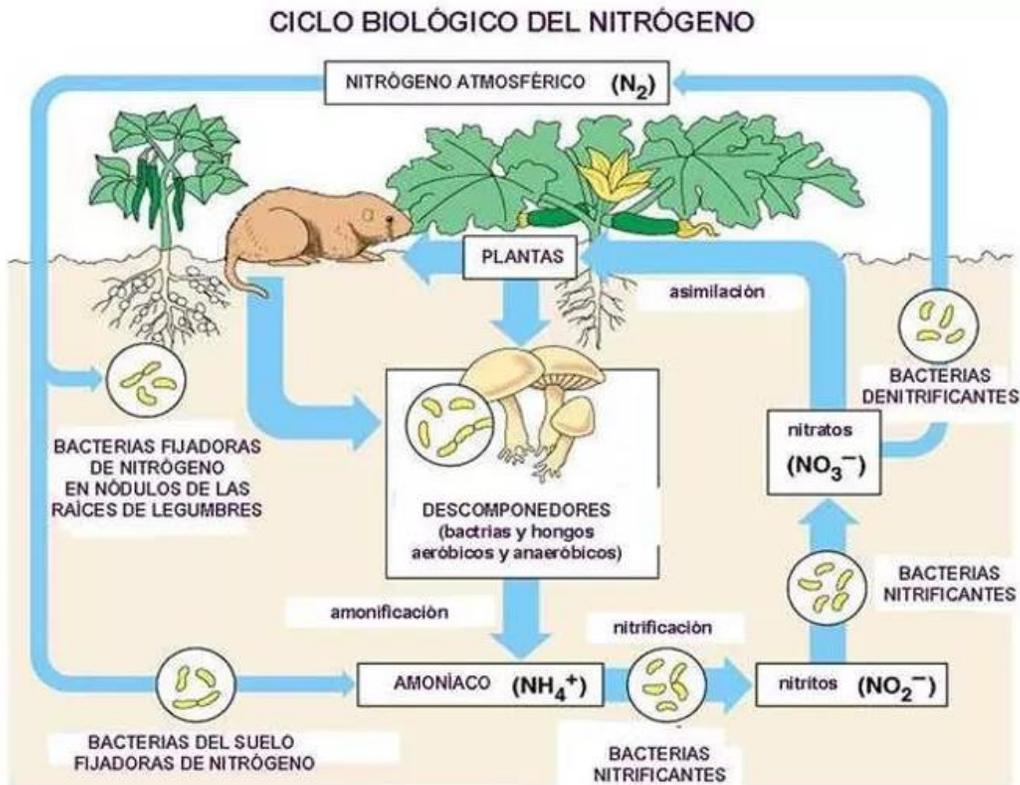


Ecuación 2. Amonio en estado disociado

El amoníaco como tal es más dañino para las plantas y los animales en altas concentraciones y en menor grado su forma ionizada, todo dependerá de la concentración y el pH. A mayor concentración se requerirá mayor cantidad de oxígeno

disuelto del agua para que las bacterias descompongan el amoníaco en nitratos, este efecto se nota más en cursos de agua lentos como lagos o ríos de bajo caudal, lo contrario sucede en cuerpos grandes de agua donde la incidencia es menor, ejemplo los mares.

Figura 1.1. Ciclo del nitrógeno



Fuente: (Agromática, s.f.)

Para el tratamiento de aguas residuales de tipo industrial existen una variedad de tecnologías que se pueden dividir en:

- Métodos químicos
- Métodos físicos
- Métodos biológicos

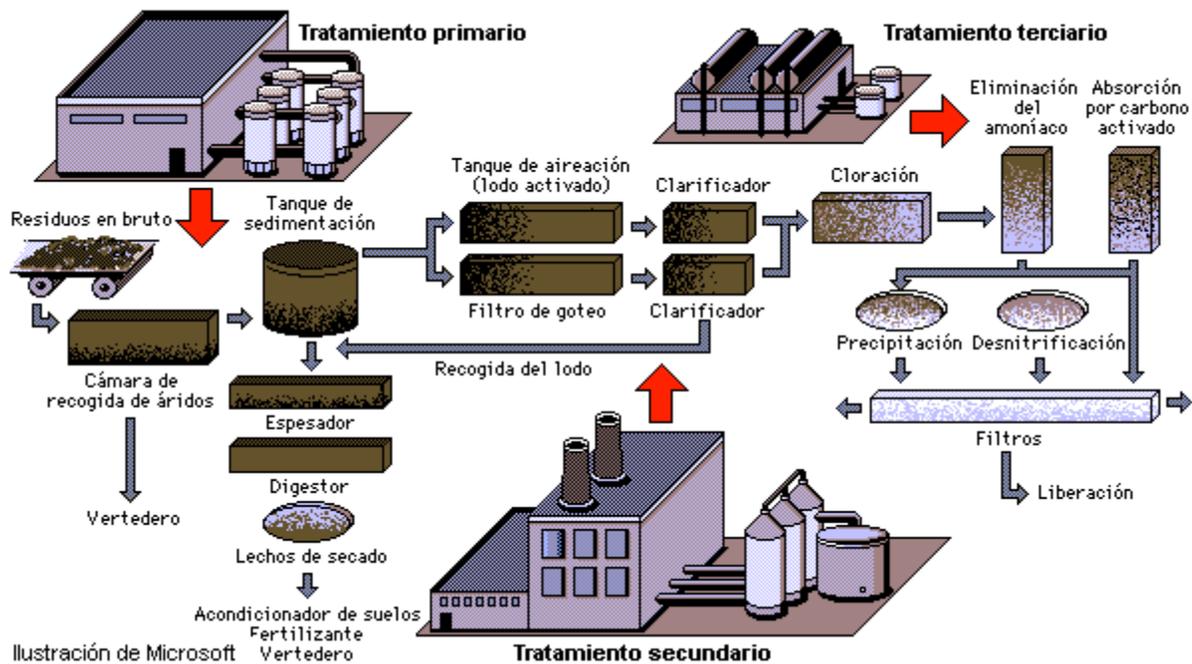
Dependiendo del método a emplear se realiza el tratamiento de aguas residuales y determinan las instalaciones. Si la cantidad de sólidos presente dentro de los efluentes

entonces será necesario un pre-tratamiento para evitar problemas posteriores y reducir la carga de trabajo del tratamiento como tal. (Ramalho, 1977, pág. 75)

La disposición típica de una planta de tratamiento de efluentes líquidos se divide en las siguientes etapas:

- Efluente de entrada
- Tratamiento primario
- Tratamiento secundario
- Tratamiento Terciario
- Desinfección y descarga de efluente.

Figura 1.2. Esquema de Planta de Tratamiento de Efluentes



Fuente: (Tratamiento de Aguas Residuales, s.f.)

El tratamiento primario consiste en una etapa de filtración o pre-tratamiento para retirar el contenido de sólidos de mayor tamaño presente y reducir los sólidos suspendidos.

Los procesos más comunes para separación de sólidos son la sedimentación o decantación, flotación y el proceso mixto de ambos.

El tratamiento secundario corresponde a la etapa que se encarga de retirar materiales orgánicos solubles, sólidos suspendidos, etc. Las técnicas que se emplean durante esta etapa son variadas y son seleccionadas de acuerdo al tipo de contaminante a tratar. Generalmente son usadas lagunas y piscinas de disposición para acumular el agua residual para luego proceder a su tratamiento.

El tratamiento terciario se efectúa para retirar el máximo de sólidos presente en la corriente proveniente de las otras etapas y generar lodo que puede ser aprovechado en la industria agricultora. (Ramalho, 1977, pág. 12)

1.1.1.1. Características del agua residual

Las características del agua residual deben seguir los siguientes parámetros:

1.1.1.1.1. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) determina cuanto oxígeno se encuentra presente en el agua para degradar la materia orgánica. Su determinación se realiza por métodos de laboratorio. (Qasim, 1999, pág. 48)

1.1.1.1.2. Demanda química de oxígeno (DQO)

Demanda química de oxígeno (DQO) determina la cantidad de oxígeno en función a la cantidad de materia orgánica. (Ramalho, 1977, pág. 28)

1.1.1.1.3. Demanda total de oxígeno (DTO)

Demanda total de oxígeno (DTO) es una prueba de laboratorio que consiste en ingresar materia orgánica en un horno para realizar la combustión. Los gases de salida son medidos posteriormente por cromatografía para determinar el oxígeno residual e indirectamente la DTO. (Riffat , 2013, pág. 62)

1.1.1.1.4. Demanda teórica de oxígeno (DTeO)

Demanda teórica de oxígeno (DTeO) se determina por una reacción teórica de oxidación total de compuestos orgánicos conocidos.

El oxígeno disuelto es la cantidad de oxígeno presente en el agua, el cual es vital para la vida acuática y previene la presencia de olores. (Ramalho, 1977, pág. 27)

1.1.1.1.5. Sólidos

Los sólidos se encuentran presentes en el agua residual presentes como sólidos disueltos y no disueltos. Los sólidos no disueltos son sustancias no polares que son de considerable tamaño y por tanto no se disuelven

Los sólidos están distribuidos como sólidos suspendidos, sueltos, coloidales o disueltos, y la agrupación de todos se denomina sólidos totales. (Rowe & Abdel-Magid, 1995, pág. 67)

1.1.1.1.6. Turbidez

La turbidez se refiere a la claridad del agua y no es una medida directa de los sólidos suspendidos, pero sí indirectamente. La turbidez en el agua se causa por la presencia de material suspendido, mientras mayor sea la cantidad de sólidos totales entonces más oscura se ve el agua. La medida de la turbidez es el NTU, a mayores valores el agua se torna más oscura. (Rowe & Abdel-Magid, 1995, pág. 61)

Figura 1.3. Turbidez del agua



Fuente: (Schmitt, 2002)

1.1.1.1.7. Color

El color del agua residual cambia de acuerdo al material de desecho, por ejemplo, el hierro causa una coloración rojiza, el manganeso ocasionar agua de color marrón. (Rowe & Abdel-Magid, 1995, pág. 65)

1.1.1.1.8. Temperatura

La temperatura del agua residual es importante para controlar el tratamiento con inyección de químicos y también en la solubilidad de gases. (Rowe & Abdel-Magid, 1995, pág. 60)

1.1.1.1.9. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es la capacidad que tiene el agua para la corriente eléctrica pase por ella y también da una idea de la concentración de iones o sólidos disueltos. (Rowe & Abdel-Magid, 1995, pág. 66)

1.1.1.1.10. pH

El pH mide la cantidad de concentración de iones hidrógeno e indica dentro de un rango la acidez o alcalinidad del agua. (Metcalf & Eddy, 2014, pág. 90)

1.1.2. Métodos de tratamiento de efluentes en base amoniacal y orgánico

Los métodos de remoción de amoniaco del agua residual son los siguientes:

1.1.2.1. Intercambio iónico

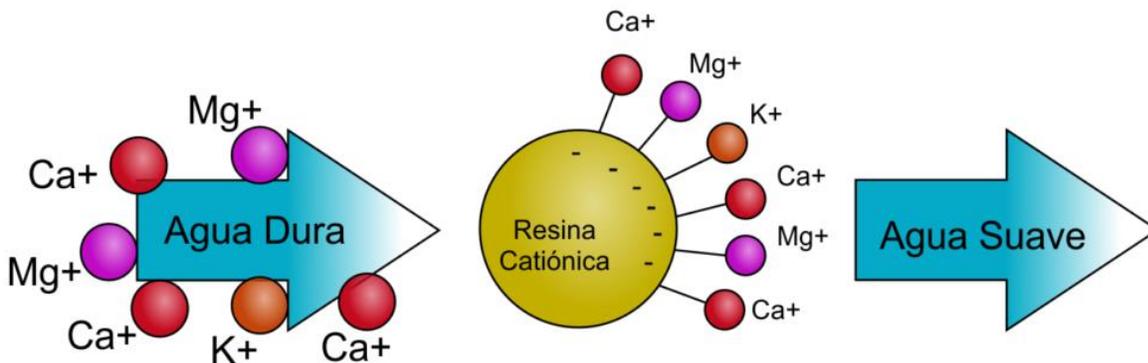
Los intercambiadores iónicos son resinas insolubles que contienen iones intercambiables los cuales son móviles y solubles. El uso de los intercambiadores data de hace muchos años y es comúnmente empleado en la industria para tratar el agua. Los más conocidos son la tierra y la arena, mientras que a nivel industrial se inició con el uso de zeolitas naturales, actualmente se emplean zeolitas sintéticas y poliméricas como intercambiadores iónicos. (Jorgensen, 2002, pág. 5)

El intercambio iónico se da entre dos o más fases, usualmente un líquido y un sólido. La transferencia de iones ocurre por la concentración y selectividad de iones, ésta depende de la estructura química del sólido. (Cheremisinoff, 2002, pág. 372)

La zeolita natural es un intercambiador de cationes ampliamente usado para retirar metales y iones de amoníaco de las corrientes de agua residual. La variedad de zeolitas que existen entre naturales y sintéticas varía en su capacidad de intercambio, siendo la clinoptelolita la de mayor uso para la remoción de nitrógeno amoniacal. El costo de operación es relativamente bajo frente a otros métodos de tratamiento, sin embargo, cuando la zeolita se satura requiere de regeneración por medios químicos, los cuales incrementan el costo total. (Metcalf & Eddy, 2014, pág. 1262)

El principio de estas resinas consiste en el contacto con agua donde el ion se disocia y se convierte en móvil, por tanto, el intercambio ocurre al proveer de iones en la fase acuosa que pueden reemplazar los que se intercambiaron para así mantener el equilibrio. De la misma manera, si otros iones se encuentran en la fase acuosa pueden intercambiar con los iones móviles en la resina. (Cheremisinoff, 2002, pág. 374)

Figura 1.4. Intercambio iónico del agua



Fuente: (ASPA Sistemas de Purificación de Agua, 2018)

Las resinas que se emplean para el intercambio iónico son empacadas en lechos dentro de una columna por donde el agua pasa.

El fluido pasa a través del lecho iónico produciendo el intercambio iónico hasta que llegue a la saturación. Este valor de saturación se determina a distintos caudales,

mientras más grande sea el flujo menor será el tiempo que el lecho produzca el intercambio iónico y viceversa. (Deng, 2014, pág. 35)

La operación de las columnas para intercambio iónico es intermitente debido al efecto de la saturación. Para evitar este problema se instalan más columnas para que la saturada tenga la regeneración de la resina.

La regeneración se usa para devolver a la resina a su condición original y volver a entrar en servicio. Los tipos de regeneración empleados son:

Figura 1.5. Resina de intercambio iónico



Fuente: (Smith, 2021)

Regeneración química consiste en introducir una solución que contenga una alta concentración de iones originales y circule a través de la columna. Luego la resina es sometida a un enjuague con agua pura para retirar iones sueltos y trazas de la solución regeneradora. Este proceso no es sencillo debido a la baja afinidad de algunos iones desplace a las que tienen alta afinidad con la resina, por tanto, la regeneración no suele ser completa.

Para el agua amoniacal, la resina de intercambio se encuentra inicialmente en forma de sodio (Na^+) y la corriente de ingreso contiene iones NH_4^+ . Los iones NH_4^+ desplazan

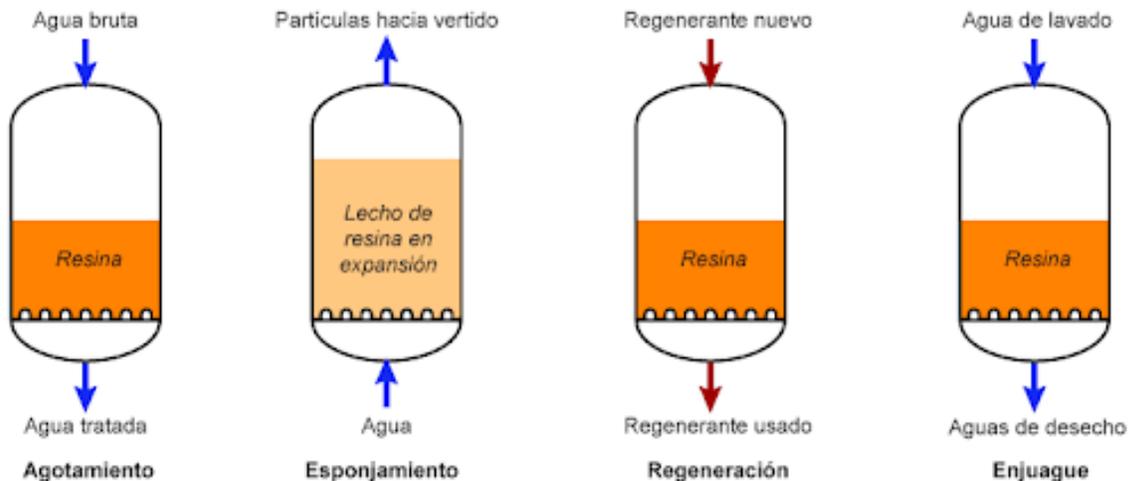
a los iones sódicos hasta que se llegue a la saturación, entonces se debe parar la alimentación a la columna para comenzar con la regeneración. La solución que se emplea para la regeneración será cloruro de sodio. (Jorgensen, 2002, págs. 12-13)

Regeneración biológica es otra forma de retirar NH_4^+ de las resinas para lo cual se emplea el bicarbonato de sodio NaHCO_3 el cual desplaza NH_4^+ y los reemplaza por los iones Na^+ . (Jorgensen, 2002, pág. 13)

Regeneración térmica se calienta la columna entre 300 a 600 °C, para eliminar el ion NH_4^+ y liberarlo en forma de NH_3 y dejar en la resina el ion H^+ . Sin embargo, este método lleva a los siguientes problemas: regeneración incompleta, daño a la estructura de las zeolitas, otros cationes no se desplazan de la corriente principal. (Jorgensen, 2002, pág. 13)

En una planta de tratamiento la disposición de las resinas se hace en serie, paralelo o una mezcla de ambos, esto nos indica que algunas columnas pueden trabajar mientras otras entran en regeneración. Esto da mayor flexibilidad al proceso durante periodos de bajo o alto caudal de ingreso.

Figura 1.6. Ciclo de trabajo de resina iónica



Fuente: (Sefiltra, s.f.)

1.1.2.2. Tratamiento Biológico

Este proceso se basa en diferentes tipos de bacterias como un catalizador para eliminar el amoníaco del agua en procesos de una o dos etapas dependiendo del producto final objetivo de nitrógeno. En el proceso de una etapa, el amoníaco se oxida a nitrato (nitrificación) en un proceso aeróbico. En el proceso de dos etapas, la nitrificación de nitratos a la segunda etapa se reduce a gas nitrógeno (desnitrificación) en condiciones sin oxígeno. (Bui, Chiemchaisri, Fujioka, & Varjani, 2019, pág. 213)

El tratamiento biológico se aplica ampliamente en las aguas residuales domésticas y las corrientes de las industrias agrícolas y alimentarias. Sin embargo, puede tener las siguientes limitaciones:

- Incapacidad para procesar grandes volúmenes de agua o en su defecto de contaminantes.
- Sensibilidad de las bacterias para rastrear metales.
- Largo período de arranque, incluida la recuperación después de las alteraciones en las instalaciones.
- Sensibilidad de la cinética de reacciones catalizadas por bacterias a cambios de temperatura.
- Se requiere agregar fósforo y/o carbono orgánico a la alimentación de la planta para asegurar que la población microbiana pueda ser sostenida.
- Necesidad de eliminar el fósforo y los elementos orgánicos no utilizados para evitar la eutrofización en el entorno corriente abajo.
- Riesgo de toxicidad del efluente debido a subproductos de tratamiento no deseados.
- Incremento de sólidos suspendidos totales en el efluente final.
- Complejidades entre etapas donde las condiciones flujo arriba influyen en las etapas posteriores. (Mohamm & Xiao, 2018).

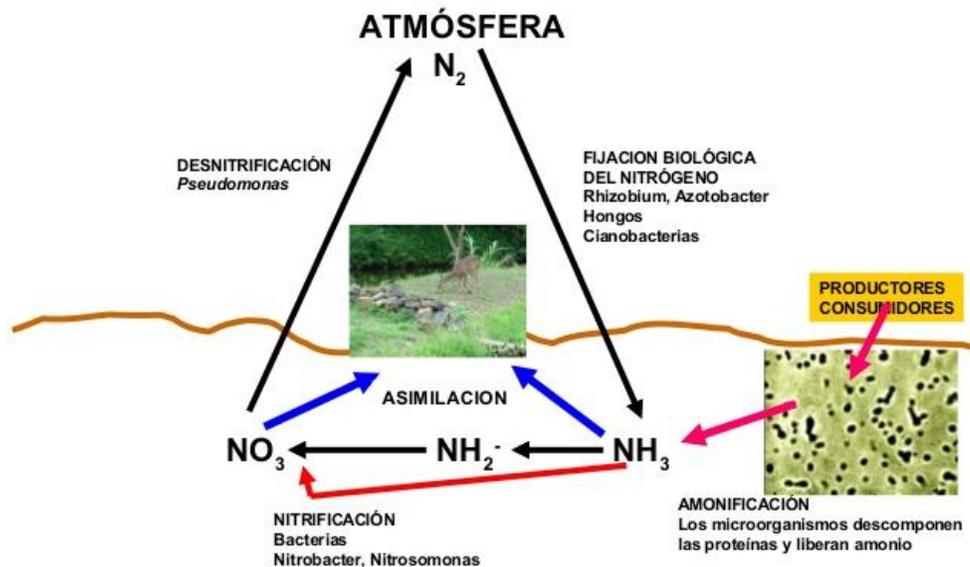
1.1.2.2.1. Nitrificación y desnitrificación

Los compuestos en base amoníaco empleados en la industria de los fertilizantes son absorbidos en el suelo rápidamente y se transforman en nitratos (NO_3^-). El proceso de

transformación del nitrógeno se lleva a cabo por medio de bacterias nitrificantes, que obtienen la energía para su crecimiento y vitalidad por medio de la nitrificación

Los nitratos que no son absorbidos por las plantas se quedan en suelo y pasan por un proceso de desnitrificación, ejemplos de ello son la reducción a amonio NH_4^+ , lixiviación y transporte superficial. Las primeras dos afectan de forma considerable el rendimiento del suelo. (Russell, 2006, págs. 173-174)

Figura 1.7. Nitrificación y desnitrificación



Fuente: (Murguía , 2012)

Las fuentes más importantes de nitratos son la desnitrificación y la lixiviación, lo que a su vez representa mayores gastos para la agricultura en la reposición y además de contaminación de suelos por el lavado que hace la lixiviación. (Ilunga, 2013, pág. 19)

La nitrificación del amoniaco es el resultado de la acción bacteriana de dos grupos, primero la bacteria oxidante amoniacal y luego la bacteria oxidante de nitritos. El fenómeno se da lugar cuando la bacteria toma al amoniaco o el nitrito como fuente de energía y el oxígeno molecular trabaja como receptor de electrones, mientras el dióxido de carbono es el medio de carbono.

El anhídrido carbónico debe pasar por una reducción para que el carbono forme parte de la masa celular, para esto el amoníaco se oxida dando lugar a los nitratos. (Paul, 2007, pág. 347)

Las bacterias que producen la oxidación del amonio son nitrosomonas y nitrobacterias ampliamente usadas en el tratamiento de aguas servidas, aunque también existen otras especies como los nitrosococcus, nitrospira, nitrosovibrio, nitrospina y nitrococcus. (Bock, 2014, pág. 6)

La desnitrificación es la conversión de los iones oxido del nitrógeno (nitritos y nitratos) en nitrógeno molecular a través de una secuencia de cambios de óxidos nitrogenados en media anaeróbico.

Este proceso de desnitrificación se da por el uso de bacterias desnitrificantes, las cuales deben poseer enzimas para reducir los óxidos nitrogenados. Las enzimas requeridas son nitrato reductasa, nitrito reductasa, ácido nítrico reductasa y óxido nitroso reductasa. (Henze, Harremoes, Jansen , & Arvin , 1997, pág. 86)

Las nuevas tecnologías buscan dos efectos: reducir la pérdida de nitrógeno en los cultivos y aumentar la efectividad del nitrógeno para lo cual se realizan estudios con nuevos materiales que aumenten la efectividad de nitrógeno de acuerdo al tipo de cultivo y sus requerimientos.

Un ejemplo de nuevos fertilizantes son los fertilizantes de liberación lenta o controlada llamada urea ESN (environmentally smart nitrogen) que se basan en su estructura. La urea ESN está elaborada con una cubierta de polímero especial que evita la liberación de nitrógeno, disminuyendo la emisión de nitrógeno contaminante y aprovechando la retención para la absorción del cultivo lo cual representa en un beneficio económico y ambiental para la agricultura, ya que reduce la aplicación de nitrógeno. (Dowbenko, 2007, pág. 1)

Los siguientes métodos son modalidades para llevar a cabo la transformación biológica:

1.1.2.2. Cultivo suspendido

Se utiliza lodos activados con bacterias los cuales mediante un proceso de aireación previo o posterior transforman el amoníaco en nitratos por actividad microbiana. El sistema trabaja con una demanda biológica de oxígeno baja y asegura la supervivencia de organismos nitrificadores en la biomasa, sin embargo, es bastante sensible a descargas tóxicas y descensos de temperatura. (Espino Valdés, 2003, pág. 19)

1.1.2.3. Filtros percoladores

Consiste en una cama fija que lleva un medio de plástico o rocas donde el agua circula para realizar tratamiento aeróbico mediante un dosificador rotativo. El agua tratada se recolecta en el parte inferior de la cama y es empleada como medio de nitrificación después de un tratamiento biológico, pero, su limitación radica en la vulnerabilidad al clima frío, la saturación del medio y aparición de vectores y presencia de olor. (Espino Valdés, 2003, pág. 19)

Figura 1.8. Filtros Percoladores



Fuente: (Gestión de Aguas y Residuos (GEDAR), s.f.)

1.1.2.2.4. Discos biológicos

Se trata de reactores biológicos de película que lleva discos de plástico en un eje, los cuales giran mientras el agua a tratar ingresa. El principio de funcionamiento se basa en el contacto del agua con la película biológica que retira la materia orgánica por acción de la rotación exponiendo la biomasa al ambiente para su aireación. Un conjunto de varios discos puede llegar a producir la nitrificación, sin embargo, sus vulnerabilidades son los cambios de temperatura y su limitada capacidad de almacenamiento. (Sperling, 2007, pág. 35)

Figura 1.9. Disco biológico



Fuente: (Nuevo, 2018)

Los siguientes métodos son tratamientos químicos y físicos que no emplean organismos biológicos.

1.1.2.3. Oxidación Química/Electroquímica

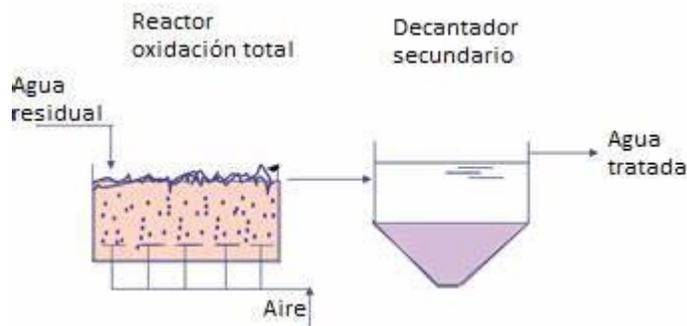
Se pueden usar varios reactivos oxidantes, como cloro, peróxido de hidrógeno y ozono, para oxidar el amoníaco en nitrógeno gaseoso. Estos reactivos se pueden llevar al sitio o pueden ser producidos por medio electroquímico.

Si se usa un sistema electroquímico para producir el reactivo oxidante, el proceso se conoce como oxidación indirecta. Un ejemplo de oxidación electroquímica indirecta es usar el cloruro contenido en las aguas residuales para producir cloro en el ánodo en

una celda electroquímica donde el cloro reacciona posteriormente con el amoníaco. (Cheremisinoff, 2002, pág. 339)

Algunos de estos sistemas electroquímicos también se pueden usar para oxidar directamente el amoníaco. En este proceso, no se requiere un reactivo oxidante y el amoníaco se oxida en una celda electroquímica directamente en el ánodo. La oxidación directa es costosa debido a su dependencia de nuevos materiales anódicos tales como el diamante dopado con boro. (Bock, 2014, pág. 18)

Figura 1.10. Esquema de instalación de oxidación total



Fuente: (GEDAR, s.f.)

Algunos procesos de oxidación se han aplicado ampliamente a escala industrial, como la cloración, mientras que otros se encuentran en fase piloto y de demostración. (Mohamm & Xiao, 2018) Las limitaciones que deben tenerse en cuenta con las tecnologías de oxidación para las aguas residuales son:

- La oxidación no selectiva de amoníaco como oxidantes reaccionará con otros componentes activos dentro del agua.
- Dosis altas de reactivos oxidantes o consumo de energía en función de la química del agua.
- Sensibilidad a la presencia de sólidos suspendidos.
- Los residuos de tratamiento y los subproductos pueden ser tóxicos (por ejemplo, cloro-aminas).
- Los generadores que se emplearán pueden requerir de agua muy purificada, lo cual hace inviable su uso a escala industrial.

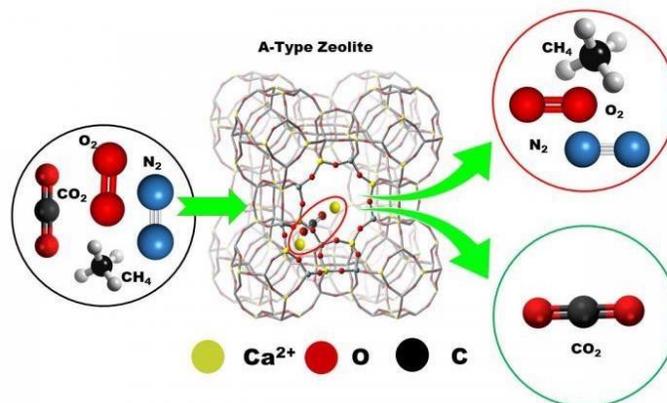
1.1.2.4. Adsorción

La adsorción se refiere a la adhesión del material seleccionado a una superficie. La eliminación de amoníaco que utiliza este proceso se puede dividir en dos categorías principales. (Metcalf & Eddy, 2014, pág. 1227) El primero es la eliminación de amonio catiónico. En su forma catiónica NH_4^+ , el amonio es como cualquier otro catión y puede eliminarse del agua mediante intercambiadores de cationes. Las zeolitas naturales y sintéticas son los intercambiadores de amonio más comúnmente usados

Las zeolitas se han utilizado para la eliminación de amonio en la industria como un medio de uso único y con alta capacidad de regeneración. Su costo relativamente bajo y su tolerancia a las fluctuaciones de flujo y temperatura hace que las zeolitas sean atractivas, pero otras especies catiónicas en el agua pueden competir con el amonio, lo que reduce la eficiencia de la zeolita.

Las zeolitas también están sujetas a degradación física a lo largo del tiempo. Cuando se utiliza como medio regenerador, el proceso de regeneración va dejando una masa contaminada con amoníaco que es difícil de retirar. (Mohamm & Xiao, 2018)

Figura 1.11. Principio de adsorción de zeolita



Fuente: (Okoyama University - InorgChem., 2021)

La segunda categoría es la formación de complejos de amonio no ionizado. En su forma no iónica NH_3 , el amoníaco forma complejos con metales como el cobre y el zinc. Una resina de intercambio iónico infundida con tales metales o carbón activado puede eliminar el amoníaco del agua.

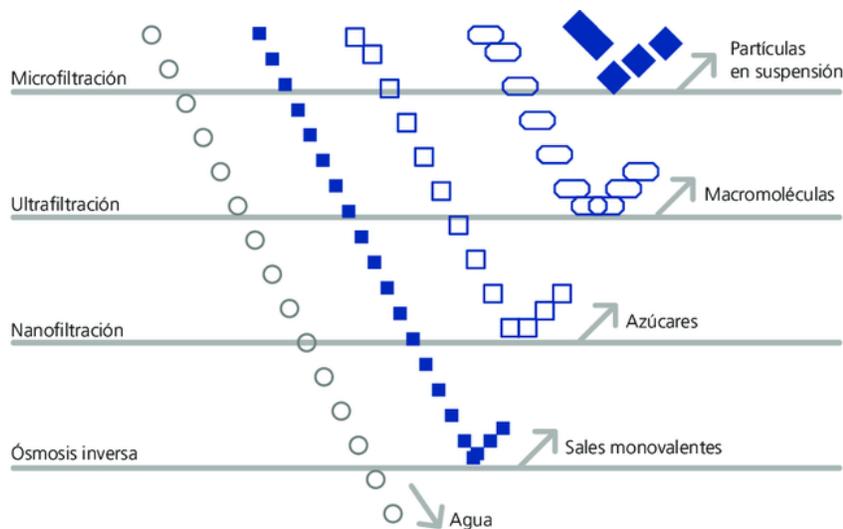
La complejidad del amoníaco con metales es una función de la fuerza iónica de la solución. La eficiencia de estos adsorbedores se reducirá al aumentar los niveles totales de sólidos disueltos (TDS) en el agua residuales. (Jorgensen, 2002, pág. 37)

1.1.2.5. Separación de Membrana

Las tecnologías basadas en membranas como la ósmosis inversa (RO) y la nanofiltración (NF) se pueden utilizar para eliminar el amoníaco de efluentes logrando una eficiencia de eliminación de amoníaco de hasta el 99%. Las membranas de contacto poseen una amplia superficie que separa con facilidad el amoníaco disuelto en el efluente de entrada. (Davis, 2010, pág. 363)

La eficiencia de este sistema depende la corriente de entrada, para lo cual el amoníaco debe estar disociado en amonio, por lo cual se debe realizar un ajuste de pH previo al ingreso al paquete. Una de las principales ventajas de las membranas es el diseño modular que permite reducir el rastro de contaminante en la planta de tratamiento.

Figura 1.12. Mecanismo de separación de membranas



Fuente: (Pródanov, 2012, pág. 106)

Sin embargo, antes de seleccionar la membrana como el método de tratamiento de amoníaco se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos:

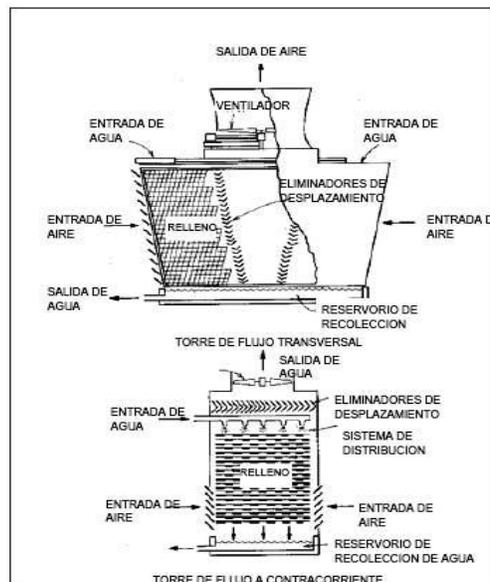
Riesgo de contaminación de la membrana por altas concentraciones de calcio, sulfato y alcalinidad. Se pueden agregar antiincrustantes para mitigar las incrustaciones, por lo tanto, se debe verificar la condición del agua a tratar.

Producción de un subproducto de masa líquida con alta concentración de amoníaco que requiere manipulación, eliminación o tratamiento. La administración de la biomasa que varía de un sitio a otro puede ser una gran parte de los costos del proyecto. (Mohamm & Xiao, 2018)

1.1.2.6. Extracción con aire

Este proceso se basa en la transferencia masiva de NH_3 sin uniones del agua al aire. Para aumentar la tasa de transferencia de masa, debe haber una buena superficie de contacto entre el gas y el líquido. Los sistemas de extracción pueden ser torres y aireadores compactos convencionales que se pueden instalar en estanques de almacenamiento. El amoníaco transferido del agua al aire o sale del sistema en la corriente de aire o es capturado y transferido nuevamente a una forma acuosa usando ácido sulfúrico para producir una solución de sulfato de amonio que tiene un uso potencial como fertilizante. (Environmental Protection Agency (EPA), 2000).

Figura 1.13. Sistema de extracción de amoníaco con aire



Fuente: (Environmental Protection Agency (EPA), 2000, pág. 1)

Un proceso relativamente simple, el uso de extracción con aire para eliminar el amoníaco de las aguas residuales presenta los siguientes problemas:

- Baja eliminación de eficiencia debido a la alta solubilidad del amoníaco en el agua.
- La extracción de aire es sensible a la temperatura ya que la solubilidad del amoníaco en el agua aumenta a temperaturas más bajas. La implementación de un sistema de calentamiento incrementa los costos operativos.
- Alto costo de reactivo asociado con el ajuste del pH para permitir la eliminación de NH_3 y luego volver a bajar para garantizar que el pH final del efluente se encuentre dentro del rango aceptable para la descarga.
- Formación de escalas en equipos de extracción de aire causada por la elevada dureza presente en el agua. (Mohamm & Xiao, 2018)

1.1.3. Despojamiento por aire

El despojamiento por aire es un proceso en el cual un líquido, normalmente agua o agua residual, se pone en íntimo contacto con un gas, normalmente aire, de esta forma sustancias no deseables presentes en el líquido se pueden extraer y arrastrar con el gas. (Metcalf & Eddy, 2014, pág. 1245)

Los efluentes municipales y los desechos industriales se encuentran entre los principales contribuyentes de amoníaco y fósforo a las aguas superficiales. Por esta razón, para eliminar este problema, una alta tasa de remoción de nutrientes en el proceso de tratamiento de efluentes se debe alcanzar. Los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales son efectivos para retirar cerca del 40 al 50% de nitrógeno y entre 25 a 30% de fósforo. Por este motivo, nuevas tecnologías de tratamiento deben complementar los métodos convencionales para mejorar la eficiencia de remoción de nutrientes. (Wang, Hung, & Shammas, 2006, pág. 47)

El descubrimiento de hidrocarburos clorados en entornos remotos alrededor del mundo propició que los investigadores reexaminen las tasas de evaporación de estos componentes. Estos componentes, usualmente de peso molecular elevado y baja

presión de vapor, muestran inesperadamente tasas elevadas de evaporación debido a sus altas presiones parciales de vapor en el equilibrio.

La remoción de sustancias que tienen presiones de vapor de equilibrio razonables a temperatura ambiente (amoníaco, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y muchos componentes orgánicos volátiles COV) por cualquiera de los procesos conocidos como despojamiento por aire o gas demostró ser eficiente y sustentable. La constante de la Ley de Henry es un indicador primario del potencial del componente para la remoción por despojamiento por aire. (Wang, Hung, & Shammas, 2006, pág. 48)

El stripper de tipo torre empacada por contracorriente ofrece una mayor área superficial interfacial para transferencia de masa de componentes volátiles más que otros procesos de despojamiento por gas. Por eso, este método ofrece ventajas significativas en términos de eficiencia y costo total cuando se usa para la remoción de componentes volátiles de corrientes de agua potable y residual. Se han desarrollado ecuaciones para optimizar el diseño del sistema para la remoción de componentes específicos. (Srinivasan, Chowdhury, & Viraraghavan, 2009, págs. 89-90)

1.1.3.1. Ley de Henry

Procesos como la aireación mecánica superficial, aireación difusora, canales de riego, torres de plato o rociado, cascadas de canal abierto y torres empacadas por contracorriente están englobados por el término stripping de aire. Estos procedimientos producen una condición por lo cual un área superficial grande de agua a ser tratada se expone al aire, que promueve la transferencia del contaminante de la fase líquida a la fase gaseosa. Esto ocurre porque bajo condiciones normales la concentración del contaminante en el aire ambiente es más baja que la concentración en el agua contaminada. (Wang, Hung, & Shammas, 2006, pág. 48)

La proporción del contaminante en equilibrio en la fase líquida C_L entre el contaminante en la fase gaseosa C_G es la relación conocida como Ley de Henry:

$$K_H = \frac{C_G}{C_L}$$

Ecuación 3. Constante de Henry

La constante de Henry K_H es una indicación de cuán rápido un componente se evaporará de un cuerpo de agua y además su potencial para remoción por stripping de aire. (Srinivasan, Chowdhury, & Viraraghavan, 2009, pág. 90)

La constante de Henry (K_H con unidades atm x m³/mol y H en su forma adimensional) se considera como un signo de la inestabilidad relativa de un componente. Por ejemplo, en un componente expresa la abundancia del componente en la fase gaseosa con la misma cantidad en la fase acuosa en el equilibrio que es un parámetro importante en el diseño de columnas de despojamiento. A continuación, se muestran las relaciones para diferentes rangos de constante de Henry:

Si K_H es menor a 10⁻⁷ atm-m³/mol, habrá una tendencia ligera de despojamiento desde la fase líquida (baja volatilidad). Si K_H se encuentra en el rango de 10⁻⁷ y 10⁻⁵ atm-m³/mol, el componente se evaporará lentamente de la fase acuosa (baja volatilidad). Los componentes que tienen constantes entre 10⁻⁵ y 10⁻³ atm-m³/mol son relativamente volátiles y comúnmente son fáciles de remover por procesos de despojamiento de aire (volatilidad media o alta). Valores mayores a 10⁻³ atm-m³/mol indican que la evaporación ocurre rápidamente (volatilidad instantánea). (Bahrani, y otros, 2020, pág. 21885)

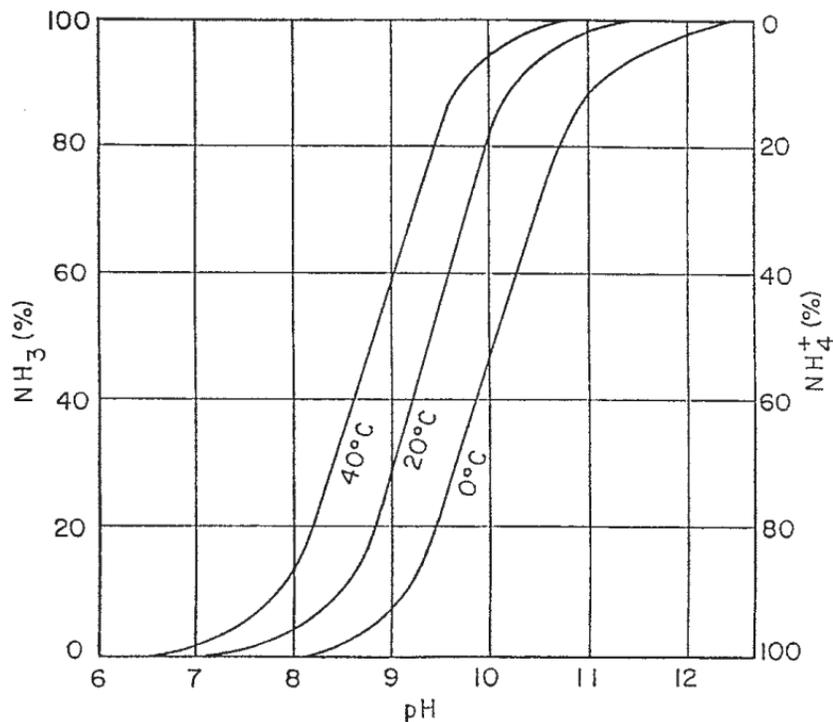
1.1.3.2. Despojamiento de amoníaco por aire

Además de los componentes orgánicos volátiles que se encuentran en el agua, el amoníaco es un componente inorgánico que puede aparecer en las fuentes de agua bebible y se presenta frecuentemente en las aguas residuales. El nitrógeno amoniacal existe en forma de gas disuelto (NH₃) y como solución verdadera (NH₄⁺). Estas dos especies están presentes en un equilibrio dinámico de acuerdo a la Ecuación 1.

Este equilibrio se controla por el producto de la solubilidad que varía con la temperatura. Además, las concentraciones relativas de estas dos especies dependen

del pH de la solución y la temperatura. En general, a una temperatura de 20°C y un pH de 7 o menos, solamente se encuentra iones de amonio. A medida que el pH incrementa por encima de 7, el equilibrio químico se cambia gradualmente a la izquierda en favor de la formación de gas amoniac. A un pH entre 11.5 y 12, solo se encuentra gas disuelto. (Wang, Hung, & Shammass, 2006, pág. 58)

Figura 1.14. Efecto del pH y temperatura en distribución de amoniaco e ion amonio en el agua



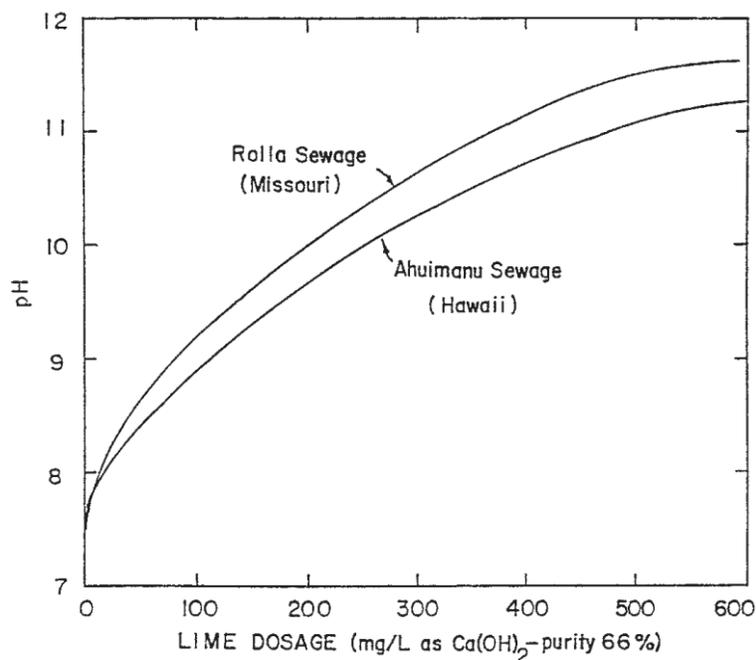
Fuente: (Wang, Hung, & Shammass, 2006)

Además, para convertir todo el amoniaco a la fase de gas disuelto, el stripping eficiente de amoniaco requiere condiciones apropiadas que faciliten una rápida transferencia del gas disuelto de la fase líquida al aire. Esto se puede lograr por la creación de numerosas gotas pequeñas de agua en conjunto con una fuente amplia de flujo de aire. Esto es debido a que la tensión superficial de la interfase aire agua es mínima cuando se forman gotas o películas de agua y la transferencia de gas disuelto de la fase líquida al flujo de aire se encuentra en su máximo es ese instante. (Sperling, 2007, pág. 162)

La eficiencia de una operación de stripping de amoníaco depende principalmente de cinco factores:

- pH. Como se muestra en la figura anterior, la distribución relativa del gas disuelto NH_3 versus los iones amonio NH_4^+ en una solución verdadera depende en gran manera del pH. Es importante elevar el pH hasta un valor de 11 o más para que al menos 95% del nitrógeno amoniacal se puede convertir en forma gaseosa porque solamente los gases disueltos pueden ser extraídos de la solución. En operaciones de gran escala, la cal es normalmente la más económica y también el material más usado para incrementar el pH. La cantidad de cal requerida para elevar el pH depende de las características del agua, principalmente su concentración de bicarbonatos.

Figura 1.15. Cantidad de cal para aumentar pH de dos muestras a varios niveles



Fuente: (Wang, Hung, & Shammas, 2006)

- Temperatura. La temperatura del líquido puede afectar la eficiencia de stripping de amoníaco en dos distintas formas. Primero, a un pH dada, el porcentaje de nitrógeno amoniacal presente como gas disuelto incrementa con la temperatura y segundo, la solubilidad del gas amoníaco en el agua

incrementa cuando la temperatura desciende. A mayor solubilidad, mayor será la cantidad de aire requerido para remover una cantidad de gas amoniacado.

Teóricamente, la tasa de stripping de amoniacado debería ser proporcional a la diferencia de las presiones parciales entre las fases líquido y gas. Para una reducción por cada 10°C en el proceso de agua resultaría en una reducción alrededor del 40% en la diferencia de las presiones parciales, entonces se puede esperar que la tasa de stripping de amoniacado reduzca en la misma proporción. Por tanto, si la eficiencia operativa se debe mantener alta tanto en verano como en invierno, un incremento sustancial del flujo de aire debe proporcionarse para reducir la presión parcial del amoniacado en la corriente de aire y así mantener una diferencia de presiones parciales suficiente entre las fases líquido y gaseosa.

- Tasa de transferencia de gas. Para remover el amoniacado del agua, las moléculas disueltas de NH_3 deben moverse primero de la solución líquida a la interface aire agua y luego de la interface al flujo de aire de despojamiento. Por tanto, hay dos factores que afectan la tasa de transferencia de gas amoniacado del líquido a la atmósfera que la rodea: transporte de las moléculas de NH_3 de la solución líquida entrante a la interface aire agua que se da por difusión molecular en medio turbulento; la distancia corta dentro de la gota aumenta la tasa de transferencia. El segundo factor es la transferencia de las moléculas de amoniacado de la interface aire agua a la fase gaseosa se da cuando la tensión superficial se encuentra al mínimo, que normalmente se presenta cuando las gotas de agua se forman; lo vital de este punto es la formación de pequeñas gotas para garantizar la transferencia a la fase gaseosa en las interfaces de las gotas.

Aparte de la tensión superficial, la diferencia en las presiones parciales del amoniacado entre las fases líquida y gaseosa es la fuerza motriz que ocasiona la transferencia de gas interfacial.

- Tasa de suministro de aire. Debido a que la diferencia entre las presiones del amoniacado en las fases líquido y gas es la fuerza para transferencia del líquido al flujo de aire, una fuente grande de flujo de aire a través de la torre

disminuirá la concentración del amoniaco liberado reduciendo su presión parcial en la fase gaseosa y maximizando la tasa de liberación de amoniaco. La cantidad de aire que se requiere para alcanzar un determinado grado de remoción de amoniaco se puede determinar mediante el siguiente análisis por balance de materia.

$$L_q(x_1 - x_2) = G(y_1 - y_2)$$

Ecuación 4. Relación lineal de concentración, agua y aire

Donde L_q es flujo de líquido a través de la torre de stripping moles de agua/unidad de tiempo; x_1 es concentración de entrada del amoniaco en el agua moles de amoniaco/moles de agua; x_2 es concentración de salida de amoniaco en el agua moles de amoniaco/moles de agua; G es el flujo de aire a través de la torre de stripping moles de aire/unidad de tiempo; y_1 es concentración de salida de amoniaco en aire moles de amoniaco/moles de aire y y_2 es concentración de entrada de amoniaco en aire moles de amoniaco/moles de aire.

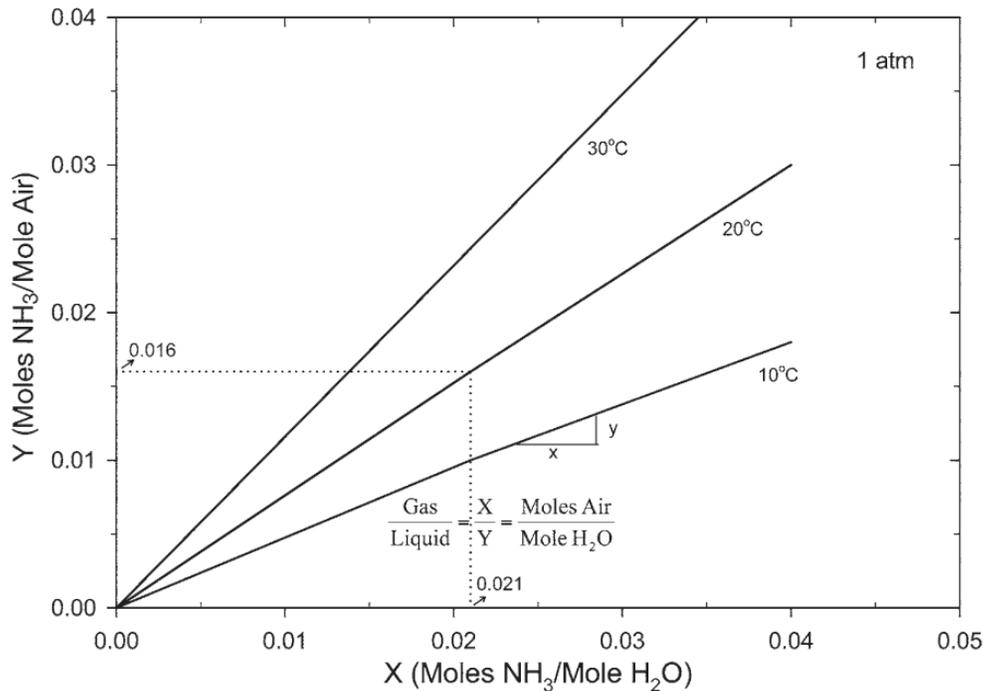
Si el agua que sale y el aire que entra a la torre de stripping tienen una concentración de amoniaco igual a cero, la ecuación 4 se puede escribir de la siguiente forma:

$$L_q x_1 = G y_1 \quad o \quad \frac{G}{L_q} = \frac{x_1}{y_1}$$

Ecuación 5. Relación Gas Líquido

Esta relación es la cantidad de requerimiento de aire por unidad de volumen de agua G/L_q y es igual a x_1/y_1 o la concentración de amoniaco en la entrada de agua (mol/mol) dividido por la concentración en la salida de aire. En la siguiente figura se puede ver el comportamiento de distribución del amoniaco en función de la temperatura a presión atmosférica.

Figura 1.16. Distribución del amoniaco en aire y agua a presión atmosférica



Fuente: (Wang, Hung, & Shammas, 2006)

El gráfico anterior indica que el requerimiento de aire se basa solamente en la temperatura por encima de la concentración de amoniaco, aunque este cálculo es teórico. En términos prácticos para obtener una eficiencia de remoción mayor al 90% se considera un valor de aire 1,5 veces más que el teórico, o también por curvas experimentales obtenidas por los fabricantes de rellenos de torres.

- Tasa de carga hidráulica en la torre de stripping puede afectar la remoción de amoniaco de dos formas. Primero, para una profundidad de torre fija, a mayores tasas de carga hidráulica menor será el periodo de contacto aire agua que disminuye la eficiencia de separación. Segundo, para una configuración de relleno dada, si la tasa de carga hidráulica es muy alta puede causar laminado del agua que reduce la intensidad de formación de gotas y por tanto disminuye la eficiencia de stripping de amoniaco. Normalmente para configuraciones de torres de 6 a 7 metros con un relleno interno de 3.8 x 5 cm, una carga hidráulica entre 0.04 y 0.12 m³/min/m² es recomendable. (Wang, Hung, & Shammas, 2006, págs. 58-62)

1.1.3.3. Características de Stripper de aire por contracorriente

Un stripper de torre empacada por contracorriente tiene dos componentes principales:

- Una torre cilíndrica vertical, cuyas dimensiones oscilan desde 6 pulgadas (17 cm) hasta 9 pulgadas (3m) o más en diámetro y desde algunos pies (2m) hasta 45 pies (15 m) o más de altura. La torre contiene un gran número de elementos de empaque cuyas superficies proveen la interfase para la transferencia de masa de componentes volátiles de la fase acuosa a la gaseosa. Una boquilla de aireación o un distribuidor de líquido en el tope de la torre distribuye el agua entrante sobre el material de empaque por medio de un chorro fino. La carcasa de la torre está hecha comúnmente de FRP (plástico de fibra de vidrio reforzado), aluminio o acero inoxidable.
- Un ventilador de alta capacidad que introduce aire ambiental o caliente al fondo del stripper de aire donde los componentes volátiles son extraídos desde el agua que cubre los elementos de empaque. El aire continúa para remover los componentes volátiles del agua mientras se desplaza a través de la columna. Un elemento de retención de humedad instalado en el tope de la columna previene el escape de grandes cantidades de vapor de agua con el aire saliente.

La altura hidráulica necesaria para bombear el agua entrante a través de la boquilla de aireación puede ser suministrado por el tratamiento existente o bombas sumergibles de suministro o se puede incorporar una bomba adicional de agua. (Wang, Hung, & Shammas, 2006, pág. 50)

1.1.3.4. Procedimiento de diseño de stripper de aire por contracorriente

1.1.3.4.1. Selección de pretratamiento

El pretratamiento de aguas residuales emplea tanques de sedimentación para tratamiento de aguas crudas antes del tratamiento secundario. Los tanques pueden ser de tipo rectangular o circular. El tanque rectangular permite el ingreso del agua

por unas aberturas, cerca del extremo del tanque y va desplazándose a lo largo del mismo con una velocidad baja para descargar en el extremo opuesto.

Los parámetros de diseño de un tanque de sedimentación primaria: la carga superficial, el tiempo de retención y la carga hidráulica.

La carga superficial viene determinada por el flujo de entrada de agua residual entre el área total de tratamiento del tanque expresado en $m^3/m^2 \cdot d$. Una menor carga superficial y mayor tiempo de retención implican mayor eficiencia de remoción de sólidos. (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2015, pág. 35)

El área total del tanque de sedimentación se determina por la siguiente fórmula:

$$CHS = \frac{Q}{A} \rightarrow A = \frac{Q}{CHS}$$

Ecuación 6. Carga superficial

Donde CHS es la carga superficial, Q es el flujo de entrada y A es el área de la superficie total disponible.

El área de un tanque rectangular se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$A = l * a$$

Ecuación 7. Área de tanque rectangular

Donde A es el área total disponible del tanque, l es el largo y a es el ancho del tanque.

El volumen total del tanque se determina por la siguiente ecuación.

$$V = A * h$$

Ecuación 8. Volumen de tanque rectangular

Donde V es el volumen y h es la profundidad del tanque.

El tiempo de retención es fundamental para establecer la cantidad de agua en volumen versus el caudal de ingreso, normalmente para procesos se estima un tiempo de retención de 1 a 3 horas.

$$T_r = \frac{V}{Q}$$

Ecuación 9. Tiempo de retención

Donde T_r es el tiempo de retención, V es el volumen total disponible del tanque y Q es el caudal de ingreso al tanque.

Los tanques de disposición rectangular tienen una relación longitud ancho variable entre 3:1 a 5:1. La profundidad de dichos tanques debe ser mayor a los 2 metros, longitud menor a 90 m y una pendiente suave entre 1 a 2 por ciento en el fondo para la recolección de lodo.

La carga superficial se recomienda que sea de valor bajo para asegurar la operación del sedimentador cuando trabaje con caudales máximos. En teoría, las cargas superficiales permiten tiempos de retención nominales entre 1 a 3 horas, sin embargo, los tiempos reales llegan a ser mayores durante los primeros años. Los parámetros esenciales de un sedimentador se encuentran tabulados en el siguiente cuadro.

Tabla 1.1. Parámetros de tanques sedimentadores rectangulares

Referencias	Carga superficial m/d	Tiempo de retención h	Profundidad m	Carga sobre el vertedero L/(s m)
Metcalf & Eddy, Inc.	32 – 48	1.5 – 2.5	3 – 5	1.4 – 5.8
Normas de los diez estados	41	---	>2.1	<2.2
Manual de diseño naval	49	---	3	<14
Ejército Estados Unidos de América	12 – 41	2.5	2.5 – 4.5	0.7 – 1.7
Steel y McGhee	24 – 60	1 – 2	1 – 5	---
Fair et al.	---	2	3	---
Sundstrom y Klei	---	1 – 4	---	---
USEPA	24 – 49	---	3 – 5	---
Tchobanoglous y Schroeder	30 – 60	---	3 – 5	---
IWPC	30 – 45	2	>1.5	1.2 – 5.2

Fuente: (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2015, pág. 39)

1.1.3.4.2. Constante de Henry

La constante de Henry para el amoniaco en su forma dimensional K_h a una temperatura de 25°C tiene un valor de 0.000016 atm x m³/mol a una determinada

concentración. Según el Anexo 1 la constante de Henry para el amoniaco en su forma adimensional H tiene un valor de 0.000561 y 0.75 atm a una temperatura de 20°C. El cálculo de la variación de la constante de Henry se determina por la siguiente ecuación en función de la temperatura. (Metcalf & Eddy, 2014, págs. 99-100)

$$\log_{10} H = \frac{-A}{T} + B$$

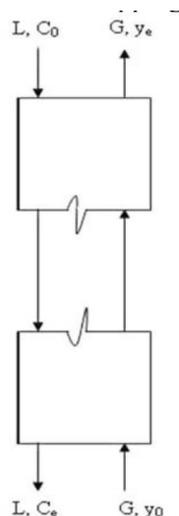
Ecuación 10. Constante de Henry en función de temperatura

Donde H es la constante de Henry expresada en atm, T es la temperatura medida en Kelvin, A y B son constantes empíricas obtenidas por medio del Anexo 1.

1.1.3.4.3. Balance de masa de stripper de aire

La corriente de agua contaminada que atraviesa la torre stripper por flujo en contracorriente con aire tiene el siguiente balance de masa que indica que el flujo de entrada es igual al flujo de salida. (Metcalf & Eddy, 2014, pág. 1247)

Figura 1.17. Balance de masa stripper de aire



Fuente: (Srinivasan, Chowdhury, & Viraraghavan, 2009, pág. 6)

El balance de masa de un stripper de aire puede ser reescrito mediante la siguiente ecuación:

$$y_0 - y_e = L/G * (C_e - C_0)$$

Ecuación 11. Balance de masa stripper de aire

Donde y_0 es la concentración de soluto en el gas que ingresa por el fondo de la columna expresado en moles de soluto por mol de gas libre de soluto; y_e es la concentración de soluto en el gas de salida en el tope de la columna expresado en moles de soluto por mol de gas; C_0 es la concentración de soluto en el líquido que ingresa por el tope de la columna expresado en moles de soluto por mol de líquido; C_e es la concentración de soluto en el líquido que sale del fondo de la columna expresado en moles de soluto por mol de líquido; L es el caudal de líquido expresado en moles por unidad de tiempo; G es el caudal de gas expresado en moles por unidad de tiempo. Para la determinación de una concentración dada se emplea la siguiente ecuación:

$$C_A = \frac{n_A}{n_A + n_B}$$

Ecuación 12. Concentración de soluto A

Donde C_A es la concentración del soluto A expresado en moles de soluto por moles de soluto libre de gas; n_A es el número de moles del soluto A y n_B es el número de moles del soluto B. En el stripping con aire el soluto puede ser representado por el contaminante a reducir.

Para el caso de stripping de aire el soluto viene a ser el amoníaco y el gas que se usa para el despojamiento es el aire, normalmente el aire no lleva presencia de amoníaco en el ambiente por tanto se considera que y_0 es cero entonces para determinar la concentración de amoníaco a la salida de la columna se calcula por la siguiente fórmula.

$$y_e = \frac{H}{P_T} * C'_0$$

Ecuación 13. Determinación de concentración de soluto de salida

Donde H es la constante de Henry expresada en atm, P_t es la presión total normalmente es 1 atm, C_0' es la concentración de soluto en el líquido que se encuentra en equilibrio con el gas de salida expresado en moles de soluto por mol de líquido.

La relación aire líquido G/L representa la cantidad mínima de aire necesaria para el proceso de stripping de aire y es calculada de la siguiente forma.

$$\frac{G}{L} = \frac{P_T}{H} * \frac{(C_0 - C_e)}{C_0}$$

Ecuación 14. Determinación de relación aire líquido

Para la práctica se requiere adicionar un exceso de la cantidad mínima entre 1.5 a 3 veces la cantidad calculada por la ecuación 14. (Metcalf & Eddy, 2014, pág. 1250)

1.1.3.4.4. Selección de columna

Dentro del sector industrial las torres stripper pueden ser de tipo plato o de relleno, ambas presentan ventajas y desventajas relativas mostradas en la siguiente tabla.

Tabla 1.2. Comparación de columna de platos y relleno

Parámetro	Columna de relleno	Columna de plato
Caída de presión	Más favorable	Menos favorable
Inundación	Menos favorable	Más favorable
Canalización	Menos favorable	Más favorable
Líquido con alta espuma	Más favorable	Menos favorable
Retención de líquido	Menos favorable	Más favorable
Atmósfera corrosiva	Más favorable	Menos favorable
Deposición de sedimento	Menos favorable	Más favorable
Problema por cambio de temperatura	Menos favorable	Más favorable
Peso total	Menos favorable	Más favorable
Columna pequeña	Más favorable	Menos favorable
Columna grande	Menos favorable	Más favorable

Fuente: (Srinivasan, Chowdhury, & Viraraghavan, 2009, pág. 7)

1.1.3.4.5. Parámetros de diseño de stripper de aire

Cuatro parámetros clave determinan la eficiencia con lo cual los componentes volátiles pueden ser extraídos de la fase líquida en un stripper de aire. El diseño del stripper de aire debe incluir cada uno de estos factores y equilibrarlos con los requerimientos operacionales de energía para optimizar costos.

- La relación aire con agua a través del stripper de aire controlará la tasa de remoción del contaminante. La relación aire agua requerida para producir la eficiencia de remoción deseada se determina por la concentración y potencial para extracción del contaminante por stripping de aire indicado por la constante de Henry. Un incremento en la relación de aire agua usualmente resulta en tasas de remoción más grandes hasta un punto donde ocurre el entrapamiento de líquido debido al flujo de aire resultando en un incremento rápido en la diferencial de presión de aire en la columna stripper. Este fenómeno se conoce como inundación. La condición contraria ocurre cuando la tasa de flujo de líquido incrementa hasta que la torre comienza a llenarse con líquido. Este fenómeno también se conoce como inundación. Controlar la caída de presión de aire a través de la columna stripper reducirá significativamente los costos de operación del ventilador.
- La altura de la torre empacada también afecta la eficiencia de extracción del contaminante. Un balance óptimo entre la relación de aire agua y la altura de la torre resulta en eficiencias de remoción aceptables con las más bajas combinaciones de capital y costo operacional.
- La tasa deseada de flujo de líquido a ser tratado determinará el diámetro de la columna stripper de aire.
- El tipo de material de empaque tendrá un impacto en la tasa de transferencia de masa porque el área superficial del relleno proporciona el área interfacial de aire agua.

El tamaño del relleno también afecta la caída de presión de aire a través de la torre. Material de relleno más pequeño proporciona mayor área superficial que materiales

más grandes, pero mayor resistencia al flujo de aire. La relación del diámetro de la columna entre el tamaño nominal de relleno debería ser mayor a 12 para prevenir canalización del agua por las paredes del stripper de aire. (Wang, Hung, & Shammas, 2006, págs. 51-52)

Para determinar la tasa de remoción de una sustancia por stripping de aire se considera el coeficiente total de transferencia de masa la cual se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$K_L a = \alpha \left(\frac{L_M}{U_L} \right)^{1-n} * \left(\frac{U_L}{\rho_L D} \right)^{0.5D}$$

Ecuación 15. Coeficiente de transferencia de masa de una sustancia

Donde L_M es la tasa de flujo másico del líquido medido en kg/m²-h, α y n son constantes específicas de acuerdo al tipo de relleno, U_L es viscosidad del líquido, ρ_L es la densidad del líquido y D es el coeficiente de difusión molecular del componente en el agua.

El valor de $K_L a$ se obtiene de estudios en plantas piloto o por medio de correlaciones empíricas de componentes específicos, además esta constante cambia de acuerdo a las condiciones de la temperatura del agua y el aire.

1.1.3.4.5.1. Determinación de HTU y NTU

La cantidad HTU o la altura de la unidad de transferencia caracteriza la eficiencia de la transferencia de masa del agua al aire la cual está determinada por la siguiente ecuación y es una medida de las características de transferencia de masa del material de relleno.

$$HTU = \frac{L}{K_L a * A}$$

Ecuación 16. Altura de una unidad de transferencia

Donde L es el caudal volumétrico del líquido medido en m³/s, $K_L a$ es el coeficiente volumétrico de transferencia de masa medido en 1/s y A es el área transversal de la torre medido en m².

El NTU o número de unidades de transferencia es un factor de diseño que sirve para caracterizar la dificultad de remover el contaminante de la fase líquida y se determina por la siguiente ecuación. (Wang, Hung, & Shammass, 2006, pág. 52)

$$NTU = \left(\frac{S}{S-1} \right) * \ln \left[\frac{(C_0/C_e)(S-1) + 1}{S} \right]$$

Ecuación 17. Número de unidades de transferencia

El término S se denomina factor de stripping y es importante para determinar la habilidad que tiene un stripper de aire para remover un contaminante específico. Si el valor de S es 1 corresponde al requerimiento mínimo de aire para la operación. Si S es menor a 1 entonces no hay suficiente aire para el despojamiento, por el contrario, si S es mayor a 1 entonces la cantidad de aire es excesiva y la operación de la torre se efectúa a una altura infinita. El factor de stripping se encuentra entre 1.5 y 5 en la práctica. (Metcalf & Eddy, 2014, pág. 1256)

1.1.3.4.5.2. Determinación de altura y diámetro de la columna

La altura z de la columna stripper de aire se determina por el producto de los factores HTU y NTU mediante la siguiente ecuación.

$$z = HTU * NTU$$

Ecuación 18. Determinación de altura de columna

La altura de la columna z se mide en metros y es recomendable utilizar un factor de seguridad de 1.5 para corrección al valor práctico.

El diámetro de la columna se determina por la siguiente fórmula.

$$D = \left(\frac{4Q_L \rho_L}{\pi L'} \right)^{0,5}$$

Ecuación 19. Determinación de diámetro de columna

Donde D es el diámetro expresado en m, Q_L es el caudal de diseño en m^3/s y L' es la tasa de carga del líquido medido en $kg/m^2 \cdot s$.

El factor de stripping S se puede determinar mediante la siguiente fórmula.

$$S = \frac{G'}{L'} * \frac{H}{P_T}$$

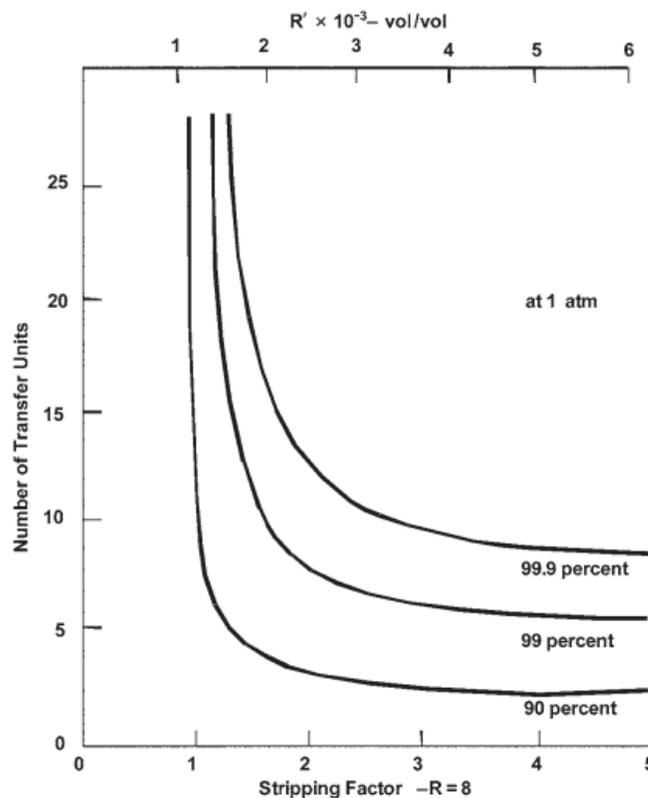
Ecuación 20. Determinación del factor de stripping

Donde G'/L' es la relación gas líquido, G' es la tasa de carga de gas medido en kg/m²-s, H es la constante de Henry en atm, P_T es la presión total del sistema.

De acuerdo a la ecuación 20 se puede deducir que a valores menores de la constante de Henry se requerirá mayores cantidades en la relación gas líquido para obtener tasas de remoción aceptables.

En la siguiente gráfica se muestra la relación entre NTU y el factor de stripping S donde se puede ver un incremento menor en la remoción de contaminantes cuando el factor de stripping es mayor a 5, normalmente el factor práctico S se toma 3 para los cálculos. (Wang, Hung, & Shamas, 2006, pág. 53)

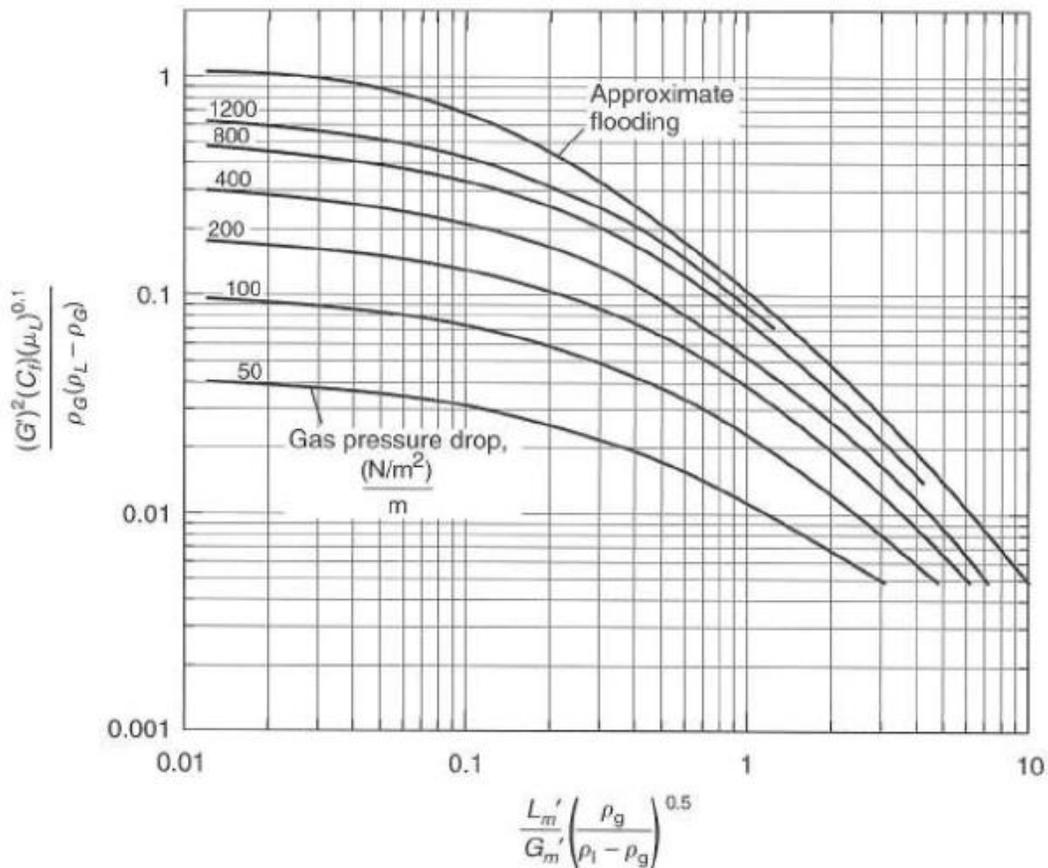
Figura 1.18. Relación entre NTU y S



Fuente: (Wang, Hung, & Shammash, 2006, pág. 53)

El área transversal de la columna stripper depende de la caída de presión a través del relleno de empaque. La caída de presión del relleno se relaciona con la diferencia de presión del gas expresado en (N/m²)/m. Mediante esta correlación se determinaron una serie de curvas para determinar la variación de las tasas de carga del líquido y del gas para estimar el punto de inundación que representa la condición cuando el agua y el aire se aplican en gran cantidad y los espacios del relleno se llenan a tal punto que el agua empieza a rebalsar a través de la columna. (Metcalf & Eddy, 2014, pág. 1257)

Figura 1.19. Curvas de caída de presión para columna con lecho empacado



Fuente: (Metcalf & Eddy, 2014, pág. 1258)

Los puntos X y Y se determinan por las siguientes ecuaciones.

$$X = \frac{L'}{G'} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G} \right)^{1/2} \approx \frac{L'}{G'} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{1/2}$$

Ecuación 21. Determinación de eje X en función de tasa de carga

$$Y = \frac{(G')^2 C_f (\mu_L)^{0.1}}{\rho_G (\rho_L - \rho_G)}$$

Ecuación 22. Determinación de eje Y en función de tasa de carga

Donde L' es la tasa de carga del líquido expresado en kg/m²-s, G' es la tasa de carga del gas expresado en kg/m²-s, ρ_G es la densidad del gas en kg/m³, ρ_L es la densidad del líquido en kg/m³, C_f es factor de relleno del tipo de material del empaque expresado en 1/m, μ_L es la viscosidad del líquido en kg/m-s.

El factor de relleno C_f depende del tipo y tamaño del relleno, dicho valor se obtiene dependiendo del fabricante, aunque existen rangos de valores disponibles.

Tabla 1.3. Factor de relleno C_f para distintos tipos y tamaños de relleno

Ítem	Símbolo	Unidad	Remoción amoniaco
Anillo Pall, Intalox Saddle 12.5 mm	C _f	1/m	180-240
Anillo Pall, Intalox Saddle 25 mm	C _f	1/m	30-60
Anillo Pall, Intalox Saddle 50 mm	C _f	1/m	20-25
Anillo Raschig, Berl Saddle 12.5 mm	C _f	1/m	300-600
Anillo Raschig, Berl Saddle 12.5 mm	C _f	1/m	120-160
Anillo Raschig, Berl Saddle 12.5 mm	C _f	1/m	45-60

Fuente: (Metcalf & Eddy, 2014, pág. 1257)

En función a la experiencia en plantas piloto se representa los rangos de parámetros para la operación de columnas stripper de aire para remoción de amoniaco.

Tabla 1.4. Parámetros de diseño típicos de stripper para amoniaco

Ítem	Símbolo	Unidad	Remoción amoniaco
Tasa de carga de líquido		L/m ² *min	40-80
Relación aire líquido	G/L	m ³ /m ³	2000-6000:1
Factor de stripping	S		1.5-5

Caída de presión permisible de aire	ΔP	N/m ² /m	100-400
Relación altura diámetro	H/D	m/m	≤10:1
Altura de packing	D	m	2-6
Factor de seguridad	SF	%D, %H	20-50
pH agua residual	pH		10.8-11.5

Fuente: (Metcalf & Eddy, 2014, pág. 1257)

1.1.3.4.5.3. Determinación de estación de bombeo

La estación de bombeo consiste en un sistema de bombas localizadas de pozos húmedos donde se almacena el agua residual para tratamiento. Dicha capacidad se encuentra en función del almacenamiento y la cantidad de unidades de bombeo para contemplar una operación continua.

Los arreglos típicos de los pozos húmedos se constituyen en las siguientes: tipo rectangular, tipo circular.

La estación de bombeo se usa para la elevación de líquidos en este caso agua residual de un punto a otro. Se clasifican en dos tipos: pozo húmedo y pozo seco.

Las estaciones de pozo húmedo se consideran aquellas donde las bombas se encuentran sumergidas parcial o completamente, distinguiendo dos clases de sistemas: los suspendidos que tienen la bomba sumergida y el motor por encima de la superficie líquida, mientras que el arreglo sumergido se distingue porque los componentes tanto bomba y motor se encuentran sumergidos dentro del líquido (Qasim, 1999, pág. 215).

Las estaciones de pozo seco se caracterizan por la separación entre un pozo húmedo de recolección y un pozo seco donde se ubica la bomba, y también existen dos configuraciones: tipo seco y tipo auto cebado. El arreglo de tipo seco tiene un pozo húmedo donde se almacena el líquido y adyacente a éste se encuentra el pozo seco donde la succión de la bomba se encuentra al nivel del fondo de la fosa contigua para garantizar el ingreso de líquido, en tanto la configuración de auto cebado es similar a la anterior, con la diferencia de que la succión de la bomba se

encuentra por encima del nivel de reservorio y por tanto la bomba está configurada para autocebado y garantizar la circulación continua de fluido (Qasim, 1999, pág. 215).

Las bombas que se emplean normalmente en aplicaciones de agua residual son las bombas centrífugas, las cuales poseen las siguientes características para su dimensionamiento y funcionamiento apropiado (Mackenzie, 2010, pág. 827). La bomba centrífuga se basa en el principio de elevación de carga por la fuerza centrífuga. La entrada de la bomba es axial y la salida tangencial, donde el flujo acelera por la rotación del impeler que provoca tanto la velocidad axial y tangencial. El incremento en la sección transversal de la voluta produce el cambio de velocidad en presión de cabeza.

La determinación de las características de la bomba centrífuga se da por los siguientes puntos:

La carga dinámica es la energía cinética o potencial equivalente a la altura de una columna de líquido sobre un punto de referencia. La altura de carga se determina tanto en la succión y la descarga de la bomba, además de la pérdida de carga por fricción en la tubería en la succión y descarga y las pérdidas menores identificadas en los accesorios, válvulas, dobleces y otros (Qasim & Zhu, 2018, pág. 299) .

La altura dinámica de carga se expresa de la siguiente manera:

$$TDH = H_{stat} + h_f + h_m$$

Ecuación 23. Cálculo de carga dinámica total de bombeo

Donde TDH es la carga dinámica total expresada en metros, H_{stat} es la carga estática del fluido medido en metros respecto a un punto de referencia, h_f es la pérdida de carga provocada por la fricción en las tuberías del sistema de bombeo y h_m son las pérdidas menores de carga a través de los accesorios del sistema de bombeo.

La pérdida de carga por fricción tanto en la succión y descarga de la bomba son calculadas por medio de la ecuación de Darcy Weisbach o Hazen Williams de la siguiente manera:

$$h_f = \frac{f * L * v^2}{2g * D}$$

Ecuación 24. Cálculo de pérdida de carga por fricción en metros

Donde f es el coeficiente de fricción que depende del número de Reynolds y la rugosidad relativa del material por donde pasa el fluido; L es la longitud de la tubería; v es la velocidad del fluido; g es la aceleración de la gravedad y D es el diámetro equivalente de la tubería.

El coeficiente de fricción es un factor que puede hallarse a través del diagrama de Moody o por correlaciones experimentales. El número de Reynolds es una expresión adimensional que se determina por la siguiente expresión y establece la condición del fluido cuando el comportamiento es turbulento.

$$Re = \frac{v * D}{\nu}$$

Ecuación 25. Número de Reynolds

Donde ν es la viscosidad cinemática del fluido expresado en m^2/s

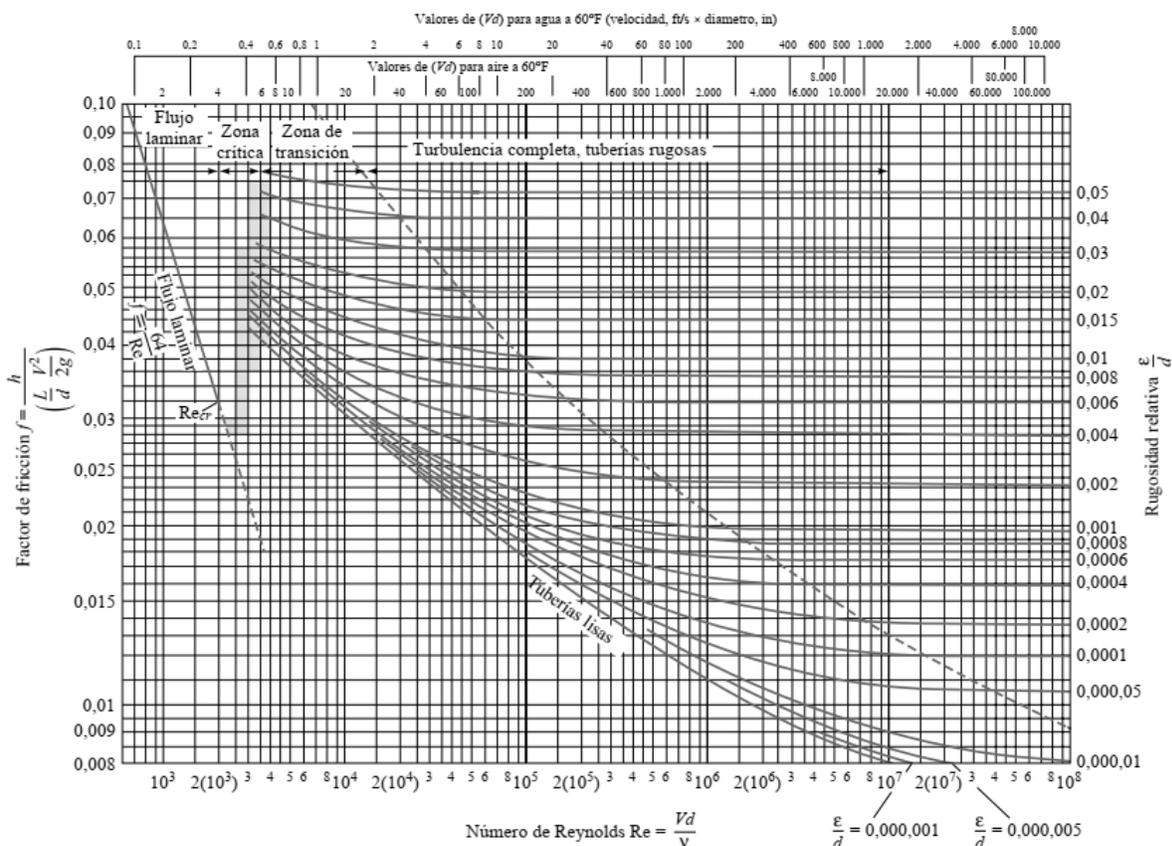
Otro factor importante que se requiere para calcular el número de Reynolds es la rugosidad relativa del material por donde pasa el fluido y se expresa de la siguiente forma:

$$Rugosidad\ relativa = \frac{\epsilon}{D}$$

Ecuación 26. Determinación de la rugosidad relativa

Donde ϵ es la rugosidad absoluta del material es una expresión adimensional. De esta manera el valor del coeficiente de fricción se extrapola en el diagrama de Moody que se muestra a continuación.

Figura 1.20. Diagrama de Moody



Fuente: (White, 2003)

Las pérdidas de carga de los accesorios dependen de un coeficiente de pérdida de carga propia de cada tipo de elemento, aunque en general se puede decir que su fórmula es la que sigue a continuación:

$$h_m = K * \frac{v^2}{2g} + h_v$$

Ecuación 27. Cálculo de las pérdidas menores de los accesorios en metros

Donde K se refiere al coeficiente de pérdida de carga del accesorio y h_v es la carga por velocidad que se determina por el cociente de la velocidad entre la aceleración de la gravedad.

Otra característica importante para el sistema de bombeo involucra a la capacidad que es la cantidad de líquido en volumen por unidad de tiempo normalmente conocida como tasa de flujo.

El balance dinámico del flujo a través de la bomba antes y después del sistema se pueden determinar por la ecuación de continuidad la cual se expresa de la siguiente manera:

$$Q = A_t * v$$

Ecuación 28. Fórmula de continuidad del fluido

Donde Q es el caudal de fluido expresado en m³/h, A_t es el área de la tubería expresado en m², v es la velocidad de flujo en m/s

Normalmente en un sistema de bombeo el caudal de proceso es conocido, sin embargo, la velocidad es un valor que debe determinarse de acuerdo a la experiencia y pruebas de laboratorio. Por tanto, la ecuación de continuidad puede expresarse de la siguiente forma en función al diámetro de la tubería.

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}}$$

Ecuación 29. Determinación de diámetro de tubería

Los valores normales para las velocidades de succión se encuentran entre 0,5 a 1 m/s y para las velocidades de descarga están entre 0,5 a 2 m/s para hallar el diámetro nominal adecuado y económicamente factible para el sistema.

Un paso importante en la selección de una bomba es la determinación de la potencia de trabajo y eficiencia entendida como el trabajo desarrollado por una bomba y que es proporcional al peso específico que se descarga y la altura total de carga del líquido que se mueve. La eficiencia de la bomba es la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada.

$$P_b = K' * Q * TDH * \gamma$$

Ecuación 30. Determinación de la potencia de bombeo en kW (hp)

Donde P_b es la potencia de la bomba en kW o hp; K' es la constante de conversión para cálculo a kW o hp; Q es el flujo de líquido; TDH es la carga dinámica total; γ es la gravedad específica del fluido.

Además, es necesario considerar la eficiencia de la bomba que se representa como la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada, la cual se muestra a continuación:

$$n_{bomba} = \frac{P_b}{P_p}$$

Ecuación 31. Eficiencia de una bomba

Donde P_p es la potencia de entrada de la bomba y n es la eficiencia de la bomba que tiene valor adimensional.

La eficiencia total viene dada por el producto de la eficiencia de la bomba y la eficiencia del motor según la siguiente fórmula:

$$n = n_{bomba} * n_{motor}$$

Ecuación 32. Eficiencia general de una bomba

Las curvas características de la bomba son la representación del comportamiento de la presión de succión y descarga, además de la variación de flujo medida en condiciones cambiantes. También se representan variables como ser la potencia, la carga, la eficiencia en un diagrama que engloba carga, potencia, eficiencia versus el flujo de salida a velocidad constante de la bomba (Spellman, 2003, pág. 207).

Por regla general se determina la carga de succión positiva neta disponible debe ser mayor a la carga NPSH requerida con un margen de seguridad de 1 m o más (Qasim S. , 1999, pág. 225). Se define la carga NPSH disponible como:

$$NPSH_{disp} = H_{abs} + H_s - h_L - H_{vap}$$

Ecuación 33. Cálculo de NPSH disponible

Donde H_{abs} es la presión absoluta sobre la superficie del líquido en la succión; H_s es la presión estática de la línea central de la bomba como punto de referencia; h_L se trata del total de pérdidas de carga en relación a la fricción, pérdida en accesorios e instrumentos; H_{vap} es la presión de vapor del líquido a una determinada temperatura.

La relación que debe mantenerse en el sistema de bombeo debe ser que NPSH disponible sea mayor a NPSH requerida para evitar la cavitación de la bomba durante la operación de la misma.

La cavitación es el fenómeno que ocurre dentro de la bomba al formarse burbujas cuando la presión absoluta del líquido alcanza la presión de vapor a cierta temperatura produciendo el colapso de las burbujas. Las causas que pueden conllevar a esta condición son distintas, pero se identifica por la reducción del flujo y en casos extremos produce daño en la superficie del impeler hasta fallas del equipo de bombeo (Qasim S. , 1999, pág. 225).

1.1.3.4.5.4. Determinación de ventilador

El ventilador es una máquina rotativa que desplaza una masa de gas o vapor a una velocidad deseada, la misma se desplaza generando una presión relativamente baja en comparación a los compresores. Su propósito es mover el aire o gas sin producir excesiva presión provocada por la resistencia del fluido (Yahya, 2002, pág. 624).

Los principales tipos de ventiladores son los de tipo axial, centrífugo y de flujo mixto, la primera se emplea para aplicaciones con baja presión y las centrífugas son usadas principalmente para en máquinas de alta presión o sea de uso industrial (Yahya, 2002, pág. 624).

El ventilador de tipo centrífugo trabaja por medio de dos efectos: la fuerza centrífuga y a continuación la deflexión del flujo de aire a través de los álabes. Este movimiento es particularmente de forma radial hacia afuera con un patrón de flujo en espiral. El patrón de flujo de aire provoca que el rotor comience a girar, de esta manera el aire

que queda entre los álabes se desplaza por la fuerza centrífuga hacia el exterior. (Bleier, 1998, pág. 173)

La selección del ventilador requiere de los siguientes parámetros: el flujo de aire requerido, la presión estática y preferentemente la configuración del flujo de aire para determinar dos valores importantes velocidad específica y diámetro específico.

La velocidad específica se refiere a la velocidad que un modelo de ventilador tendría que operar para entregar una descarga de 1 pie cúbico por minuto con una resistencia de 1 pulgada de columna de agua; su propósito es más como herramienta para seleccionar el tipo de ventilador a usarse (Bleier, 1998, pág. 234). Se puede calcular por la siguiente fórmula:

$$R = \frac{\sqrt{cfm}}{(SP)^{3/4}}$$

Ecuación 34. Relación de caudal y presión de resistencia

Donde R viene a ser la relación de volumen y presión estática, cfm es el flujo de aire requerido y SP es la presión estática de resistencia.

El diámetro específico se convierte en el diámetro acorde para cumplir con las condiciones de velocidad específica para obtener 1 pie cúbico de aire por minuto a una presión de 1 pulgada de columna de agua. Viene dada por la ecuación:

$$D_s = \frac{D * (SP)^{1/4}}{\sqrt{cfm}}$$

Ecuación 35. Determinación de diámetro específico

Una vez determinada la velocidad específica se puede seleccionar el tipo de ventilador en base al Anexo 2. Una vez determinado el tipo de ventilador se puede hallar la potencia requerida para mover el flujo de aire por medio de curvas de rendimiento provistas por los fabricantes por medio del cual se encuentra el modelo adecuado para el movimiento del aire.

1.2. Marco Normativo

Las normas aplicables para el estudio de aguas residuales son las siguientes:

1.2.1. ASTM – D 1293

El pH del agua es un parámetro crítico que afecta la solubilidad de trazas de metal, la habilidad del agua para formar escalas o causar corrosión metálica, y la capacidad del agua para mantener organismos vivos. Es una escala definida, basado en un sistema de soluciones buffer con valores asignados. En el agua pura a 25 °C, el pH 7,0 es el punto neutro, pero este valor cambia con la temperatura y la fuerza iónica de la muestra. El agua pura en equilibrio con aire tiene un pH cercano a 5,5, y la mayoría de las aguas no contaminadas están en el rango de pH 6 y pH 9. (ASTM International, 2018)

Estos métodos cubren la determinación de pH por medición electrométrica usando un electrodo de vidrio como sensor. Los dos métodos que se usan son los siguientes:

Prueba Método A – Medición precisa de Laboratorio.

Prueba Método B – Rutina o medición continua.

1.2.2. ASTM – D 1426

Pruebas Estándar para Nitrógeno amoniacal en el agua

El nitrógeno es un nutriente en el medio ambiente y es necesario para mantener el crecimiento de muchos organismos. Existe en varias formas como ser nitratos, nitritos, nitrógeno orgánico presente en las proteínas o aminoácidos, y el amoníaco.

El amoníaco es un compuesto sin color, gaseoso con un olor distintivo. Es altamente soluble en agua donde se presenta en su forma molecular asociada con el agua y en forma ionizada como NH_4^+ . La duración de la asociación o ionización depende de la temperatura y el pH. Puede ser tóxico para la vida acuática. La prolongación de la toxicidad es dependiente de las especies y el grado de disociación. El amoníaco se puede presentar en el agua producto de la descomposición anaeróbica del nitrógeno

que contenga compuestos o de corrientes de desecho que contengan amoniaco. (ASTM International, 2015)

Los métodos de prueba cubren la determinación del nitrógeno amoniacal. Exclusivo del nitrógeno orgánico, en el agua. Los dos métodos que se incluyen son:

Método de prueba A – Nesslerización directa.

Método de prueba B – Electrodo de ion selectivo.

1.2.3. ASTM – D 888

Pruebas Estándar para oxígeno disuelto en el agua

El oxígeno disuelto se requiere para la supervivencia y crecimiento de muchos organismos acuáticos, incluyendo peces. La concentración de oxígeno disuelto puede estar asociado con la corrosividad y la actividad fotosintética. La ausencia de oxígeno puede permitir el decaimiento anaeróbico de la materia orgánica y la producción de materiales tóxicos y estéticamente no deseables en el agua. (ASTM International , 2018)

Los métodos de prueba cubren la determinación del oxígeno disuelto en el agua. Tres métodos se entregan a continuación:

Método de prueba A – Procedimiento titrimétrico – Alto nivel

Método de prueba B – Procedimiento de sonda instrumental – electroquímico.

Método de prueba C – Procedimiento de sonda instrumental – Sensor basado en luminiscencia.

1.2.4. APHA N-4500

Determinación de nitrato (NO_3^-)

La determinación del nitrato es difícil debido a los procedimientos relativamente complejos requeridos, la alta probabilidad de interferencia de otros componentes está presente, y los rangos de concentración limitados de las distintas técnicas. (American Public Health Association, 2018)

1.2.4. ASME BPVC Sección VIII

Reglas para construcción de recipientes de presión División 1

Esta División de la Sección VIII proporciona los requerimientos aplicables para el diseño, fabricación, inspección, prueba, y certificación de recipientes a presión que operan a presiones internas o externas por encima de 15 psig. Dichos recipientes de presión pueden estar en medio de fuego o no. Los requerimientos específicos aplican a las diversas clases de material usado en la construcción del recipiente, y también a los métodos de fabricación como ser la soldadura, raspado y alisado. Contiene apéndices obligatorios y no obligatorios que detalla criterio suplementario de diseño, pruebas no destructivas y estándares de aceptación de inspección. (American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2016)

1.2.5. API 610 11th

Bombas centrífugas para servicios de la industria de petróleo, petroquímica y gas natural.

Este estándar internacional se aplica a bombas colgantes, bombas entre rodamientos, y bombas verticales suspendidas. La cláusula 9 provee los requerimientos aplicables para tipos específicos de bombas. Todas las otras cláusulas de esta Norma Internacional son aplicables a todos los tipos de bombas. Se incluyen ilustraciones de varios tipos de bombas específicas y las designaciones asignadas a cada tipo específico. (American Petroleum Institute (API), 2010, pág. 1)

1.3. Marco Legal

1.3.1. Ley del Medio Ambiente 1333 del 27 de abril de 1992

De acuerdo a (Ley del Medio Ambiente, 1992) se establece la normativa para reglamentar la emisión de contaminantes en el agua dentro del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, el cual menciona lo siguiente:

CAPITULO III

DE LA CLASIFICACION DE CUERPOS DE AGUAS

ARTICULO 4º La clasificación de los cuerpos de agua, según las clases señaladas en el Cuadro N° 1 - Anexo A del presente reglamento, basada en su aptitud de uso y de acuerdo con las políticas ambientales del país en el marco del desarrollo sostenible, será determinada por el MDSMA. Para ello, las instancias ambientales dependientes del prefecto deberán proponer una clasificación, adjuntando la documentación suficiente para comprobar la pertinencia de dicha clasificación. Esta documentación contendrá como mínimo: Análisis de aguas del curso receptor a ser clasificado, que incluya al menos los parámetros básicos, fotografías que documenten el uso actual del cuerpo receptor, investigación de las condiciones de contaminación natural y actual por aguas residuales crudas o tratadas, condiciones biológicas, estudio de las fuentes contaminantes actuales y la probable evolución en el futuro en cuanto a la cantidad y calidad de las descargas.

Esta clasificación general de cuerpos de agua; en relación con su aptitud de uso, obedece a los siguientes lineamientos:

CLASE “A” Aguas naturales de máxima calidad, que las habilita como agua potable para consumo humano sin ningún tratamiento previo, o con simple desinfección bacteriológica en los casos necesarios verificados por laboratorio.

CLASE “B” Aguas de utilidad general, que para consumo humano requieren tratamiento físico y desinfección bacteriológica.

CLASE “C” Aguas de utilidad general, que para ser habilitadas para consumo humano requieren tratamiento físico-químico completo y desinfección bacteriológica.

CLASE “D” Aguas de calidad mínima, que, para consumo humano, en los casos extremos de necesidad pública, requieren un proceso inicial de presedimentación, pues pueden tener una elevada turbiedad por elevado

contenido de sólidos en suspensión, y luego tratamiento físico-químico completo y desinfección bacteriológica especial contra huevos y parásitos intestinales.

En caso de que la clasificación de un cuerpo de agua afecte la viabilidad económica de un establecimiento, el Representante Legal de éste podrá apelar dicha clasificación ante la autoridad ambiental competente, previa presentación del respectivo análisis costo - beneficio.

ARTICULO 5º Los límites máximos de parámetros permitidos en cuerpos de agua que se pueda utilizar como cuerpos receptores, son los indicados en el Cuadro N° A-I del Anexo A de este Reglamento.

ARTICULO 6º Se considera como PARAMETROS BASICOS, los siguientes: DBO5; DQO; Colifecales NMP; Oxígeno Disuelto; Arsénico Total; Cadmio; Cianuros; Cromo Hexavalente; Fosfato Total; Mercurio; Plomo; Aldrín; Clordano; Dieldrín; DDT; Endrín; Malatión; Paratión.

ARTICULO 7º En la clasificación de los cuerpos de agua se permitirá que hasta veinte

de los parámetros especificados en el Cuadro N° A-1 superen los valores máximos

admisibles indicados para la clase de agua que corresponda asignar al cuerpo, con las

siguientes limitaciones:

1º Ninguno de los veinte parámetros puede pertenecer a los PARAMETROS BASICOS del Art. 6º.

2º El exceso no debe superar el 50% del valor máximo admisible del parámetro.

El reglamento de contaminación hídrica dentro de la ley del medio ambiente regula la descarga de efluentes contaminados con amoníaco provenientes del sector industrial,

por ejemplo, el sector de hidrocarburos y energía. Los límites admisibles del presente trabajo para aguas de clase D se encuentran en el Anexo 3: Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores.

CAPITULO 2 DIAGNÓSTICO

2.1 Diagnóstico mundial sobre tratamiento de aguas residuales

El panorama mundial en relación al tratamiento de aguas residuales es un tema que no está ampliamente difundido en todos los continentes, en los países desarrollados existe un mayor procesamiento de efluentes mientras que en los países no desarrollados existe poca atención al procesamiento de aguas residuales que son vertidas en suelos y cuerpos de agua.

Del agua dulce total consumida por el ser humano, el 44% se consume en agricultura y que por procesos de evaporación se dispersa en el ambiente y el restante 56% se libera en forma de efluentes residuales divididos en municipales, industriales y drenajes de agua agrícola. (WWAP, 2017, pág. 9)

De acuerdo a este análisis el nivel de procesamiento de aguas residuales depende directamente del nivel de ingresos económicos de una región. Los países con mayores ingresos económicos procesan alrededor del 70% de los efluentes producidos entre municipales e industriales, en países con ingresos medio-altos se logra recuperar el 38%, en países con ingresos medio-bajos se obtiene un 28% y en países con ingresos bajos se procesan solamente el 8% del total emanado al medio ambiente. A nivel global se considera que más del 80% de las aguas residuales son vertidas al medio ambiente sin recibir ningún tratamiento adecuado para su disposición.

Según regiones se estima que en Europa se procesa el 71% de las aguas residuales de origen municipal e industrial. En América Latina solamente se procesa el 20% de la cantidad de efluentes generados, mientras que en Medio Oriente y la región de África del Norte se procesa el 51% del agua residual. Países pobres de África Central no tienen capacidad de procesar aguas residuales porque están afectados por una crisis económica por lo cual no se pueden implementar métodos de tratamiento de efluentes de carácter municipal e industrial. (WWAP, 2017, págs. 9-10)

2.2 Diagnóstico Organizacional de YPFB Corporación sobre el tratamiento de efluentes de amoniaco

2.2.1 Nombre de la empresa

Y.P.F.B. Yacimientos Petrolíferos Fiscales Boliviano Corporación

2.2.2. Misión

Operar y desarrollar la cadena de hidrocarburos, garantizando el abastecimiento del mercado interno, el cumplimiento de los contratos de exportación y la apertura de nuevos mercados, generando el mayor valor para beneficio de los bolivianos.

2.2.3 Visión

Corporación estatal de hidrocarburos, pilar fundamental del desarrollo de Bolivia, reconocida como un modelo de gestión eficiente, rentable y transparente, con responsabilidad social y ambiental y presencia internacional.

2.2.4 Principios y valores

Integridad: conducta ética, respeto, honestidad y transparencia.

Seguridad: cuidado de la salud de las personas, el medio ambiente y los activos de la corporación.

Excelencia: mejora continua, orientación a los resultados, innovación, pasión por el trabajo.

Proactividad: generación y aprovechamiento de oportunidades, liderazgo, iniciativa y creatividad.

Trabajo en equipo: creación de sinergias para el logro de objetivos comunes.

Compromiso: con nuestra gente, la corporación y el país. Lo hacemos por convicción y no por imposición ni obligación.

Responsabilidad: asumir los resultados de nuestros actos, de manera individual y colectiva.

Diversidad e inclusión: trato justo e igualdad de oportunidades para todos.

2.2.6 Historia de YPFB sobre el tratamiento de efluentes de amoniaco

En septiembre de 2017, el presidente Evo Morales inaugura la primera planta de Amoniaco y Urea en la localidad de Bulu Bulu, dentro del departamento de Cochabamba. Esta planta está destinada a la industrialización del gas natural para producir fertilizante de alta calidad. La capacidad instalada de producción es de 2100 toneladas métricas por día de urea granulada. (YPFB, 2017) Actualmente la planta produce fertilizante para consumo nacional y de exportación con su principal comprador el país vecino de Brasil.

La planta de amoniaco y urea desde su inauguración ha registrado algunos eventos relacionados con la contaminación del arroyo Muñecas, previamente en fecha 18 de abril de 2017 se evidenció presencia de amoniaco en los efluentes de planta por encima de los valores permisibles durante las pruebas de los equipos. El siguiente suceso se registró durante mayo de 2018 donde se reportó una fuga en un equipo que se prolongó por 15 días, cuyo resultado fue la contaminación de los cuerpos de agua circundantes al complejo. (La planta de Urea y amoniaco, en medio de fugas y paralizaciones, 2018)

2.2.7 Ubicación

La oficina central de YPFB Corporación se encuentra ubicada en la ciudad de La Paz. YPFB Casa Matriz está establecida en pleno centro paceño en el edificio corporativos de la Calle Bueno N°185.

La Vicepresidencia Nacional de Operaciones VPNO se encuentra en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, en la Avenida Grigotá (Doble Vía la Guardia) entre Tercer Anillo Externo y Calle Las Palmas, donde la Gerencia de Industrialización es la unidad que gestiona y administra las operaciones de la planta de amoniaco y urea.

La planta de amoniaco y urea se encuentra ubicada en el departamento de Cochabamba, localidad de Bulu Bulu perteneciente a la provincia Carrasco en pleno corazón del Chapare donde efectúa sus operaciones.

2.2.8 Sucursales y Participación en el mercado.

La planta de amoniaco y urea es un complejo que contempla las siguientes unidades: planta de amoniaco, planta de urea, planta de servicios auxiliares y el área de manejo de producto. La unidad de manejo de producto coordina sus operaciones con la Gerencia de Comercialización para la distribución y posterior venta de urea granulada en sus diferentes presentaciones. La planta de amoniaco y urea abastece la capacidad del mercado interno en su totalidad por medio de la venta de urea en sus distintas sucursales a nivel nacional, y venta a mercado externo por despacho de camiones contenedores a clientes internacionales.

2.3 Diagnóstico del Sistema de Tratamiento de Efluentes Líquidos de la Planta de amoniaco y urea

2.3.1 Descripción de la Planta de Amoniaco y Urea.

La planta de Amoniaco y Urea fue construida y comisionada por la empresa Samsung Engineering en una superficie cercana a 30 000 m², supervisada y fiscalizada por YPFB Corporación y la empresa Bureau Veritas. La capacidad de producción de amoniaco es de 1200 toneladas métricas diarias y 2100 toneladas métricas de urea granulada diarias al 100% de capacidad. (Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), 2021)

El complejo está dividido en tres plantas: planta de amoniaco, planta de urea y planta de servicios auxiliares.

La planta de amoniaco procesa el gas natural seco proveniente de la planta Carrasco dependiente de YPFB Chaco con una alimentación de 50 MMPCD. El proceso de amoniaco empleado es de tecnología Purifier de KBR para una producción de 1200 toneladas de amoníaco diarias. (KBR, s.f.) El proceso consta de 6 etapas:

- Reformación, proceso por el cual se descompone el gas natural en gas de síntesis compuesto por hidrógeno y gases de combustión CO y CO₂ en medio de un catalizador por medio de calor dentro de un horno. Existe una segunda

fase de reformación donde se agrega aire el cual aporta el nitrógeno a la corriente de gas de síntesis.

- Conversión de CO₂, proceso en el cual el gas de síntesis pasa por reactores con catalizador para la transformación de CO monóxido de carbono en CO₂ dióxido de carbono. Cantidades mínimas de monóxido se obtienen al finalizar esta etapa.
- Remoción de CO₂, etapa de purificación de gas de síntesis donde se retira el dióxido de carbono por medios físicos mediante una columna de absorción con amina. Al salir de esta etapa, el gas de síntesis queda con trazas mínimas de dióxido de carbono. El dióxido de carbono es recuperado en esta sección para posteriormente como subproducto para la producción de urea granulada.
- Purificación de Gas de Síntesis, en esta etapa el gas de síntesis pasa por un reactor llamado metanador, donde las trazas de monóxido y dióxido de carbono se transforman en metano, luego esta corriente gaseosa pasa a un sistema de secado por medio de tamices moleculares donde se retira el excedente de agua generado durante el proceso. El gas seco es ingresado a una unidad criogénica para ajustar la relación de nitrógeno e hidrógeno a 3:1 y retirar el excedente de metano generado anteriormente.
- Conversión de Amoníaco, este proceso se lleva a cabo dentro de un reactor con un catalizador de hierro donde se lleva a cabo la transformación del hidrógeno y el nitrógeno en amoníaco en condiciones de presión y temperatura altas. El producto final se encuentra en forma gaseosa.
- Refrigeración de Amoníaco, este proceso consiste en condensar el gas amoníaco obtenido anteriormente en su estado líquido. Se obtienen dos corrientes: el amoníaco cálido que es utilizado como materia prima para la producción de urea y el amoníaco frío que es almacenado en un tanque a presión atmosférica y una temperatura de -33°C.
- Recuperación de Amoníaco, es un proceso por el cual los gases no condensados durante la etapa de refrigeración son separados de los gases inertes provenientes del aire, para luego ser devueltos para su reprocesamiento en la etapa de conversión.

La planta de urea utiliza como materia prima el amoníaco cáldo y el dióxido de carbono de la planta de amoníaco para producir urea granulada. La tecnología empleada en la planta le pertenece a Toyo Engineering con su proceso ACES21. (Toyo Engineering, 2006)

La planta de urea está dividida en las siguientes etapas:

- Síntesis, proceso donde se mezcla el amoníaco y el dióxido de carbono para formar urea en estado líquido, carbamato de amonio un producto intermedio y agua en condiciones de presión y temperatura altas.
- Purificación, se caracteriza por la separación de gases amoníaco y dióxido de carbono que no se han transformado en urea y así purificar la solución resultante y llevarla a un tanque de almacenamiento de urea líquida.
- Concentración, consiste en la separación de la urea líquida del agua acumulada en el tanque de almacenamiento para llevarla a una concentración cercana a 96% en pureza de urea líquida.
- Recuperación, se trata de una sección donde los gases recuperados de la etapa de purificación son disueltos en agua para luego ser devueltos a la unidad de síntesis como recicló.
- Granulación, esta sección se caracteriza por llevar varias unidades mecánicas como ser cintas, elevadores, zarandas, trituradores y el más importante el granulador donde se depositan gránulos de urea de diámetro inferior al comercial que sirven como semilla para la formación de granos de urea por el rocío de urea líquida proveniente de la unidad de concentración. Este proceso se lleva a cabo por la aplicación de aire para suspender los granos y mediante el rociado de urea líquida se aumenta el tamaño de los mismos. Posteriormente, son desplazados para su clasificación, los más grandes son triturados para obtener semilla y se mezclan con los más pequeños, mientras que el producto es transportado hacia el almacén para su acopio.
- Tratamiento de Condensado, este proceso consiste en la recuperación del agua de las distintas etapas del proceso, los cuales llevan trazas de gases amoníaco y dióxido de carbono que deben ser retirados. Estos gases son

separados y devueltos como reciclo mientras el agua tratada es enviada a la planta de Servicios Auxiliares.

- Remoción de polvo, durante la fase de granulación se genera polvo que se recupera por disolución en agua para formar solución de urea que se devuelve al tanque de almacenamiento para reprocesamiento.

La planta de Servicios Auxiliares se encarga de proveer todos los servicios necesarios para las instalaciones de la planta, además de la disposición de los efluentes generados en la misma. La planta consta de las siguientes unidades:

- Unidad de agua cruda, recolecta el agua proveniente de los cuerpos de agua aportantes y realiza el primer tratamiento por clarificación para retirar los sólidos suspendidos del agua.
- Unidad de agua tratada, etapa de purificación para retirar sólidos suspendidos del agua proveniente de la clarificación.
- Unidad de agua desmineralizada, etapa de purificación para retirar sólidos disueltos del agua tratada, además de obtención de agua potable y agua para producción de vapor.
- Unidad de vapor y generación de energía, consisten en la generación de vapor por medio de calderos que calientan el agua para producir vapor empleado como servicio en las plantas de amoníaco y urea, además de ser fuente de alimentación para la turbina de generación de energía eléctrica que alimenta de electricidad todo el complejo.
- Unidad de aire y nitrógeno, se encarga de producir aire de planta, aire para instrumentos y también generación de nitrógeno gaseoso para las plantas de amoníaco y urea.
- Unidad de agua de enfriamiento, se encarga de abastecer agua a todos los intercambiadores de calor de la planta de amoníaco y urea por medio de una torre de enfriamiento y un sistema de bombas.
- Unidad de tratamiento de agua residual, se encarga de coleccionar los efluentes de agua generados en las plantas de amoníaco, urea y servicios auxiliares para su tratamiento y disposición final.

2.3.2 Descripción del agua residual de la planta de amoniaco y urea

En general, las aguas residuales son una combinación de carácter municipal (proviene de ciudades, poblaciones) y de tipo industrial (desechos que provienen de fábricas, manufactureras e instalaciones industriales).

Los efluentes industriales comprenden una variada gama de desechos que depende del tipo de actividad que desarrolla la industria. La producción de fertilizantes produce efluentes residuales que deben tratarse para su apropiada disposición en el medio ambiente.

Los fertilizantes nitrogenados como es el caso de la urea, NPK, nitrato de amonio, sulfato de amonio, nitrato de magnesio, nitrato de sodio, nitrato de potasio y otros para su elaboración requieren de procesos químicos que se efectúan en plantas industriales. Para el caso de la urea, la materia prima de fabricación es el amoniaco y el dióxido de carbono que se obtienen por medio del gas natural seco.

Durante el proceso de fabricación del amoniaco se debe tratar el gas de síntesis impuro obtenido del proceso de reformación para separar el dióxido de carbono por absorción en una columna absorbidora. Este proceso se realiza por adición de un medio absorbente que es la MDEA o metil-dietanol amina. La amina se encarga de separar el dióxido de carbono de la corriente de gas de síntesis, posteriormente se separa por un proceso de regeneración. Durante la estabilización de las operaciones existe posibilidad de arrastrar amina con la corriente de CO₂.

La amina se mezcla con el agua y se drena para evitar que líquidos ingresen a la sección de compresión. Este fluido es drenado por el canal de efluentes de la planta de amoniaco para su posterior disposición.

En la etapa de fabricación de urea se mezclan dióxido de carbono y amoniaco en forma líquida para producir urea líquida. Debido a varios factores puede existir contaminación de efluentes líquidos entre los cuales están: toma de muestras, fuga y daño en equipos, problemas operativos, venteo de gas amoniaco a la atmósfera y absorción por descargas pluviales. El agua residual de la planta de urea normalmente presenta amoniaco y en ocasiones trazas de urea a la salida de planta.

Otro tipo de agente contaminante que puede ser hallado es la urea-formaldehído, aunque su presencia es prácticamente nula.

Además de los componentes mencionados, el agua residual de planta también lleva los aceites lubricantes de equipos rotativos, además de compuestos ácidos y básicos provenientes del proceso de purificación de agua. La planta de amoniaco lleva un canal principal, de la misma forma la planta de urea que se interconectan en un canal principal en la planta de servicios auxiliares para el tratamiento final de los contaminantes.

2.3.3. Descripción del tratamiento de aguas residuales de la planta de amoniaco y urea

El tratamiento de aguas residuales es una obligación dentro de las instalaciones de una planta industrial. Según lo mencionado anteriormente se puede enumerar los siguientes contaminantes presentes o que podrían estar dentro de la corriente de agua.

Contaminantes presentes: aceites lubricantes, agua contaminada con nitrógeno amoniacal, descarga de agua pluvial y limpieza de suelo.

Contaminantes que pueden presentarse: agua con saturación de dióxido de carbono y amina, descarga de agua con presencia de amoniaco, urea líquida y en forma de polvo, formaldehído.

Las descargas de agua por purga de agua de enfriamiento y agua de neutralización consisten en una mezcla de compuestos químicos que son básicamente sales disueltas generadas durante los procesos de purificación del agua tratada y regulación de propiedades fisicoquímicas del agua de tratamiento.

El método de tratamiento para efluentes provenientes de descarga pluviales y otras fuentes ajenas a los procesos de amoniaco y urea es la neutralización química.

La neutralización química de aguas residuales consiste en el ajuste de pH, medida empleada para la determinación de acidez o alcalinidad de una sustancia a un valor permisible de acuerdo a las reglamentaciones vigentes del país. Para este método se

utilizan medidores en línea de pH para cuantificar la acidez o alcalinidad del agua residual y se hará uso de agentes químicos para regular este valor, y muestra física para análisis en laboratorio.

Para el proceso en cuestión se usa un ácido fuerte, en este caso ácido sulfúrico H_2SO_4 concentrado para ajustar el agua alcalina; y una base fuerte, en este caso el hidróxido de sodio NaOH para regular el pH de una solución ácida. En ambos casos, el objetivo consiste en ajustar el valor de pH a una medida neutra y que sea admisible para la disposición en exteriores.

Los aceites lubricantes provienen de equipos rotativos, los cuales durante el mantenimiento y la operación son arrastrados por el agua y se convierten en agua residual para tratamiento. El método más empleado para el tratamiento es por medio de separadores de aceite llamados CPI.

El método consiste en la separación física del aceite por medio de platos corrugados o coalescentes, que separan aceites y grasas con baja gravedad específica a través de separadores. El agua fluye por las placas corrugadas hechas de material plástico generalmente polietileno. Las estructuras de soporte son fabricadas en acero y pueden abastecer diferentes caudales hasta 500 m^3 por hora.

Las partículas de aceite y grasa se adhieren a las placas y por la baja densidad se desplazan hacia arriba. Un sistema mecánico de rascado se encarga de recoger la película de aceite y grasa de la superficie del agua. El aceite es recolectado en otra sección para su disposición. El proceso de remoción de aceite está contemplado solamente para aceites presentes en forma de mezcla con el agua y no para soluciones emulsionadas.

2.3.4. Flujograma de unidad de tratamiento de aguas residuales de la planta de amoníaco y urea

La operación actual de la unidad de tratamiento de efluentes de la planta de amoníaco y urea se basa en el control de acidez y presencia de aceite de acuerdo al Anexo 4.

2.3.6. Análisis de Laboratorio de aguas residuales de planta de amoniaco y urea

Para el presente estudio se obtuvieron análisis de laboratorio que se encuentran en el Anexo 5 de los cuales se realiza una clasificación de los puntos de salida de efluentes de las respectivas plantas de acuerdo a lo siguiente:

- Punto 1 Salida de efluentes de la planta de amoniaco.
- Punto 2 Salida de efluentes de la planta de urea.
- Punto 3 Ingreso de efluente a la unidad de tratamiento de aguas residuales.

En el Punto 1 de la planta de amoniaco se pueden encontrar los siguientes contaminantes potenciales: amoniaco puro en estado líquido, agua amoniacal, aminas secundarias.

En el Punto 2 de la planta de urea se pueden encontrar los siguientes contaminantes potenciales: amoniaco puro en estado líquido, agua amoniacal, carbamato de amonio, urea formaldehído concentrado.

En el Punto 3 de la planta de servicios auxiliares se pueden encontrar los siguientes contaminantes potenciales: amoniaco puro en estado líquido, agua amoniacal, diésel.

A continuación, se elaboró una tabla con la compilación de datos de los análisis de laboratorio efectuados durante la gestión 2019 del Anexo 5. Los resultados de la tabla son una representación mensual de la variación del amoniaco expresado en forma de nitrógeno amoniacal, urea y formaldehído en ppm y el pH del agua residual.

Tabla 2.1. Cuadro de análisis de laboratorio de PAU en la gestión 2019

Fecha	Punto 1		Punto 2				Punto 3	
	pH	NH3	pH	NH ₃	Urea	Formal	pH	NH ₃
Enero	8,17	6,75	8,50	80,99	0	0	7,26	130,97
Febrero	7,56	10,32	7,82	319,83	0	0	9,05	53,90
Marzo	7,78	12,69	8,19	57,57	0	0	8,10	66,73
Abril	7,82	41,90	8,18	97,19	40,13	0	8,10	15,30
Mayo	8,08	3,83	8,76	55,77	0	0	8,25	43,00

Junio	7,75	4,73	7,99	14,07	0	13,84	9,03	21,35
Julio	7,45	8,93	8,29	45,72	0	0,18	9,21	12,19
Agosto	8,31	18,37	9,11	139,08	0	0	8,51	12,91
Septiembre	7,98	17,72	8,83	46,86	0	0	8,84	9,76
Octubre	8,48	15,28	8,82	72,22	0	0	8,83	11,18
Noviembre	8,24	7,66	8,83	33,08	0	0	6,49	4,39
Diciembre	7,92	1,16	8,13	18,79	0	0	8,65	0,25

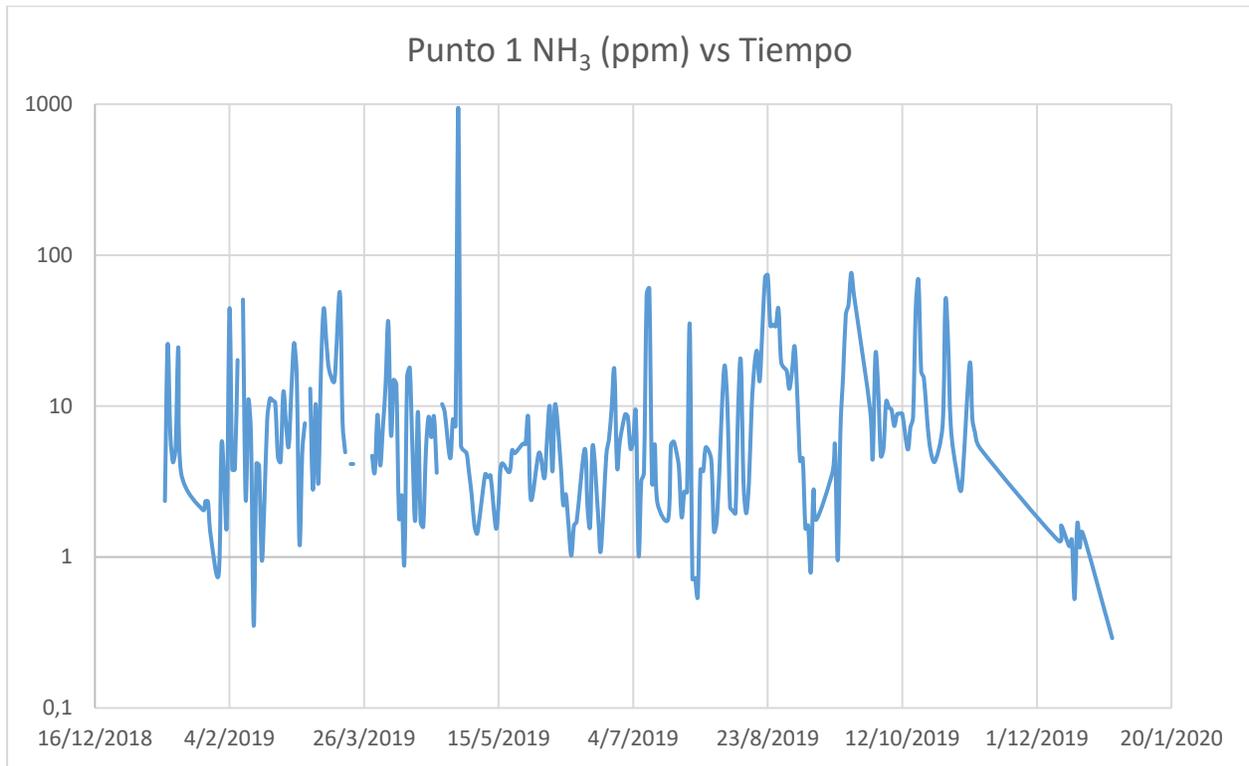
Fuente: Elaboración propia

2.3.7. Análisis de dispersión

Tomando en cuenta los datos del Anexo 5 y la tabla 2.1 se observa que el comportamiento del amoniaco es variable, por lo cual se procedió a realizar gráficos que representan el contenido de nitrógeno amoniacal versus el tiempo. Los resultados obtenidos nos indican lo siguiente:

- El punto 1 muestra una tendencia constante de presencia de nitrógeno amoniacal en las descargas de efluentes de la planta de amoniaco cuyos valores no superan los 100 ppm. Este resultado se puede atribuir a la mezcla de los efluentes de la planta de amoniaco con los de la planta de urea.

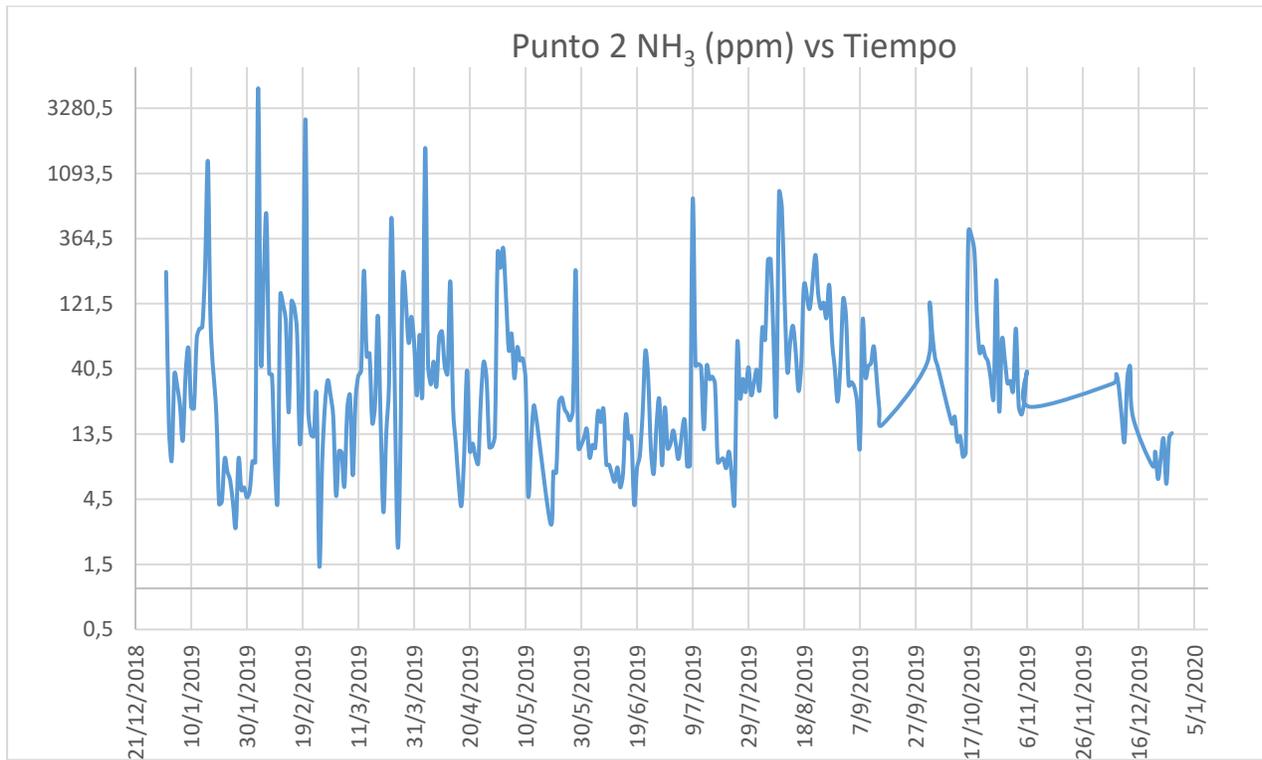
Figura 2.3. Variación del amoniaco en la planta de amoniaco



Fuente: Elaboración Propia

- El punto 2 registra presencia de componentes nitrogenados como ser amoniaco y urea de forma irregular. El nitrógeno amoniacal forma parte del amoniaco, la urea y el carbamato de amonio que son los principales componentes basados en nitrógeno que se pueden encontrar en la planta de urea. Un aspecto importante que se observa es los picos de nitrógeno amoniacal en determinadas fechas que superan los 1000 ppm en los efluentes de la planta de urea, los cuales son una fuente importante para la contaminación del agua.

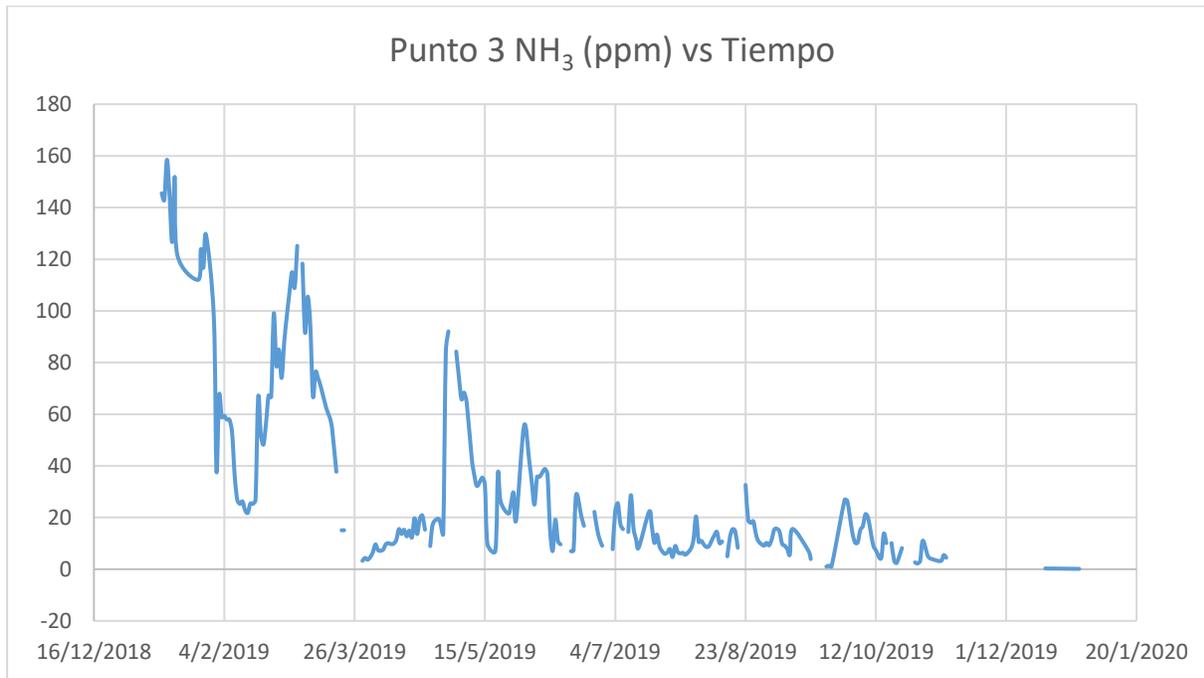
Figura 2.4. Variación del amoniaco en la planta de urea



Fuente: Elaboración Propia

- El punto 3 es la combinación de los puntos 1 y 2 además de las descargas de la planta de servicios auxiliares. La variación del nitrógeno amoniacal tiene relación a los cambios en los puntos 1 y 2 donde se ve aumentos de amoniaco durante los primeros meses hasta descender a valores mínimos a finales de 2019. Esto es debido a la parada de operaciones en los últimos meses de la gestión 2019 donde la presencia del amoniaco es casi mínima.

Figura 2.5. Variación del amoniaco en la planta de Servicios Auxiliares



Fuente: Elaboración Propia

Es importante indicar que los efluentes generados en planta requieren de un tratamiento debido al alto contenido de nitrógeno amoniacal que según normativa nacional supera los límites permisibles para aguas de Clase D donde el valor máximo es de 4 ppm. El método actual para la disposición de aguas residuales es la dilución agregando cantidades de agua considerables, sin embargo, estos volúmenes de agua generalmente provienen de descargas pluviales, los cuales no están disponibles a cualquier momento.

2.3.8. Determinación de la cantidad de efluentes descargados por la planta de amoniaco y urea.

Para el presente estudio se realizó una evaluación de los efluentes descargados por la planta de Servicios Auxiliares hacia el arroyo Muñecas durante el periodo comprendido entre mayo y agosto del año 2019 de acuerdo al Anexo 6 que indica la variación en el medidor de flujo FT3045 de descarga de aguas residuales, de los cuales se realiza una compilación del promedio de flujo registrado mensualmente, el cual se muestra a continuación en el siguiente cuadro.

Tabla 2.2. Comportamiento de flujo de agua residual en PAU

Periodo	Flujo promedio (m ³ /h)	Flujo Máximo (m ³ /h)
Mayo	40.52	129.2
Junio	58.08	150
Julio	63.97	188
Agosto	58.17	155

Fuente: Elaboración Propia

CAPITULO 3 DESARROLLO

3.1. Caso de estudio

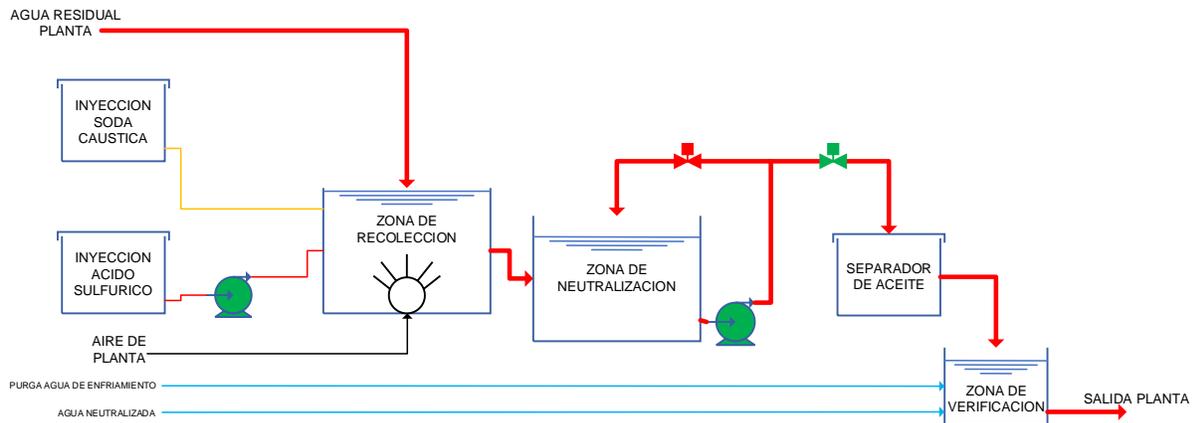
Las instalaciones actuales que componen la unidad de tratamiento de efluentes industriales dentro de la planta de amoniaco y urea son:

- Fosa de recolección de aguas residuales de planta se encarga de recibir todos los efluentes provenientes de las descargas pluviales y residuales de las plantas.
- Fosa de neutralización de aguas residuales de planta se encarga de realizar ajustar el pH adecuado de los efluentes industriales mediante un sistema de análisis en línea con un sistema de bombeo y válvulas de paso.
- Fosa de verificación de aguas residuales recolecta los efluentes tratados en la zona de neutralización, además de la purga proveniente de la torre de enfriamiento y aguas tratadas de la planta de Servicios Auxiliares; dichos efluentes son evacuados por medio de esta fosa hacia el exterior del complejo.
- Unidad de inyección de ácido envía la cantidad necesaria de ácido sulfúrico para realizar el ajuste de pH del agua residual entrante.
- Unidad de inyección de soda caustica envía la cantidad necesaria de hidróxido de sodio concentrado para el ajuste de pH del agua residual entrante.
- Línea de burbujeo de aire se ubica en la zona de recolección para introducir aire de planta, cuyo propósito es la adición de oxígeno al agua residual y garantizar la demanda química de oxígeno del agua.
- Unidad de separación de aceites CPI se encarga de retirar los restos de aceites lubricantes de la zona de neutralización.
- Bombas sumergibles se encargan de realizar el envío del agua residual hacia la zona de verificación, además de recircular la misma en caso de no llevar el pH adecuado.

- Válvulas de paso se encargan de dirigir el flujo de agua residual hacia la zona de verificación si el pH de la solución es adecuado o por el contrario retornar la misma hacia la zona de neutralización para su acondicionamiento.

Según lo descrito líneas arriba el diagrama de las instalaciones se muestra a continuación:

Figura 3.1. Unidad de tratamiento de la planta de amoniaco y urea



Fuente: Elaboración Propia

3.2. Determinación de capacidad de zona de tratamiento de efluentes amoniacaes de la planta de amoniaco y urea.

La propuesta para la optimización del tratamiento de efluentes de planta debe considerar los siguientes aspectos encontrados durante el diagnóstico.

El agua residual de planta contiene presencia de compuestos nitrogenados tal es el caso del amoniaco en forma libre o disuelto (amonio).

El agua residual de planta presenta valores considerables de conductividad por presencia de óxidos ferrosos y metales según se muestra en el Anexo 5.

El agua residual de planta en general tiene un pH básico por encima de 7 debido a presencia de amoniaco.

Según el diagrama de instalaciones actuales de planta se cuenta con equipos que permiten ajustar el pH al valor deseado mediante un analizador en línea, aunque el

sistema de tratamiento no está adecuado para tratar efluentes concentrados en amoniaco.

La instalación de facilidades que reduzcan la cantidad de componentes no deseados será importante para poder cumplir con las normativas de regulación de aguas de descarga.

El método que se analiza en el presente trabajo es el despojamiento por aire empleando una columna empacada. Este método requiere de efluentes con características de entrada como la cantidad de sólidos suspendidos para lo cual es necesario implementar un pretratamiento.

3.2.1. Selección de método de tratamiento para la planta de amoniaco y urea

Se debe considerar algunos aspectos importantes antes de determinar el pretratamiento a emplear:

- La zona de Bulo Bulo se caracteriza generalmente por ser una región cálida con un promedio de temperatura de 29°C con un mínimo de 16°C con precipitaciones promedio entre 1245 a 1660 mm de agua de clima húmedo y lluvioso casi todo el año.
- La sección de tratamiento actual procesa una cantidad variable de agua de acuerdo a las condiciones climáticas de la zona afectada principalmente por precipitaciones recurrentes en predios de las instalaciones que son recolectadas en los canales abiertos dentro del complejo y descargados en la zona de recolección si estuviesen contaminados o enviados directamente hacia el exterior en el caso contrario.
- La zona de verificación de la planta cuenta con un medidor de flujo en línea denominado FT3045 que determina el caudal de agua tratada a la salida de planta que contempla tanto las descargas pluviales y los efluentes de planta.

La información actual disponible para el diseño de la unidad de tratamiento de agua amoniacal se muestra a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 3.1. Parámetros de agua residual de planta

Ítem	Símbolo	Unidad	Valor
Caudal promedio de operación	Q	m ³ /h	55.2
Caudal máximo de operación	Q _{máx}	m ³ /h	188
Temperatura promedio	T _{prom}	°C	29
Temperatura máxima	T _{máx}	°C	41
Temperatura mínima	T _{mín}	°C	16
Altura promedio de zona		m.s.n.m.	242
pH promedio	pH		8.3
Concentración de amoníaco máximo	C ₀	ppm	320
Concentración de amoníaco deseada	C _e	ppm	4

Fuente: Elaboración Propia

3.2.2. Tanque de sedimentación primaria

El pretratamiento de los efluentes amoniacales será por el método de sedimentación primaria en un tanque rectangular de acuerdo a las siguientes características:

En función a la Tabla 2.2 se ha determinado el valor del flujo promedio de agua residual a la salida de la planta con un valor de 55 m³/h y máximo de 188 m³/h.

El tanque rectangular de sedimentación tendrá una relación longitud ancho de 5:1 para aumentar el área de deposición de sólidos suspendidos. Además, tendrá una leve inclinación en la zona de entrada de 2.5%.

El tiempo de retención es fundamental para establecer la cantidad de agua en volumen versus el caudal de ingreso, normalmente para procesos se estima un tiempo de retención de 1 a 3 horas.

El primer paso para determinar el volumen total de la fosa de sedimentación es determinar la carga superficial. Para determinar la carga superficial utilizamos la tabla 1.1 y aplicamos el modelo del Ejército de Estados Unidos considerando que una carga superficial menor es adecuada cuando existe variaciones de temperatura baja y aumentar el tiempo de retención.

El valor de carga superficial es $12 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$ y una profundidad para el tanque de 4.5 metros. Para determinar el área de tanque rectangular se resuelve la Ecuación 6 de carga superficial despajada.

$$\text{Carga superficial} = \frac{\text{Caudal máximo}}{\text{Area total}} \rightarrow \text{Area total} = \frac{\text{Caudal maximo}}{\text{Carga superficial}}$$

$$\text{Area total} = \frac{188 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{12 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 * \text{d}}} = 376 \text{ m}^2$$

La superficie total del tanque de recepción será de 376 m^2 . Como la relación ancho y largo es 1:5 se puede determinar el ancho del tanque mediante la Ecuación 7.

$$\text{Area total} = L * a = a * 5 a$$

$$a = \sqrt{\frac{\text{Area total}}{5}} = \sqrt{\frac{376}{5}} = 8.67 \text{ m}$$

El ancho del tanque será de 8,67 m y el largo del mismo de 43,3 metros.

El volumen del tanque rectangular se ha determinado por la Ecuación 8 de la siguiente manera:

$$V = 376 \text{ m}^2 * 4.5 \text{ m} = 1692 \text{ m}^3$$

Se debe además agregar una inclinación hacia una fosa de recolección de sólidos para extracción manual con una leve inclinación de 2.5° en dirección a la entrada de agua y además un vertedero para recepción del agua residual para la unidad de stripping de aire.

3.3. Determinación de las unidades de tratamiento de efluentes nitrogenados

3.3.1. Constante de Henry del amoniaco

La constante de Henry se ha calculado mediante la Ecuación 10. Usando las constantes para el amoniaco del Anexo 1 y despejando H se ha obtenido:

$$H = 10^{\frac{-A}{T}+B}$$

$$H = 10^{\frac{-1887,12}{25+273}+6,315}$$

$$H = 0,96 \text{ atm} * \frac{\text{mol aire}}{\text{mol agua}}$$

3.3.2. Determinación de las concentraciones de entrada y salida de amoniaco

La determinación de las concentraciones de amoniaco de entrada se ha recopilado de la Tabla 2.1 para el punto 2 donde se registraron valores más grandes de amoniaco a la descarga del agua residual. La concentración de salida es la cantidad de contaminante permitido para descargas de aguas residuales para cuerpos de agua de Clase 4 el cual es 4 ppm de amoniaco.

El cálculo de los parámetros de diseño de la torre stripper se hacen en función de cantidades molares, por lo tanto, se realizó la conversión de acuerdo a la Ecuación 12 para la entrada y salida.

$$C_0 = \frac{n_{NH_3}}{n_{NH_3} + n_{H_2O}}$$

Donde el número de moles del amoniaco se determina de la siguiente forma:

$$n_{NH_3} = 320 \text{ mg} * \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} * \frac{1 \text{ mol } NH_3}{17 \text{ g}} = 0,0188 \text{ moles de } NH_3$$

De la misma manera se determina la cantidad de moles de agua en 1 litro.

$$n_{H_2O} = 1000 \text{ g} * \frac{1 \text{ mol } H_2O}{18 \text{ g}} = 55,6 \text{ moles de } H_2O$$

Por tanto, la concentración de entrada de amoniaco es:

$$C_0 = \frac{2,35 * 10^{-4}}{2,35 * 10^{-4} + 55,6} = 4,23 * 10^{-6} \frac{\text{mol } NH_3}{\text{mol } H_2O}$$

Para la concentración de salida se calcula de forma similar teniendo el siguiente resultado.

$$C_e = \frac{0,0188}{0,0188 + 55,6} = 3,38 * 10^{-4} \frac{\text{mol } NH_3}{\text{mol } H_2O}$$

3.3.3. Selección de material de relleno

El material de relleno a usarse será de tipo Pall Ring con un tamaño nominal de 50 mm para el cual el factor de relleno Cf es 20.

3.3.4. Selección de factor de stripping y relación de líquido – gas

Se ha seleccionado el factor de stripping S con un valor de 3 como valor inicial para el cálculo. De la ecuación 20 se ha determinado la relación L/G.

$$\frac{L'}{G'} = \frac{H}{S * P_T}$$

$$\frac{L'}{G'} = \frac{0,96 \text{ atm}}{3 * 1 \text{ atm}} * \frac{\text{mol aire}}{\text{mol agua}} * \frac{28,8 \text{ g aire}}{1 \text{ mol aire}} * \frac{1 \text{ mol agua}}{18 \text{ g agua}} = 0,51 \frac{\text{g aire}}{\text{g agua}}$$

$$\frac{L'}{G'} = 0,51 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg agua}}$$

3.3.5. Determinación de la tasa de carga gaseosa y líquida

Para el diseño de la torre stripper se toma una caída de presión de 400 N/m²/m en base a las condiciones favorables para el stripping de amoniaco. El cálculo de la tasa de carga se realizó por medio de la Figura 1.19 usando la relación L'/G' obtenida en el punto anterior y las densidades del agua y el aire, los cuales son 997 kg/m³ y 1,16 kg/m³ respectivamente para la temperatura promedio de Bulo Bulo según el Anexo 7.

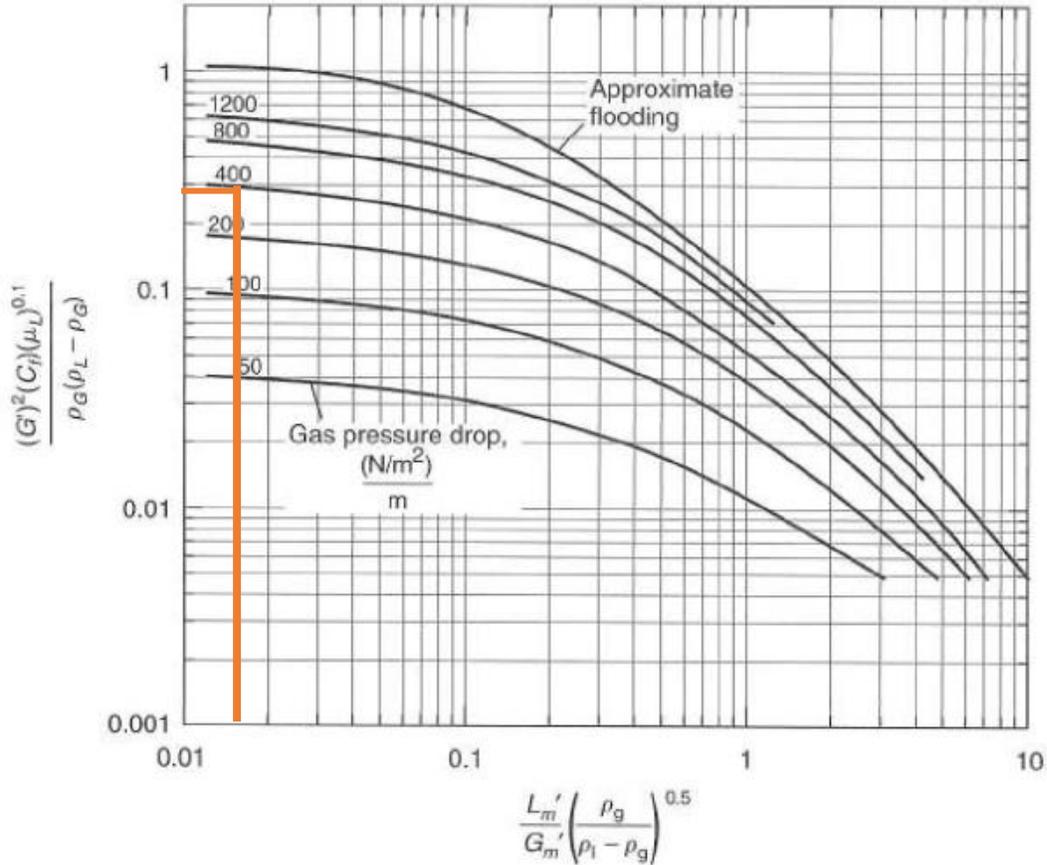
El valor del eje x se ha determinado por la ecuación 21 sustituyendo los parámetros calculados.

$$X = 0,51 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg agua}} * \left(\frac{1,16}{997 - 1,16} \right)^{1/2}$$

$$X = 0,017$$

Ploteando el valor de X en la figura 1.19 y cortando con la curva de caída de presión de 400 se obtiene el valor Y.

Figura 3.2. Determinación de carga líquida y gaseosa



Fuente: Elaboración propia

De la figura se obtiene el siguiente valor:

$$Y = 0,29$$

De acuerdo a la Ecuación 22 se despeja el valor de G' obteniendo lo siguiente:

$$G' = \left(\frac{\rho_G (\rho_L - \rho_G)}{C_f (\mu_L)^{0.1}} \right)^{0,5}$$

Reemplazando con los valores obtenidos previamente y sabiendo que la viscosidad dinámica para el agua a la temperatura promedio es 0,890 kg/m-s y el factor C_f asumido es 20 se calcula la tasa de carga de gas G' .

$$G' = \left(\frac{997 * (997 - 1,16)}{20 * (0,890)^{0.1}} \right)^{0,5}$$

$$G' = 3,36 \frac{kg}{m^2 * s}$$

Sabiendo que la relación L'/G' es 0,51 se determina el valor L'

$$L' = \frac{L'}{G'} * G' = 3,36 * 0,51 \frac{kg}{m^2 * s}$$

$$L' = 1,72 \frac{kg}{m^2 * s}$$

3.3.6 Determinación del diámetro de la columna stripper

Remplazando los datos obtenidos en la Ecuación 19 se obtiene el diámetro de la torre stripper.

$$D = \left(\frac{4 * 55 * 997}{3,14 * 1,72} \right)^{0,5}$$

$$D = 3,35 m$$

3.3.7 Determinación de altura de la columna stripper

Se determinaron los parámetros HTU y NTU para el cálculo de la altura efectiva de lecho empacado.

Para el cálculo de HTU se cuenta con un factor K_{la} para el amoniaco a 25°C de 0,003/s. Remplazando en la ecuación 16 se determina el valor HTU.

$$HTU = \frac{1,72}{0,003 * \left(\frac{3,14 * 3,35^2}{4} \right) * 3600}$$

$$HTU = 0,57$$

Para el cálculo de NTU se utilizan los datos de concentraciones de amoniaco y el factor de stripping, remplazando valores en la Ecuación 17.

$$NTU = \left(\frac{3}{3-1} \right) * \ln \left[\frac{\left(3,34 * 10^{-4} / 4,23 * 10^{-6} \right) (3-1) + 1}{3} \right]$$

$$NTU = 5,97$$

Por tanto, la altura mínima del lecho empacado reemplazando en la Ecuación 18 es:

$$z = 0,57 * 5,97$$

$$z = 3,44 \text{ m}$$

Para obtener la altura total de la torre se multiplica por un factor de corrección para la determinación de la altura final adicionando 3 metros para la instalación de los elementos adicionales de la columna.

$$Z_{torre} = 6,44 \text{ m}$$

3.3.8 Determinación de la concentración de gas a la salida

Para el caso de estudio se considera que el aire de entrada no se encuentra contaminado y que la tasa de transferencia del amoníaco de la fase líquida a la fase gaseosa es total entonces se reemplaza en la Ecuación 13.

$$y_e = \frac{0,96}{1} * 3,38 * 10^{-4}$$

$$y_e = 3,25 * 10^{-4} \frac{\text{mol } NH_3}{\text{mol aire}}$$

3.3.9 Determinación de flujo mínimo de aire requerido

La tasa de flujo de aire para la remoción de amoníaco del agua es necesaria para evaluar las condiciones del ventilador. Para el cálculo del flujo de gas mínimo se determina la relación L/G en base a la Ecuación 14.

$$\frac{G}{L} = \frac{3,38 * 10^{-4} - 4,23 * 10^{-6}}{3,25 * 10^{-4}}$$

$$\frac{G}{L} = 1,03$$

Despejado G de la ecuación 14 y considerando que L es el caudal de entrada de agua se determina el flujo de aire.

$$G = \frac{1,03 * 24,1 * 1000}{18}$$

$$G = 75728,6 \frac{m^3}{h} = 1262,1 \frac{m^3}{min}$$

3.4. Dimensionamiento de torre stripper con lecho empacado

La torre de lecho empacado se encuentra conformada por las siguientes partes:

- Carcasa de la columna
- Equipamiento interno
- Plato de retención de relleno en el fondo de la columna
- Plato distribuidor de líquido en el tope de la columna
- Platos de redistribución de líquido que se localizan entre los platos de distribución y retención.
- Eliminador de niebla localizado sobre el plato distribuidor.
- Conducto de salida de aire en el tope de la columna.
- Conducto de entrada de aire en el fondo de la columna
- Líneas de conexión de entrada de líquido.
- Bombas de alimentación de líquido
- Ventilador de tiro forzado para alimentación de aire a la torre.

Según los requerimientos indicados se ha realizado un cuadro de recopilación de valores para el esquema de la torre despojadora de amoniaco.

Tabla 3.2. Datos obtenidos de la columna despojadora de aire

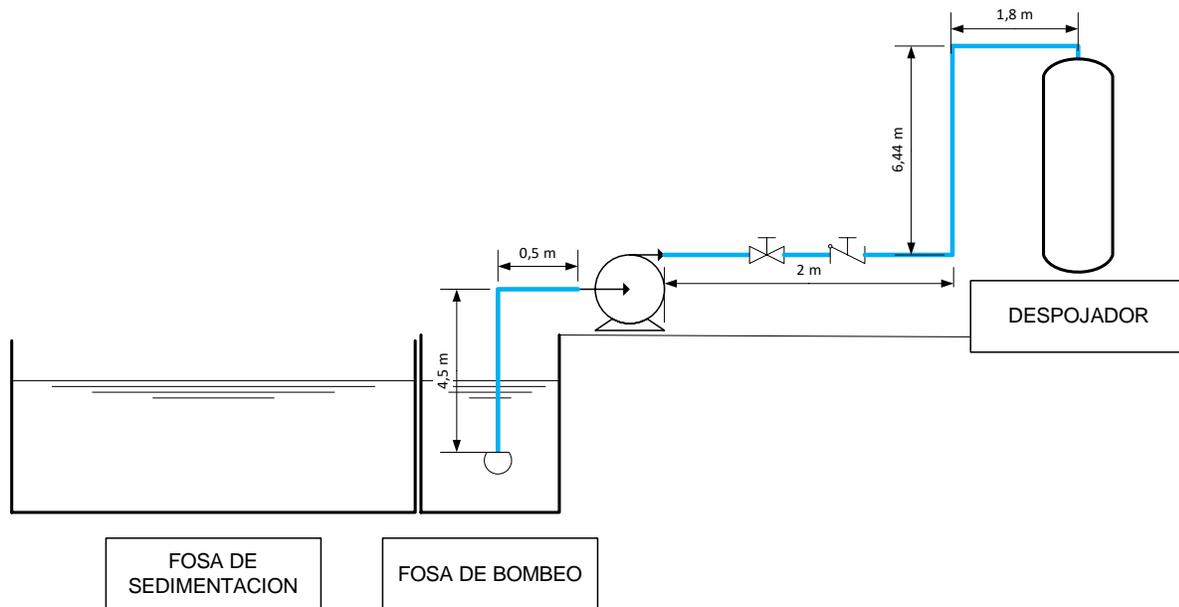
Indicador	Valor	Unidad
Diámetro de torre	3,35	m
Altura de lecho empacado	3,44	m
Altura de torre	6,44	m
Flujo de alimentación de agua	55,2	m ³ /h
Flujo de alimentación de aire	1261,1	m ³ /min

Fuente: Elaboración propia

3.4.1. Selección de bomba centrífuga de agua

La bomba seleccionada para el trabajo es de tipo centrífuga para manipulación de agua y el tipo de instalación será en superficie. Para determinar las características de la bomba se ha elaborado un esquema del sistema de bombeo para las nuevas instalaciones.

Figura 3.3. Esquema preliminar de sistema de bombeo



Fuente: Elaboración propia

La altura estática de la bomba se obtiene por la suma de la altura de la fosa de pretratamiento y la altura total de la torre stripping. Por tanto, la altura estática es:

$$H_{stat} = (4,5 + 6,44)m = 10,94 m$$

Para el cálculo de la pérdida de carga por las tuberías se ha tomado en cuenta la suma de las longitudes de tubería utilizada.

$$L_T = (4,5 + 0,5 + 2 + 6,44 + 1,8)m = 15,24 m$$

La altura dinámica de carga se expresa de la siguiente manera:

$$TDH = H_{stat} + h_f + h_m$$

De manera preliminar se ha determinado los diámetros óptimos de succión y descarga de la bomba centrífuga tomando en cuenta el caudal de entrada de 55,2 m³/h y las velocidades para la succión de 1 m/s y 2 m/s para la descarga. Conforme a la ecuación 29 se han determinado los diámetros de succión y descarga óptimos:

$$D_{Succión} = \sqrt{\frac{4 * 55,2}{3,14 * 1}} = 0,14 \text{ m} = 140 \text{ mm} = 5,5 \text{ pulg}$$

$$D_{Descarga} = \sqrt{\frac{4 * 55,2}{3,14 * 2}} = 0,09 \text{ m} = 98,6 \text{ mm} = 3,8 \text{ pulg}$$

Los diámetros calculados no son comerciales para su instalación por lo que se ha empleado el Anexo 8 para la determinación de los diámetros disponibles, obteniendo como resultado factible tubería de acero de Esquema 40 para los siguientes diámetros:

$$D_{Succión} = 6,065 \text{ pulg}$$

$$D_{Descarga} = 4,026 \text{ pulg}$$

Por tanto, se ha calculado el valor real para la velocidad de succión y descarga de la bomba obteniéndose los siguientes valores:

$$v_{Succión} = 0,82 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{Descarga} = 1,86 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

El siguiente paso fue la determinación de la pérdida de carga h_f , para lo cual se ha calculado en primer lugar el número de Reynolds para una viscosidad del agua de $1,00 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ a través de la ecuación 25.

$$Re = \frac{1,86 \text{ m/s} * \left(4,026 * \frac{2,54}{100}\right) \text{ m}}{1,00 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 1,9 * 10^5$$

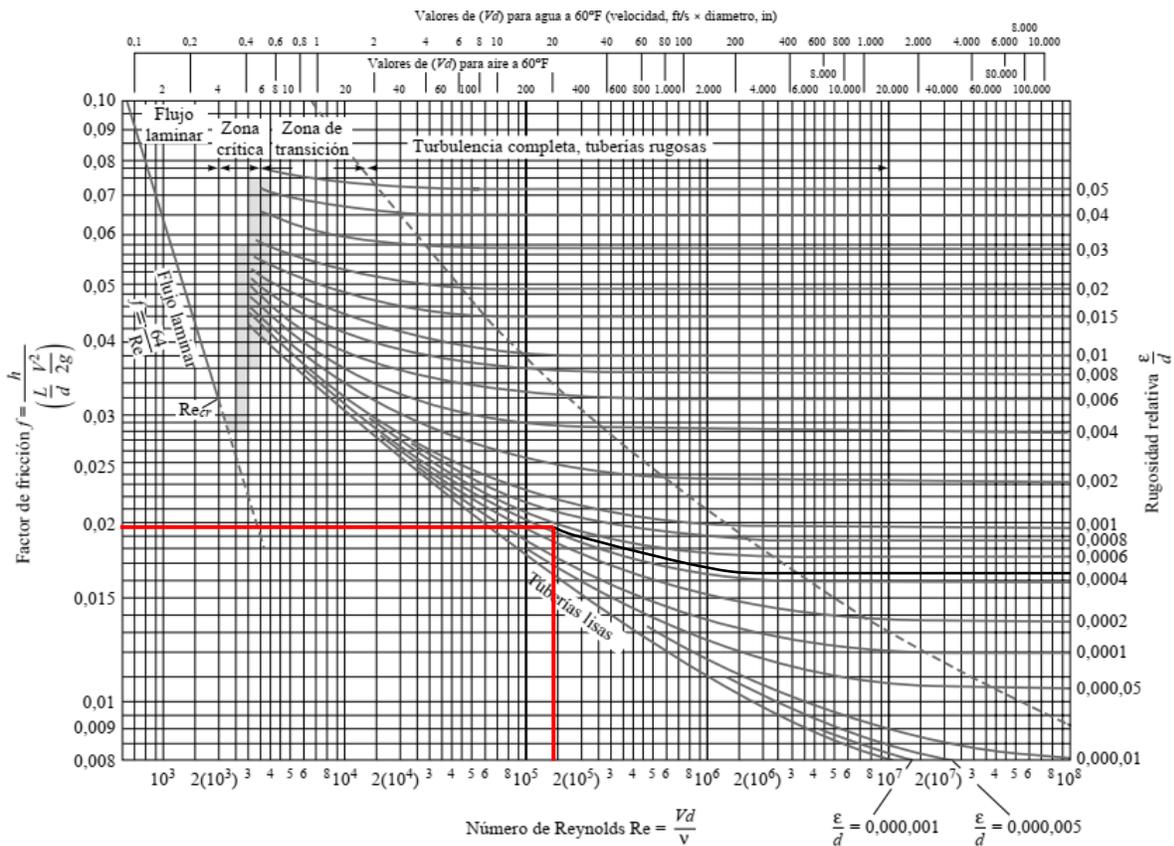
A continuación, se determinó la rugosidad relativa para lo cual se ha tomado el valor del Anexo 9 correspondiente al espesor para una tubería de 4 pulgadas de diámetro

nominal con un valor de 0,046 mm y mediante la ecuación 26 se ha hallado la rugosidad para el material seleccionado.

$$\text{Rugosidad relativa} = \frac{0,046 \text{ mm}}{(4,026 * 25,4)\text{mm}} = 0,00045$$

Por medio de estos datos se ha determinado el coeficiente de fricción f a través del diagrama de Moody como se muestra a continuación:

Figura 3.4. Determinación del coeficiente de fricción



Fuente: Elaboración propia

El valor obtenido por la gráfica para f es de 0,019.

Mediante la aplicación de la ecuación 24 se ha determinado el valor de pérdida de carga a través de la tubería.

$$h_f = \frac{0,019 * 15,24 \text{ m} * (1,86 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,10 \text{ m}} = 0,51 \text{ m}$$

También se ha identificado que existen pérdidas menores en accesorios como se indica a continuación en el siguiente cuadro que se ha elaborado en función al Anexo 10 con sus distintas constantes:

Tabla 3.3. Constantes de pérdida de carga de accesorios del sistema

Accesorio	Válvula de pie	Válvula compuerta	Codo 90°	Válvula check
Cantidad	1	1	3	1
Constante K	2	0,16	0,19	2

Fuente: Elaboración propia

Las pérdidas de carga por accesorios se han determinado de la siguiente forma por medio de la ecuación 27:

$$h_m = (2 + 0,16 + 3 * 0,19 + 2) * \frac{\left(1,86 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 0,83 m$$

Por tanto, la altura dinámica total necesaria que se requiere en la bomba se ha obtenido de la suma de la altura estática más las pérdidas de carga:

$$TDH = (10,94 + 0,51 + 0,83)m = 12,28 m$$

Finalmente se ha determinado la potencia teórica de la bomba en función de la ecuación 30 cuyo resultado es:

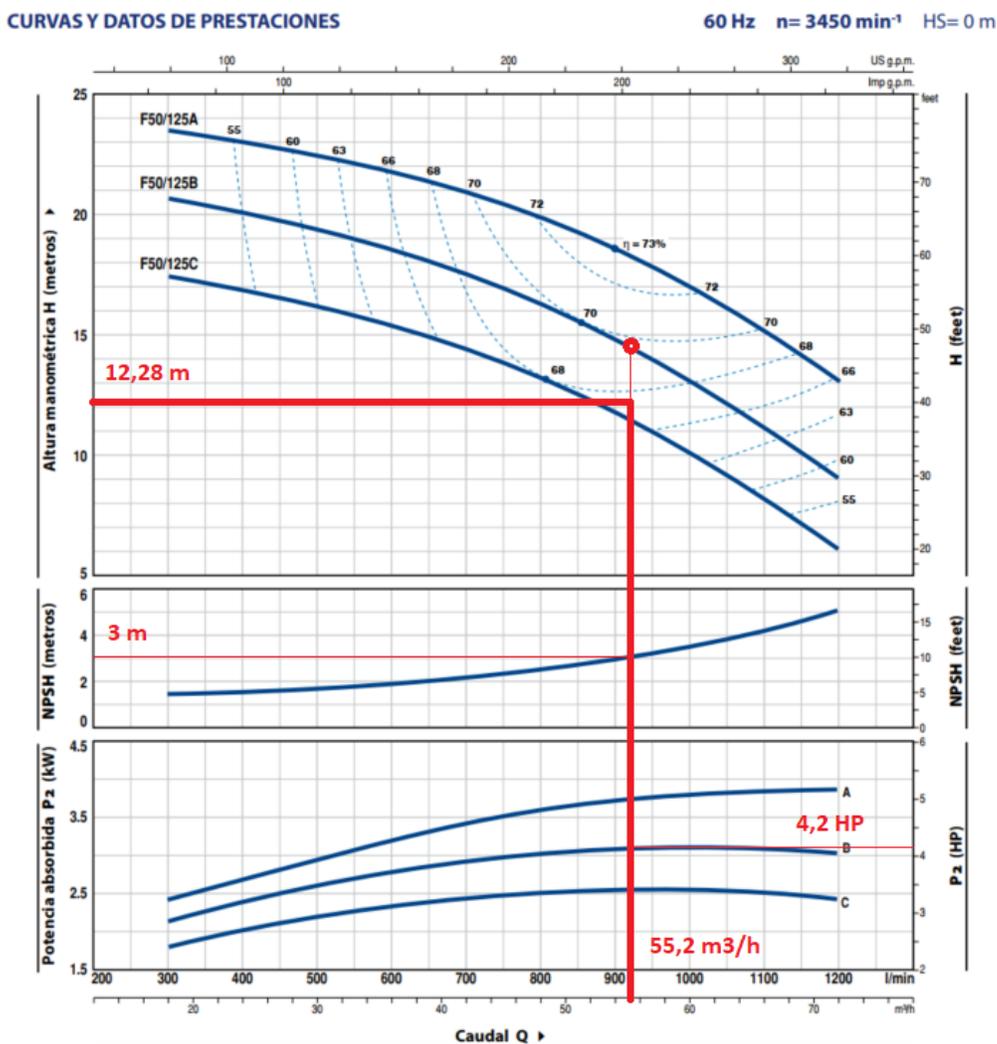
$$P_b = 55,2 \frac{m^3}{h} * 12,28 m * (9,81 * 998) \frac{kg}{s^2 * m^2} = 1,83 kW = 2,46 hp$$

La determinación de la carga de succión para evitar la cavitación o NPSH disponible la determinamos mediante la ecuación 33, conociendo que la presión de vapor para el agua a la temperatura promedio de 30 °C es de 30,07 mmHg, por tanto, el valor determinado para el NPSH disponible es:

$$NPSH_{disp} = 1m + \left(\frac{760 - 30,07}{998,2 * 9,81} \right) m - (2 + 0,19) * \frac{(0,82)^2}{2 * 9,81} m = 8,86 m$$

Una vez determinado los parámetros necesarios para la selección de la bomba se ha tomado como referencia a la marca Pedrollo que fabrica bombas centrífugas para la industria en general. Se ha tomado en cuenta al modelo Pedrollo F50/125, para lo cual se ha usado la curva de rendimiento del Anexo 11 para dicha bomba con el siguiente resultado:

Figura 3.5. Curva de rendimiento Bomba Pedrollo F50-125



Fuente: Elaboración propia

El resultado obtenido para la bomba de alimentación de agua para un caudal de 55 m³/h y la altura dinámica total de 12,3 m nos indica la factibilidad para el uso de una

bomba centrífuga F50/125B, que cumple con los requerimientos iniciales y puede proporcionar hasta una altura dinámica de 14 m, una potencia de la bomba aproximada de 4 hp y un NPSH mínimo requerido de 3 m que es menor al NPSH disponible del sistema actual establecido; por tanto, se puede indicar que la bomba elegida cumple con los parámetros del sistema y los requerimientos de la máquina.

3.4.2. Dimensionamiento de ventilador de aire

El ventilador de aire requerido se obtiene de las configuraciones ofrecidas por los proveedores para lo cual se requieren dos datos referenciales: el caudal y la relación de volumen y presión R.

Para el segundo, se ha calculado el diferencial de presión a través del sistema del despojador:

$$SP = \Delta P_{Total} * Z + SP_{ventilador}$$

$$SP = (400 * 3,44)Pa * \frac{1 \text{ pulg agua}}{249,08 Pa} + 0,5 \text{ pulg agua} = 6,02 \text{ pulg de agua}$$

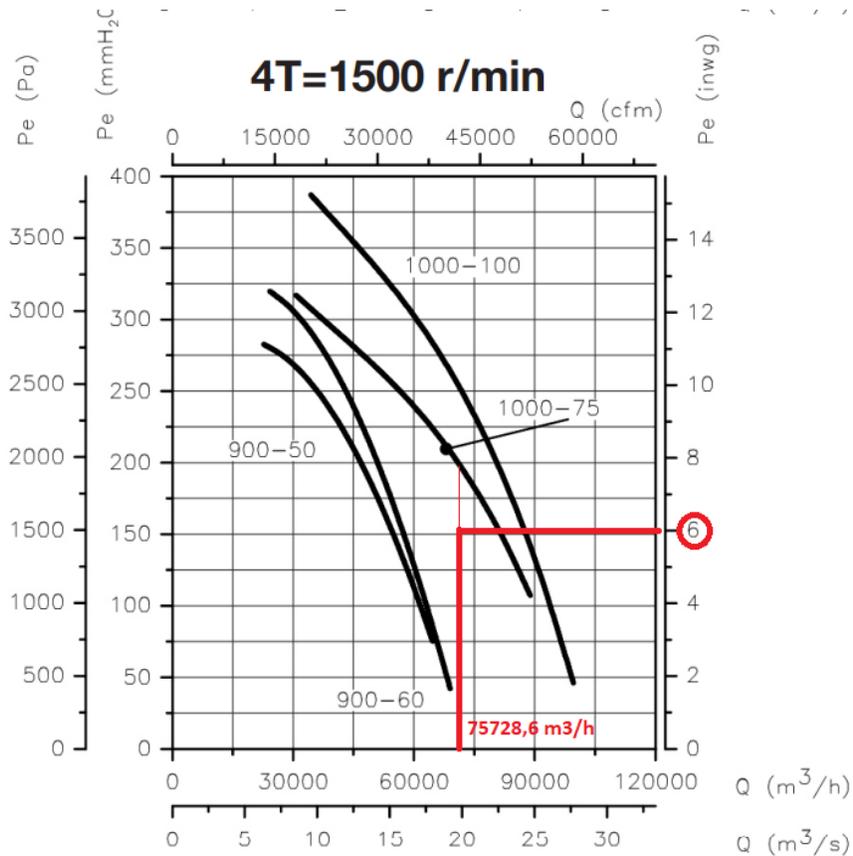
Por tanto, para el sistema propuesto se ha tomado una diferencia de presión de 400 Pa con un caudal de flujo de aire de 1262,1 m³/min y el valor determinado de R de acuerdo a la ecuación 34 es:

$$R = \sqrt{\frac{(1262,1 \frac{m^3}{min} * \frac{35,31 \text{ pie}^3}{m^3})}{(6,02)^{3/4}}} = 54,88 \approx 55$$

El valor de 55 se refiere a un ventilador de tipo centrífugo que debe manejar el flujo de aire e introducirlo hacia el despojador. Finalmente se ha seleccionado del catálogo del proveedor el ventilador de aire que pueda satisfacer las necesidades del sistema.

Para la selección del ventilador de tipo centrífugo se ha considerado la curva de rendimiento del Anexo 12 del proveedor Sodeca para su modelo CMRS de uso industrial con el flujo de aire requerido y presión estática de resistencia obtenida como es mostrado en la siguiente gráfica.

Figura 3.6. Curva de rendimiento ventilador centrífugo Sodeca



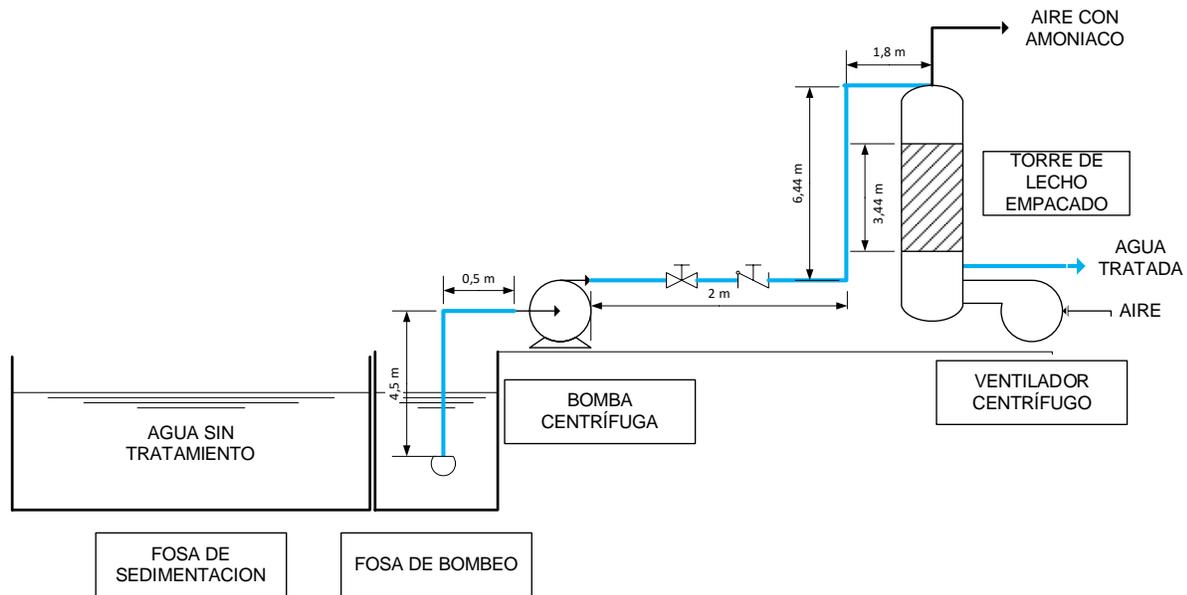
Fuente: Elaboración propia

De la gráfica se ha seleccionado el modelo Sodeca CMRS 1000-4T-75 que cubre el requerimiento de flujo de aire para el despojamiento en la torre empacada y una presión estática cercana a las 8 pulgadas de agua.

3.5. Esquema final de facilidades de tratamiento de efluentes nitrogenados

El diagrama final de los equipos y el sistema para el tratamiento de efluentes de la planta de amoníaco y urea se constituirá en una torre de lecho empacado de stripping, una fosa de sedimentación, una fosa de bombeo, bomba centrífuga, ventilador de aire de tipo centrífugo, tuberías de acero y relleno de tipo Pal embebidos dentro de la torre. A continuación, se muestra un esquema preliminar del sistema final.

Figura 3.7. Diagrama final de sistema de tratamiento



Fuente: Elaboración propia

3.6. Propuesta económica del proyecto

El proyecto de tratamiento de efluentes nitrogenados para la planta de amoníaco y urea como se ha determinado estará conformada por una unidad de despojamiento de amoníaco por una torre de lecho empacado, un sistema de bombeo por bomba centrífuga, un ventilador centrífugo de tipo industrial, un conjunto de tuberías de conducción de agua y accesorios para el diseño final.

Las etapas para la construcción de la unidad de tratamiento contemplan los siguientes costos: costos directos, costos indirectos

3.6.1. Costos directos

Dentro de los costos directos se encuentran el equipamiento para la unidad de despojamiento: la torre empacada, el sistema de bombeo y el ventilador de aire con sus componentes.

Para el estudio y fabricación de la torre empacada se considera una columna hecha de acero, cuyos costos por elementos se han detallado a continuación:

Tabla 3.4. Costo de torre de lecho empacado

Ítem	Costo (dólares americanos)
Carcasa de torre	15.752,56
Paso de hombre	3.246,88
Tubería de salida agua	757,2
Ducto de salida aire	3.409,22
Anillo de soporte	1.916,48
Valor total de componentes exterior	30.098,81

Fuente: Elaboración propia

Los componentes internos de la columna se han establecido entre el distribuidor, el plato de soporte y el separador de niebla, como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 3.5. Costo de internos de torre

Ítem	Costo (dólares americanos)
Distribuidor de agua	7.255,39
Plato de soporte	3.705,97
Separador de niebla	8.899,35
Valor total de internos	22.052,99

Fuente: Elaboración propia

El material de relleno de la torre es el anillo Pall fabricado de material plástico en este caso polipropileno que será introducido al interior de la torre ocupando un volumen total de 30,3 m³ y el costo total para el relleno se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.6. Costo de anillos Pall

Ítem	Costo (dólares americanos)
Anillo Pall	320
Valor total de Anillos Pall	9.702,62

Fuente: Elaboración propia

En cuestión de equipamiento se tiene la bomba centrífuga para impulsión de agua a la torre despojadora, para este caso se ha seleccionado una bomba de tipo

centrífugo de la marca Pedrollo con su modelo F50-125B, cuyo costo de adquisición se detalla a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 3.7. Costo de bomba centrífuga

Ítem	Costo (dólares americanos)
Bomba Pedrollo F50-125B	1.970,58
Costo por agente despachante	39,4
Gravamen aduanero	100,50
IVA	315,31
Precio total Bomba Pedrollo F50-125B	2.425,80

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se tiene el costo por el ventilador de aire que es de tipo centrífugo del proveedor Sodeca para su modelo CMRS 1000-4T-75-IE3 se detallan los costos para su adquisición:

Tabla 3.8. Costo de ventilador de aire

Ítem	Costo (dólares americanos)
Ventilador Sodeca CMRS 1000-4T-75-IE3	21.462,24
Costo por agente despachante	5.920,79
Gravamen aduanero	1.369,15
IVA	4.295,58
Precio total Ventilador Sodeca CMRS	33.047,76

Fuente: Elaboración propia

Además, se tiene que considerar los gastos por instalación de tuberías de agua, ductos de aire y equipamiento eléctrico para poner en servicio las máquinas, los mismos se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 3.9. Costo equipamiento adicional

Ítem	Costo (dólares americanos)
Tuberías de acero y ductos de aire	19.465,60
Instalación eléctrica e instrumentación	9.732,80
Costo total de equipamiento de apoyo	29.198,39

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, los gastos para la implementación de la unidad de tratamiento se encuentran detallados en el siguiente cuadro resumen para la obtención del costo directo total del sistema:

Tabla 3.10. Costo directo

Ítem	Costo (dólares americanos)
Carcasa de torre despojadora	30.098,81
Internos de torre despojadora	22.052,99
Anillos Pall	9.702,62
Bomba Pedrollo F50-125B	2.425,80
Ventilador Sodeca CMRS	33.047,76
Equipamiento de apoyo	29.198,39
Costo total directo	126.526,37

Fuente: Elaboración propia

3.6.2. Costos indirectos

Los costos indirectos comprenden los ítems que no intervienen con el proceso de tratamiento que están contemplados en el trabajo del lugar, construcción y otros.

Basado en el proyecto se han tomado en cuentas las siguientes actividades:

- Limpieza de terreno y deshierbe
- Replanteo y trazado de estructuras
- Excavación de terreno
- Losa de fondo de hormigón
- Elevación de hormigón
- Estudios y trabajos de ingeniería

En primer lugar, los trabajos que involucran el tratamiento del terreno para las facilidades se han considerado como la etapa preliminar de la construcción de la unidad de tratamiento cuyos costos se detallan a continuación:

Tabla 3.11. Costo trabajo en terreno

Ítem	Costo (dólares americanos)
Limpieza de terreno	70.168,00
Replanteo y trazado de estructuras	4.313,79
Excavación con retroexcavadora	36.548,17
Trabajo de terreno	111.029,96

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se han tomado en cuenta para la construcción las obras civiles que involucran la fabricación de estructuras de hormigón para la fosa de sedimentación y otras estructuras menores que forman parte del esquema de la unidad de tratamiento, tal como se detalla a continuación:

Tabla 3.12. Costo construcciones civiles

Ítem	Costo (dólares americanos)
Losa de fondo de hormigón	38.194,57
Elevación de estructura de hormigón	62.248,57
Construcciones civiles	100.443,14

Fuente: Elaboración propia

Una vez se ha definido los costos involucrados en la construcción y emplazamiento de estructuras, también se han incluido los costos referidos por documentación referida al diseño e ingeniería.

Tabla 3.13. Costo estudios e ingeniería

Ítem	Costo (dólares americanos)
Estudio de diseño e ingeniería	34.162,12

Fuente: Elaboración propia

Por tanto, se ha resumido los costos indirectos en la siguiente tabla:

Tabla 3.14. Costo indirecto

Ítem	Costo (dólares americanos)
Trabajo de terreno	111.029,96

Construcciones civiles	100.443,14
Estudio de diseño e ingeniería	34.162,12
Costo total indirecto	245.635,22

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, el costo total estimado para la implementación de la nueva unidad de torre de lecho empacado viene de la suma de los costos directos e indirectos, cuyo valor es de 372.161,60 dólares americanos (2.590.244,70 bolivianos). Este gasto se justifica por los beneficios que trae a la comunidad, la empresa y el personal operativo de planta los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.15. Análisis costo beneficio

Costo	Beneficio
<p>Costo total</p> <p>372.161,60 USD</p> <p>2.590.244,70 bolivianos</p>	Disposición segura de efluentes líquidos que respetan los parámetros de la normativa ambiental de cuerpos receptores de agua.
	Imagen de la empresa no comprometida cumpliendo la visión de la misma respecto a la responsabilidad ambiental.
	No afecta la continuidad de la producción de la planta y transporte de producto a causa de conflictos sociales derivados de problemas por contaminación de aguas.
	Condiciones de trabajo más favorables para los operadores en cuanto a salud y seguridad operativa.

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

Dentro del presente trabajo se han establecido las siguientes conclusiones:

- Se ha realizado el diseño de una unidad basada en el despojamiento por aire por estudios de ingeniería, habiendo escogido el modelo de torre de lecho empacado con anillos Pall para realizar la remoción del amoniaco del afluente de ingreso para obtener un efluente limpio que cumple la normativa ambiental de 4 ppm de amoniaco en cuerpos receptores de agua, en este caso el arroyo Muñecas.
- Se han revisado distintos métodos de tratamiento de aguas residuales al haber consultado distinta literatura local y extranjera, haciendo la descripción de sus principales características hasta encontrar el método de remoción de agua amoniacal más apropiado. Este es el caso del stripping por aire, al ser un método fácil de implementar y que no es complejo en su operación, tal es el caso de la torre de lecho empacado que tiene ventajas notorias con otros tratamientos que involucran reacciones químicas y biológicas.
- Se seleccionó el diseño de una torre de lecho empacada para lo cual se determinaron las dimensiones de la torre con una altura de 6,44 metros y 3,35 m de diámetros, la altura de lecho de 3,44 metros, el tipo de material de relleno es Pall de diámetro 50 mm de polipropileno. Además, se determinó la bomba de agua de tipo centrífugo de una potencia real de 4 HP capaz de mover el flujo de agua de alimentación hasta el tope de la torre, y también se estableció que el ventilador de aire sea de tipo centrífugo con una potencia de 55 KW para impulsar la cantidad de aire necesaria para la remoción de amoniaco y así obtener un efluente limpio a la salida de la torre.
- Se elaboró la propuesta económica para la implementación del método de tratamiento, considerando los costos de fabricación y diseño de la torre, procura de la bomba y el ventilador, así como los materiales complementarios. También se hizo una estimación de los costos respecto a los servicios de adecuación de terreno y posterior construcción de las facilidades dando un

monto total para el trabajo de 372.161,60 dólares americanos. Posteriormente se realizó el respectivo análisis costo beneficio enumerando las ventajas que proporciona la instalación de esta unidad, viendo que ofrece aspectos favorables para la empresa en cuanto a la imagen corporativa, la comunidad que se beneficiará de agua limpia libre de contaminantes y el complejo que podrá continuar con sus actividades sin interrupción en cuanto a producción.

4.2. Recomendaciones

Las recomendaciones para el trabajo elaborado son:

- Se recomienda realizar evaluaciones periódicas sobre el comportamiento de los efluentes del complejo petroquímico en función a las cantidades, porcentaje de contaminantes para garantizar el funcionamiento correcto de la unidad de tratamiento.
- Plantear la incorporación de un sistema térmico para la unidad de tratamiento de aguas amoniacales como medida preventiva para periodos de clima frígido que pueden afectar el funcionamiento normal de la unidad de tratamiento de efluentes amoniacales.
- Establecer los procedimientos de operación y mantenimiento necesarios para asegurar la disponibilidad del personal competente, las rutinas de operación, inspección y adquisición de repuestos y materiales de los equipos y recipientes que componen la unidad de tratamiento de aguas amoniacales.

REFERENCIAS

- Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). (2021). *ANH: Industrialización de Hidrocarburos*. Obtenido de ANH:
<https://www.anh.gob.bo/w2019/contenido.php?s=7>
- Agromática. (s.f.). *La (gran) importancia del nitrógeno en las plantas*. Obtenido de Agromática: <https://www.agromatica.es/importancia-del-nitrogeno-en-las-plantas/>
- American Petroleum Institute (API). (2010). *Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries: ANSI/API Standard 610 Eleventh Edition*. Washington: API Publishing Services.
- American Public Health Association. (2018). *4500-N Nitrogen*.
doi:10.2105/SMWW.2882.086
- American Society of Mechanical Engineers (ASME). (2016). *BPVC Section VIII-1 Reglas para la Construcción de Recipientes a Presión (Spanish)*. Obtenido de ASME : https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/bpvc-viii-1_es-bpvc-section-viii-1-reglas-para-la-construccion-de-recipientes-presion
- American Society of Mechanical Engineers (ASME). (2018). *Welded and Seamless Wrought Steel Pipe*. New York: The American Society of Mechanical Engineers.
- ASPA Sistemas de Purificación de Agua. (2018). *Suavizadores de agua: Descubre como funcionan nuestros suavizadores*. Obtenido de ASPA:
<http://aspafiltros.com/suavizadores/>
- ASTM International . (2018). *ASTM D888-18: Standard Test Methods for Dissolved Oxygen in Water*. Obtenido de ASTM International :
<https://www.astm.org/Standards/D888.htm>
- ASTM International. (2015). *ASTM D1426-15: Standard Test Methods for Ammonia Nitrogen in Water*. Obtenido de ASTM International :
<https://www.astm.org/Standards/D1426.htm>

- ASTM International. (2018). *ASTM D1293-18: Standard Test Methods for pH of Waters*. Obtenido de ASTM International:
<https://www.astm.org/Standards/D1293.htm>
- Bahrani, M., Zabini, S., Gougol, M., Hoseinabadi, H. A., Jamshidian, S., Adimi, M., & Pishnamazi, M. (2020). Process Design of Ammonia Separation for Nitrification Control in Aeration Basins at IKORC's Oily Wastewater Treatment Unit. *ACS OMEGA*. doi:10.1021/acsomega.0c03067
- Bhandari, V., Gayatri Sorokhaiban, L., & Ranade, V. (2016). *Industrial wastewater treatment for fertilizer industry- A case study*. Pune.
- Bleier, F. (1998). *Fan Handbook: Selection, Application, and Design*. New York: McGraw-Hill.
- Bock, G. (2014). *Removal of High and Low Levels of Ammonium from Industrial Wastewaters (Tesis de Maestría)*. University of Nevada, Las Vegas.
- Bui, X.-T., Chiemchaisri, C., Fujioka, T., & Varjani, S. (2019). *Water and Wastewater Treatment Technologies*. Singapore: Springer.
- Cheremisinoff, N. (2002). *Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies*. Woburn: Butterworth-Heinemann.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales Pretratamiento y Tratamiento Primario*. Coyoacán: CONAGUA.
- Congreso Nacional. (1992). *Ley 1333: Ley del Medio Ambiente*. Gaceta Oficial de Bolivia. Obtenido de
<http://www.gacetaoficialdebolivia.gob.bo/edicions/view/1740>
- Davis, M. (2010). *Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice*. Michigan: McGraw-Hill.

- Deng, Q. (2014). *Ammonia Removal and Recovery from Wastewater Using Natural Zeolite: An Integrated System for Regeneration by Air Stripping Followed Ion Exchange (Tesis de Maestría)*. University of Waterloo, Waterloo.
- Diario Opinión. (3 de Agosto de 2018). Informe confirma contaminación de la planta de urea en Bulu Bulu. *Opinión*. Obtenido de <https://www.opinion.com.bo/articulo/cochabamba/informe-confirma-contaminaci-oacute-n-planta-urea-bulo-bulo/20180803224200621916.html>
- Diario Pagina Siete. (9 de Junio de 2018). Apuntan a fallas en construcción de Planta de Amoniaco y Úrea. *Página 7*. Obtenido de <https://www.paginasiete.bo/economia/2018/6/9/apuntan-fallas-en-construccion-de-planta-de-amoniaco-urea-182849.html#!>
- Dowbenko, R. (2007). *New Fertility Product-ESN: Controlled-Release Nitrogen for Enhanced Nitrogen Efficiency and Improved Environmental Safety*. Agrium, Calgary .
- Environmental Protection Agency (EPA). (2000). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: Extracción de amoníaco por arrastre con aire*. Obtenido de EPA United States Environmental Protection Agency: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P1009DGS.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2000+Thru+2005&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=>
- Espino Valdés, M. S. (2003). *Estudio de Nitrificación-Desnitrificación de un Efluente Secundario de Tratamiento de Aguas Residuales Mediante un Sistema de Reactores Biológicos en Serie*. Centro de Investigación en Materiales Avanzados S. C., Chihuahua.
- GEDAR. (s.f.). *GEDAR: Oxidación total*. Obtenido de GEDAR: <https://www.gedar.com/domesticos/vertidos-residuales/oxidacion-total.htm>

- Gestión de Aguas y Residuos (GEDAR). (s.f.). *Residuales: Filtro Percolador*.
Obtenido de GEDAR: <https://www.gedar.com/residuales/tratamiento-biologico-aerobio/filtros-percoladores.htm>
- Henze, M., Harremoës, P., Jansen, J., & Arvin, E. (1997). *Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Ilunga, W. (2013). *Reduction of ammonia from wastewater effluent using modified activated clay (Tesis de Maestría)*. Cape Peninsula University of Technology, Bellville.
- Jorgensen, T. (2002). *Removal of Ammonia from Wastewater by Ion Exchange in the Presence of Organic Compounds (Tesis de Maestría)*. Christchurch.
- KBR. (s.f.). *Solutions: Ammonia & Fertilizers Technologies*. Obtenido de KBR: <https://www.kbr.com/en/solutions/technologies/process-technologies/ammonia-fertilizers-technologies>
- La planta de Urea y amoniaco, en medio de fugas y paralizaciones. (17 de diciembre de 2018). *Página Siete*. Obtenido de <https://www.paginasiete.bo/anuario/2018/12/17/la-planta-de-urea-amoniaco-en-medio-de-fugas-paralizaciones-202881.html>
- Ley de Medio Ambiente. (1992). *Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica*.
- Mackenzie, D. (2010). *Water and Wastewater Engineering*. New York: McGraw Hill.
- Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. New York: McGraw-Hill Education.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2013). *Sistematización sobre tratamiento y reuso de aguas residuales*. La Paz: PROAGRO.
- Mohamm, F., & Xiao, C. (26 de Septiembre de 2018). *Ammonia Removal from Mine Impacted Waters*. Obtenido de BQE Water: <https://www.bqewater.com/ammonia-removal-from-mine-impacted-waters/>

- Murguía , A. (2012). *Slidshare: Curso de Biología (Diapositiva PowerPoint)*. Obtenido de Slidshare: https://es.slideshare.net/gsm_sjl/ecologia-26762003
- Nuevo, D. (9 de noviembre de 2018). *Tratamientos secundarios en depuración de aguas residuales: Contactores biológicos giratorios*. Obtenido de TECPA: <https://www.tecpa.es/edar-tratamiento-secundario-depuracion-aguas/>
- Okoyama University - InorgChem. (7 de mayo de 2021). *High CO2 Adsorption of Zeolites Paves Way for its Application in Air Purification*. Obtenido de AZO Cleantech: <https://www.azocleantech.com/news.aspx?newsID=29360>
- Patwardhan, A. (2008). *Industrial Waste Water Treatment*. New Dehli: PHI Learning Private Limited.
- Paul, E. (2007). *Soil Microbiology, Ecology, and Biochemistry*. Burlington: Academic Press.
- Pródanov, M. (2012). Tecnologías de separación por membranas para la revalorización de subproductos alimenticios. En S. Beltrán Calvo, M. L. González San José , & A. Perote Alejandre, *Retos medioambientales de la industria alimentaria* (págs. 103-123). Madrid: IMC .
- Qasim, S. (1999). *Wastewater Treatment Plants: Planning, Design, and Operation*. Boca Raton: CRC Press LLC.
- Qasim, S., & Zhu, G. (2018). *Wastewater Treatment and Reuse: Theory and Design Examples* . Dallas: CRC Press.
- Ramalho, R. (1977). *Introduction to Wastewater Treatment Processes*. Quebec: Academic Press.
- Riffat , R. (2013). *Fundamentals of Wastewater Treatment and Engineering*. Boca Raton: CRC Press.
- Rowe, D., & Abdel-Magid, I. (1995). *Handbook of Wastewater Reclamation and Reuse*. Boca Raton: Lewis Publishers.

- Russell, D. (2006). *Practical Wastewater Treatment*. Lilburn, Georgia: John Wiley & Sons.
- Schmitt, J. (septiembre de 2002). *Agrichemical and Environmental News 197: Water Quality Improvements in the Lower Yakima River*. Obtenido de Agrichemical and Environmental News:
<http://aenews.wsu.edu/Sept02AENews/Sept02AENews.htm>
- Sefiltra. (s.f.). *Sefiltra: Un descalcificador de agua para proteger tus instalaciones en bodega*. Obtenido de Sefiltra: <https://www.sefiltra.com/un-descalcificador-de-agua-para-proteger-tus-instalaciones-en-bodega/>
- Smith, A. (16 de febrero de 2021). *Fluence: ¿Qué es el Intercambio Iónico?*. Obtenido de Fluence: <https://www.fluencecorp.com/es/que-es-el-intercambio-ionico/>
- Spellman, F. (2003). *Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations*. Boca Raton: Lewis Publishers.
- Sperling, M. (2007). *Biological Wastewater Treatment Series: Volume 2 Basic Principles of Wastewater Treatment*. Mina Gerais: IWA Publishing.
- Srinivasan, A., Chowdhury, P., & Viraraghavan, T. (2009). Air Stripping in Industrial Wastewater Treatment. En A. Srinivasan, P. Chowdhury, & T. Viraraghavan, *Water and Wastewater Treatment Technologies* (págs. 88-110). Oxford: EOLSS Publishers.
- Streeter, V., & Wylie, E. (1988). *Mecánica de los fluidos*. Ciudad de Mexico: McGraw-Hill.
- Toyo Engineering. (2006). *Solution: Energy-saving Urea Synthesis Technology ACES21*. Obtenido de Toyo Engineering: <https://www.toyo-eng.com/jp/en/solution/energy/>
- Tratamiento de Aguas Residuales. (s.f.). *Etapas del proceso de tratamiento*. Obtenido de Tratamiento de Aguas Residuales:

<https://tratamientodeaguasresiduales.net/etapas-del-tratamiento-de-aguas-residuales/>

Viceministerio de Comunicación. (14 de Septiembre de 2017). *Viceministerio de comunicación*. Obtenido de <https://www.comunicacion.gob.bo/?q=20170914/24160>

W. P. (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas Residuales: El recurso desaprovechado*. París.

Wagner, W. (2010). *Recomendaciones para la elección de plantas de tratamiento de agua residual aptas para Bolivia*. La Paz: PROAPAC.

Wang, L., Hung, Y.-T., & Shammas, N. (2006). *Handbook of Environmental Engineering: Volume 4 Advanced Physicochemical Treatment Processes*. Totowa, New Jersey: Humana Press Inc.

White, F. M. (2003). *Fluid Mechanics*. New York: McGraw Hill Inc.

Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos (YPFB). (02 de Mayo de 2013). *YPFB: Contexto Histórico de YPFB*. Obtenido de YPFB: <https://www.ypfb.gob.bo/es/informacion-institucional/contexto-historico.html>

Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos (YPFB). (15 de septiembre de 2017). *YPFB: La era petroquímica se inicia en Bolivia con la operación de la Planta de Amoniaco y Urea*. Obtenido de YPFB : <https://www.ypfb.gob.bo/es/informacion-institucional/noticias/792-la-era-petroqu%C3%ADmica-se-inicia-en-bolivia-con-la-operaci%C3%B3n-de-la-planta-de-amoniaco-y-urea.html>

Yahya, S. (2002). *Turbines Compressors and Fans*. New Delhi: Tata McGraw-Hill.

ANEXOS

Anexo 1. Constante de Henry

Parámetro	Constante de Henry (atm)	Constante de Henry (adimensional)	Coeficiente de temperatura	
			A	B
Aire	66400	49.68	557.60	6.724
Amoniaco	0.75	5.61x10-4	1887.12	6.315
Dióxido de carbono	1420	1.06	1012.40	6.606
Monóxido de carbono	53600	40.11	554.52	6.621
Cloro	579	0.43	875.69	5.75
Dióxido de cloro	1500	1.12	1041.77	6.73
Hidrógeno	68300	51.10	187.04	5.473
Sulfuro de hidrógeno	483	0.36	884.94	5.703
Metano	37600	28.13	675.74	6.880
Nitrógeno	80400	60.16	537.62	6.7392
Oxígeno	41100	30.75	595.27	6.644
Ozono	5300	3.97	1268.24	8.05
Dióxido de azufre	36	2.69x10-2	1207.85	5.68

Fuente: (Metcalf & Eddy, 2014)

Anexo 2. Rangos de uso para distintos tipos de ventiladores

Type of fan	Specific speed range (rpm)	Air volume (cfm)	Static pressure	Fan efficiency	Manufacturing cost	Size and weight
Propeller	500,000–100,000	Large	Low	Low	Low	Small
Tubeaxial	300,000–60,000	Large	Low	Medium	Low	Small
VAF, one stage	130,000–50,000	Large	Medium	High	Medium	Small
VAF, two stages	90,000–35,000	Large	Medium	High	Medium	Medium
Mixed flow	80,000–10,000	Medium	Medium	Low	High	Medium
Wide FC	70,000–25,000	Large	High	Medium	Medium	Large
AF, BC, BI	70,000–20,000	Medium	Medium	High	Medium	Medium
Narrow FC	40,000–10,000	Medium	High	Medium	Medium	Medium
Radial tip	65,000–25,000	Medium	Medium	Medium	Medium	Medium
Radial blades	25,000–10,000	Low	Medium	Low	Medium	Medium
Turbo blower	30,000–5,000	Small	High	Medium	Medium	Medium
Multistage turbo blower	8,000–1,000	Small	High	Low	High	Large

Fuente: (Bleier, 1998)

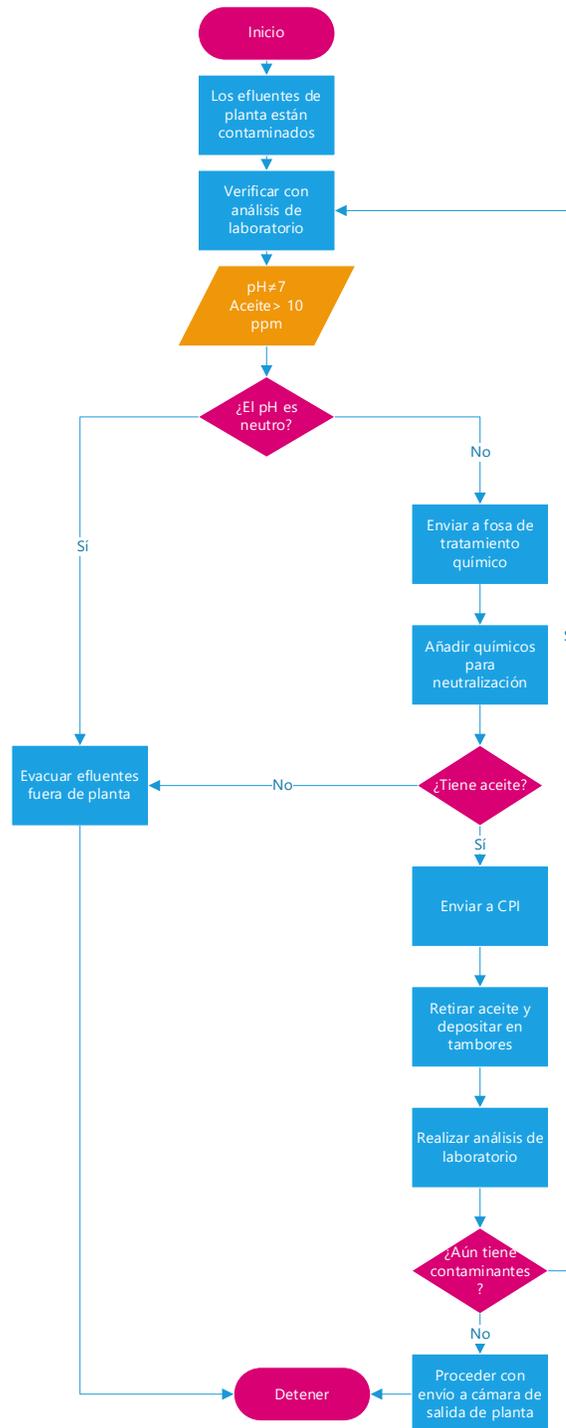
Anexo 3. Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores

CUADRO N° A-1
VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES DE PARÁMETROS EN CUERPOS RECEPTORES

N°	PARAMETROS	UNIDAD	CANCERIGENOS	CLASE "A"	CLASE "B"	CLASE "C"	CLASE "D"
1	2	3	4	5	6	7	8
1	PH	°C	NO	6,0 a 8,5	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0
2	Temperatura	°C		+/-3°C de C receptor	+/-3°C de C receptor	+/-3°C de C receptor	+/-3°C de C receptor
3	Sólidos disueltos totales;	mg/l	NO	1000	1000	1500	1500
4	Acetites y Grasas;	mg/l	NO	Ausentes	Ausente	0,3	1
5	DBO5	mg/l	NO	<2	<5	<20	<30
6	DQO	mg/l	NO	<5	<10	<40	<60
7	NMP Colifecales NMP	N/100ml	NO	<50 y <5 en 80% muestras	<1000y<200 en 80% de muestras	<5000y<1000 en 80% de muestras	<50000y<5000 en 80% de muestras
8	Parámetros	N/l		<1	<1	<1	<1
9	Color mg Pp/l	mg/l	NO	<10	<50	<100	<200
10	Oxígeno disuelto	mg/l	NO	>80% sat.	>70% sat.	>60% sat	>50% sat
11	Turbidez	UNT	NO	<10	<50	<100	<200
12	Sólidos sedimentables	mg/l - ml/l	NO	<10 mg/l	<30 mg/l -0,1ml/l	<50mg/l -<1ml/l	100 - <1ml/l
13	Aluminio	mg/l	NO	0,2 c. Al	0,5 c. Al	1,0 c. Al	1,0 c. Al
14	Amoníaco	mg/l	NO	0,05 c. NH3	1,0 c. NH3	2 c. NH3	4 c. NH3
15	Antimonio	mg/l	NO	0,01 c. Sb	0,01 c. Sb	0,01 c. Sb	0,01 c. Sb
16	Arsénico total	mg/l	SI	0,05 c. As	0,05 c. As	0,05 c. As	0,1 c. As
17	Benceno	ug/l	SI	2,0 c. Be	6,0 c. Be	10,0 c. Be	10,0
18	Bario	mg/l	NO	1,0 0,05 c. Ba	1,0 c. Ba	2,0 c. Ba	5,0 c. Ba
19	Berilio	mg/l	SI	0,001 c. B	0,001 c. Be	0,001 c. Be	0,001 c. Be
20	Boro	mg/l	NO	1,0 c. B	1,0 c. B	1,0 c. B	1,0 c. B
21	Calcio	mg/l	NO	200	300	300	400
22	Cadmio	mg/l	NO	0,005	0,005	0,005	0,005
23	Cianuros	mg/l	NO	0,02	0,1	0,2	0,2
24	Cloruros	mg/l	NO	250 c. Cl	300 c. Cl	400 c. Cl	500 c. Cl
25	Cobre	mg/l	NO	0,05 c. Cu	1,0 c. Cu	1,0 c. Cu	1,0 c. Cu
26	Cobalto	mg/l	NO	0,1 c. Co	0,2 c. Co	0,2 c. Co	0,2 c. Co
27	Cromo Hexavalente	mg/l	SI	0,05 c. Cr total	0,05 c. Cr+6	0,05 c. Cr+6	0,05 c. Cr+6
28	Cromo Trivalente	mg/l	NO		0,6 c. Cr+3	0,6 c. Cr+3	1,1 c. Cr+3
29	1.2 Dicloroetano	ug/l	SI	10,0	10,0	10,0	10,0
30	1.1 Dicloroetano	ug/l	SI	0,3	0,3	0,3	0,3
31	Estaoño	mg/l	NO	2,0	2,0 c. Sn	2,0 c. Sn	2,0 c. Sn
32	Fenoles	ug/l	NO	1c. C6H5OH	1 c. C6H5OH	5 c. C6H5OH	10 c. C6H5OH
33	Hierro Soluble	mg/l	NO	0,3 c. Fe	0,3 c. Fe	1,0 c. Fe	1,0 c. Fe
34	Fluoruros	mg/l	NO	0,6 -1,7 c. F	0,6 -1,7 c. F	0,6 -1,7 c. F	0,6 -1,7 c. F
35	Fostato Total	mg/l	NO	0,4 c. Orthofosf.	0,5 c. Orthofosf.	1,0 c. Orthofosf	1,0 c. Orthofosf
36	Magnesio	mg/l	NO	100 c. Mg	100 c. Mg	150 c. Mg	150 c. Mg
37	Manganeso	mg/l	NO	0,5 c. Mn	1,0 c. Mn	1,0 c. Mn	1,0 c. Mn
38	Mercurio	mg/l	NO	0,001 Hg	0,001 Hg	0,001 Hg	0,001 Hg
39	Litio	mg/l	NO	2,5 c. Li	2,5 c. Li	2,5 c. Li	5 c. Li
40	Niquel	mg/l	SI	0,05 c. Ni	0,05 c. Ni	0,05 c. Ni	0,5 c. Ni
41	Nitrato	mg/l	NO	20,0 c. N03	50,0 c. N03	50,0 c. N03	50,0 c. N03
42	Nitrito	mg/l	NO	<1,0 c.N	1,0 c.N	1,0 c.N	1,0 c.N
43	Nitrógeno Total	mg/l	NO	5 c. N	12 c. N	12 c. N	12 c. N

Fuente: (Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, 1992)

Anexo 4. Flujograma de unidad de tratamiento de aguas residuales de la planta de amoniaco y urea



Fuente: Elaboración propia

Anexo 5. Análisis de laboratorio de drenajes de agua amoniacal



REPORTE DE ENSAYOS - DRENAJES DE PLANTA

RG-416-A-PP-2-DOP/UOAU-X

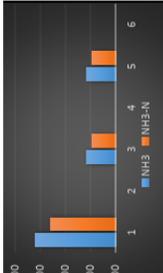
FECHA: 04/05/2019

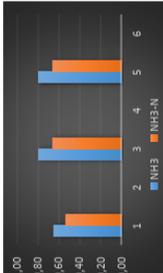
ENSAYISTA: LIZBETD ROBLES

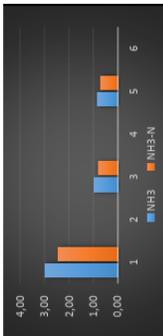
DIA 04/05/2019

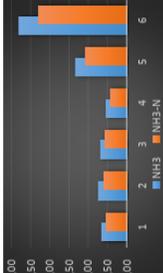
ENSAYOS RUTINARIOS DE CONTENIDO DE NH3 / NH3-N EN DRENAJES DE PLANTA

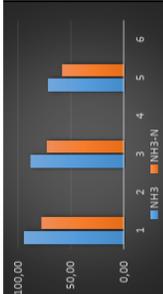
HORA	BOILER SIDE			C/T SIDE			WWT INTAKE			BULK UNDER /BULK STORAGE			WWT POND - 351F					
	pH	Cond. (us/cm)	NH3 (ppm)	NH3-N (ppm)	pH	Cond. (us/cm)	NH3 (ppm)	NH3-N (ppm)	HORA	pH	Cond. (us/cm)	NH3 (ppm)	NH3-N (ppm)	HORA	pH	Cond. (us/cm)	NH3 (ppm)	NH3-N (ppm)
04:45	8,96	106,00	6,36	5,22	8,36	185,80	2,96	2,43	04:45	6,90	187,00	0,65	0,53	04:45	9,07	1120,00	93,90	77,00
08:00	8,86	106,40	2,27	1,86	8,47	207,70	0,98	0,80	08:00	6,93	150,80	0,72	0,59	08:00	9,17	1106,00	88,10	72,24
16:40	8,71	76,40	2,27	1,86	9,15	275,00	0,84	0,69	11:00	6,86	143,30	0,68	0,56	16:40	9,14	1085,00	70,79	58,05
									19:20	7,10	1664,00	2,80	2,30					



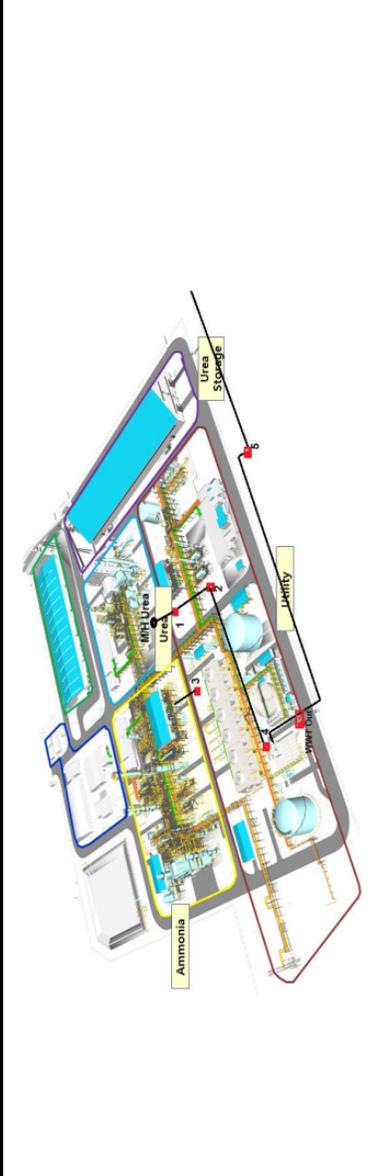








UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE ENSAYOS



OBSERVACIONES:



REPORTE DE ENSAYOS - DRENAJES DE PLANTA

RG-416-A-PP-2-DOP/UOAU-X

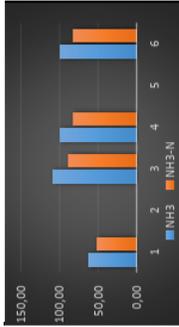
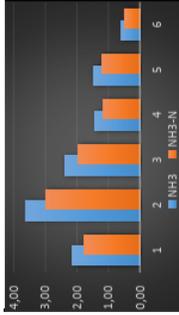
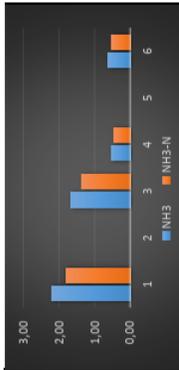
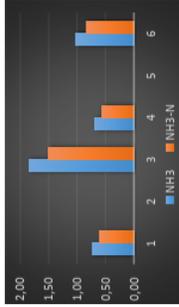
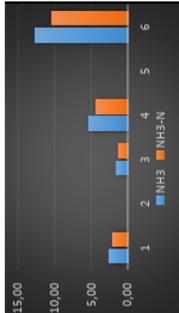
FECHA: 01/05/2019

DIA

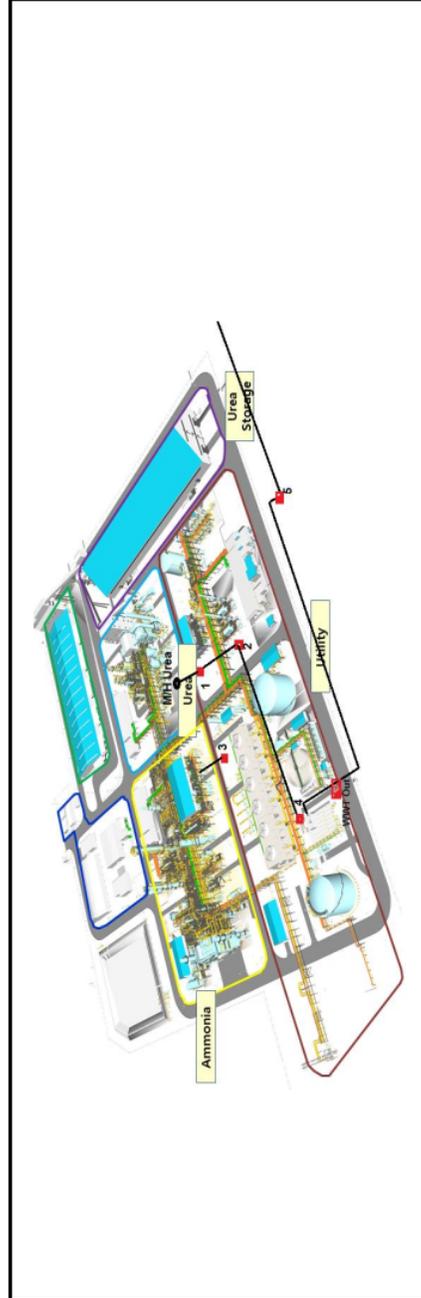
ENSAYISTA: LIZBEDIT ROBLÉS

ENSAYOS RUTINARIOS DE CONTENIDO DE NH₃ / NH₃-N EN DRENAJES DE PLANTA

HORA	BOILER SIDE		C/T SIDE		WWT INTAKE		BULK UNDER /BULK STORAGE		WWT POND - 351F			
	pH	Cond. (µs/cm)	NH ₃ (ppm)	NH ₃ -N (ppm)	pH	Cond. (µs/cm)	NH ₃ (ppm)	NH ₃ -N (ppm)	pH	Cond. (µs/cm)	NH ₃ (ppm)	NH ₃ -N (ppm)
05:00	8,86	121,60	2,45	2,01	8,62	130,00	2,20	1,80	9,80	583,30	61,70	50,59
07:40	8,93	64,45	1,54	1,26	8,60	226,10	1,66	1,36	9,92	883,00	107,90	88,48
16:50	9,06	145,70	5,30	4,35	8,12	293,40	0,54	0,44	9,82	901,60	99,43	81,53
20:11	9,26	206,40	12,70	10,41	8,30	325,10	0,62	0,51	9,85	907,00	99,20	81,34



UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE ENSAYOS

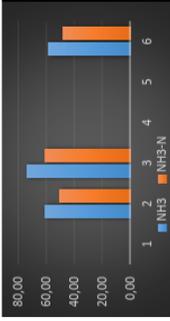
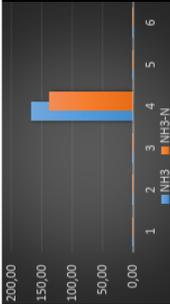
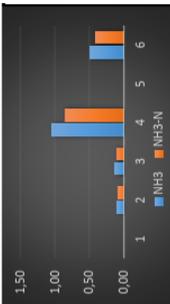
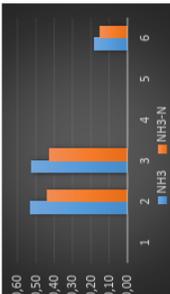
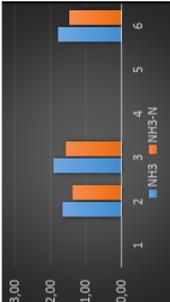


OBSERVACIONES:

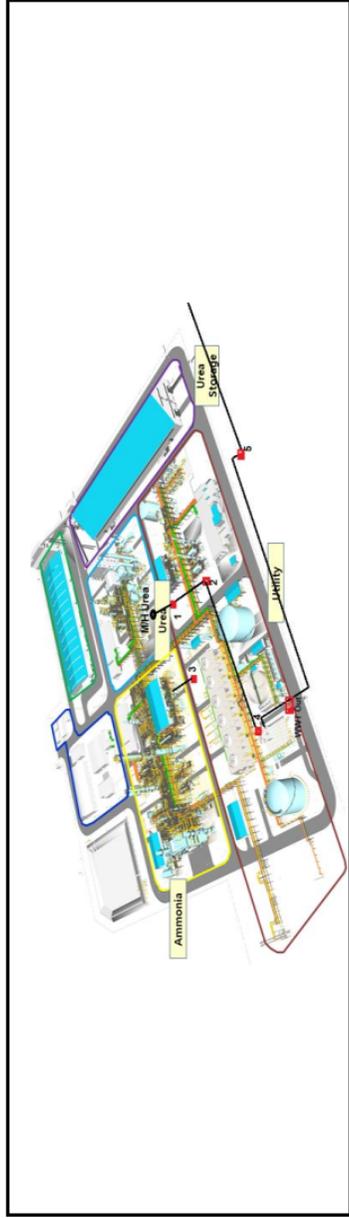
FECHA: 08/05/2019 TURNO: DIA: ENSAYISTA: MICHEL SAAVEDRA

ENSAYOS RUTINARIOS DE CONTENIDO DE NH₃ / NH₃-N EN DRENAJES DE PLANTA

HORA	BOILER SIDE			C/T SIDE			WWT INTAKE			BULK UNDER / BULK STORAGE			WWT POND - 351F			
	pH	Cond. (µs/cm)	NH ₃ (ppm)	NH ₃ -N (ppm)	pH	Cond. (µs/cm)	NH ₃ (ppm)	NH ₃ -N (ppm)	pH	Cond. (µs/cm)	NH ₃ (ppm)	NH ₃ -N (ppm)	pH	Cond. (µs/cm)	NH ₃ (ppm)	NH ₃ -N (ppm)
04:40	7,58	134,60	1,65	1,35	7,27	58,75	0,10	0,08	6,46	198,60	0,45	0,37	7,91	1765,00	60,98	50,00
07:30	7,65	96,76	1,91	1,57	7,33	68,86	0,13	0,11	6,82	124,80	1,53	1,25	7,94	1764,00	73,57	60,33
17:10	8,60	59,50	1,76	1,44	7,42	288,60	1,04	0,85	6,59	691,80	0,65	0,53	7,83	1767,00	58,32	47,82
19:40	8,43	68,39	2,19	1,80	7,92	309,30	0,49	0,40	6,54	298,80	0,42	0,34	7,85	1785,00	65,36	53,60
					8,44	167,20	0,28	0,23	6,59	239,70	1,42	1,16				



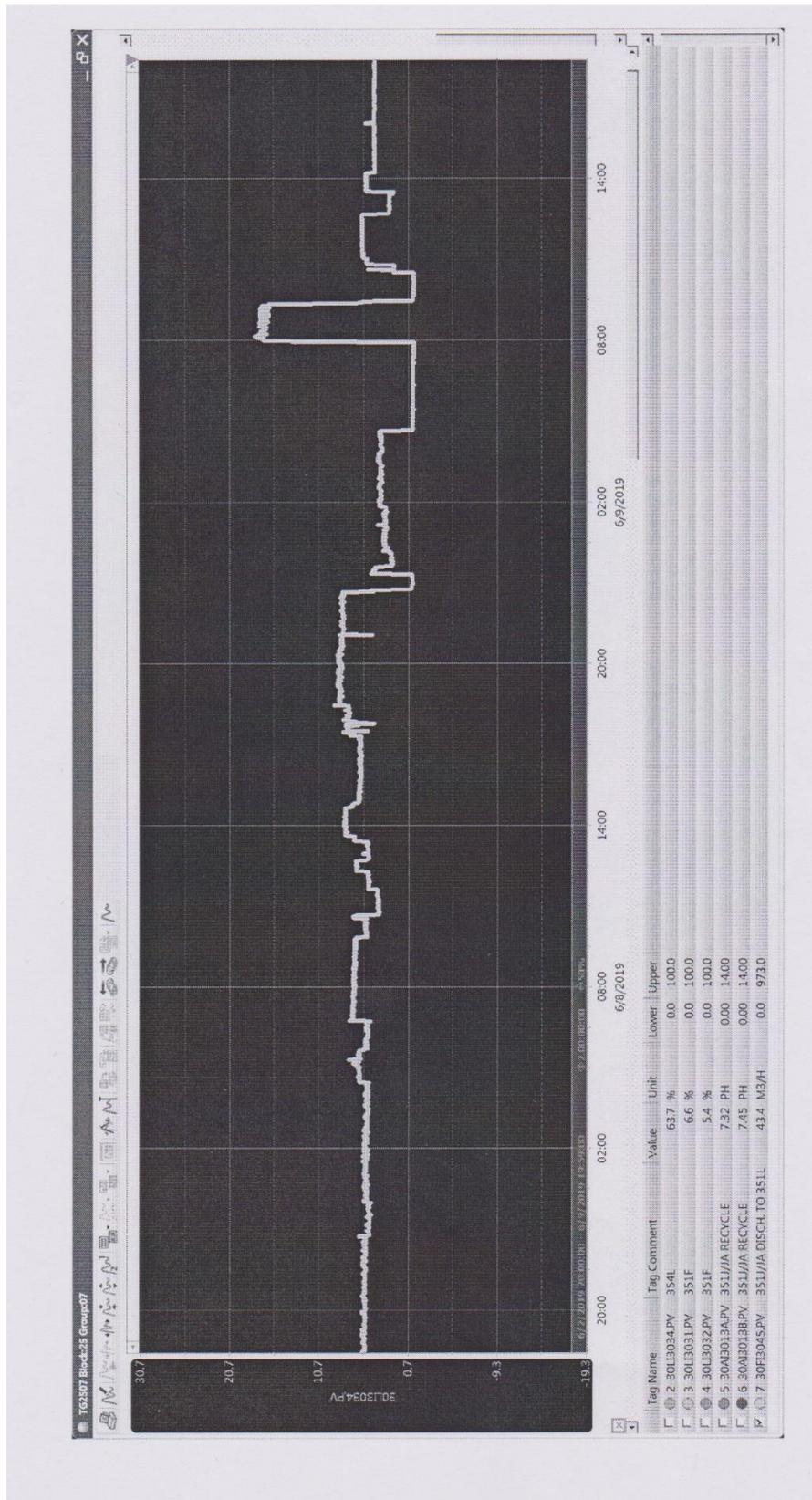
UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE ENSAYOS

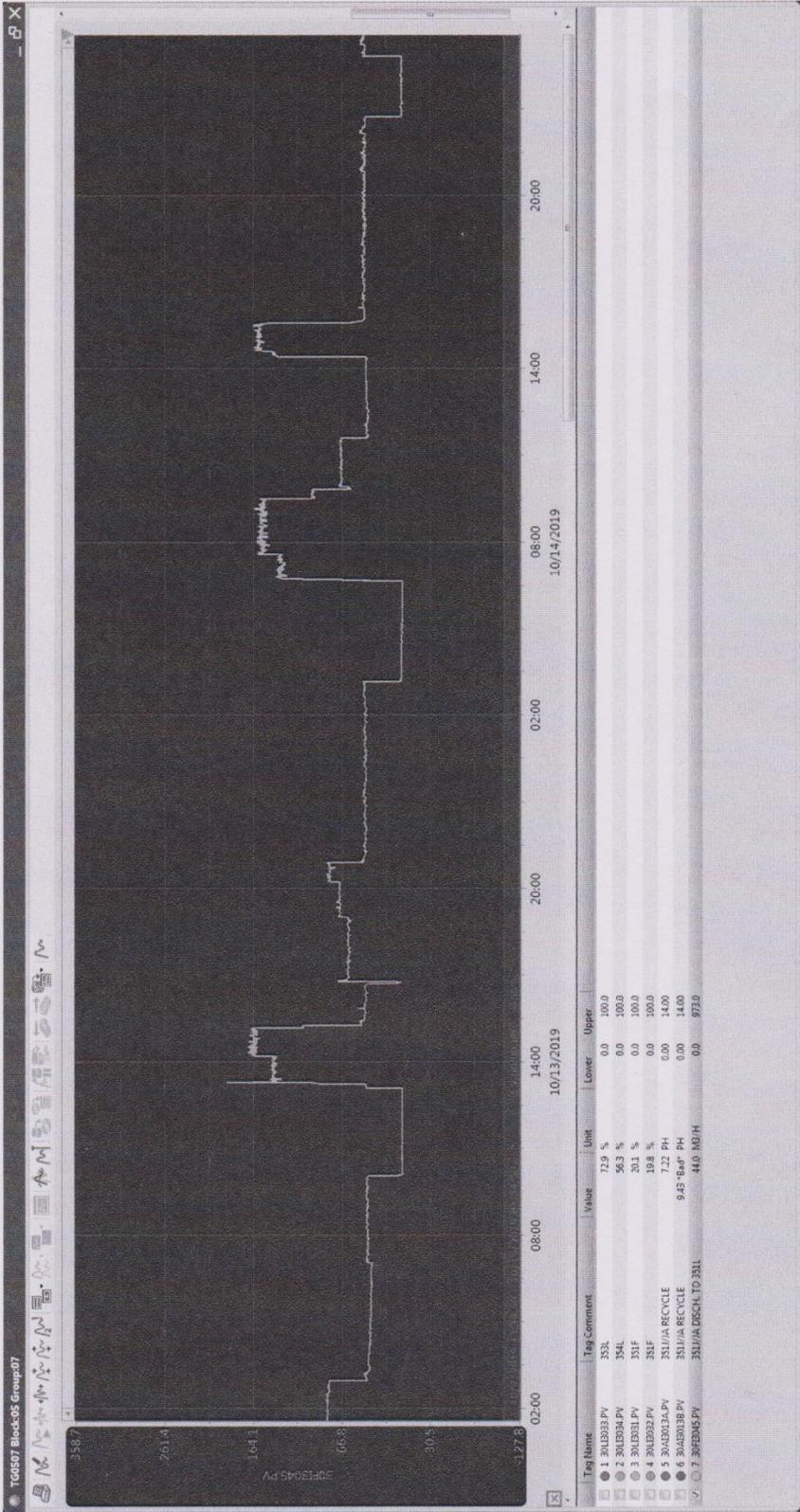


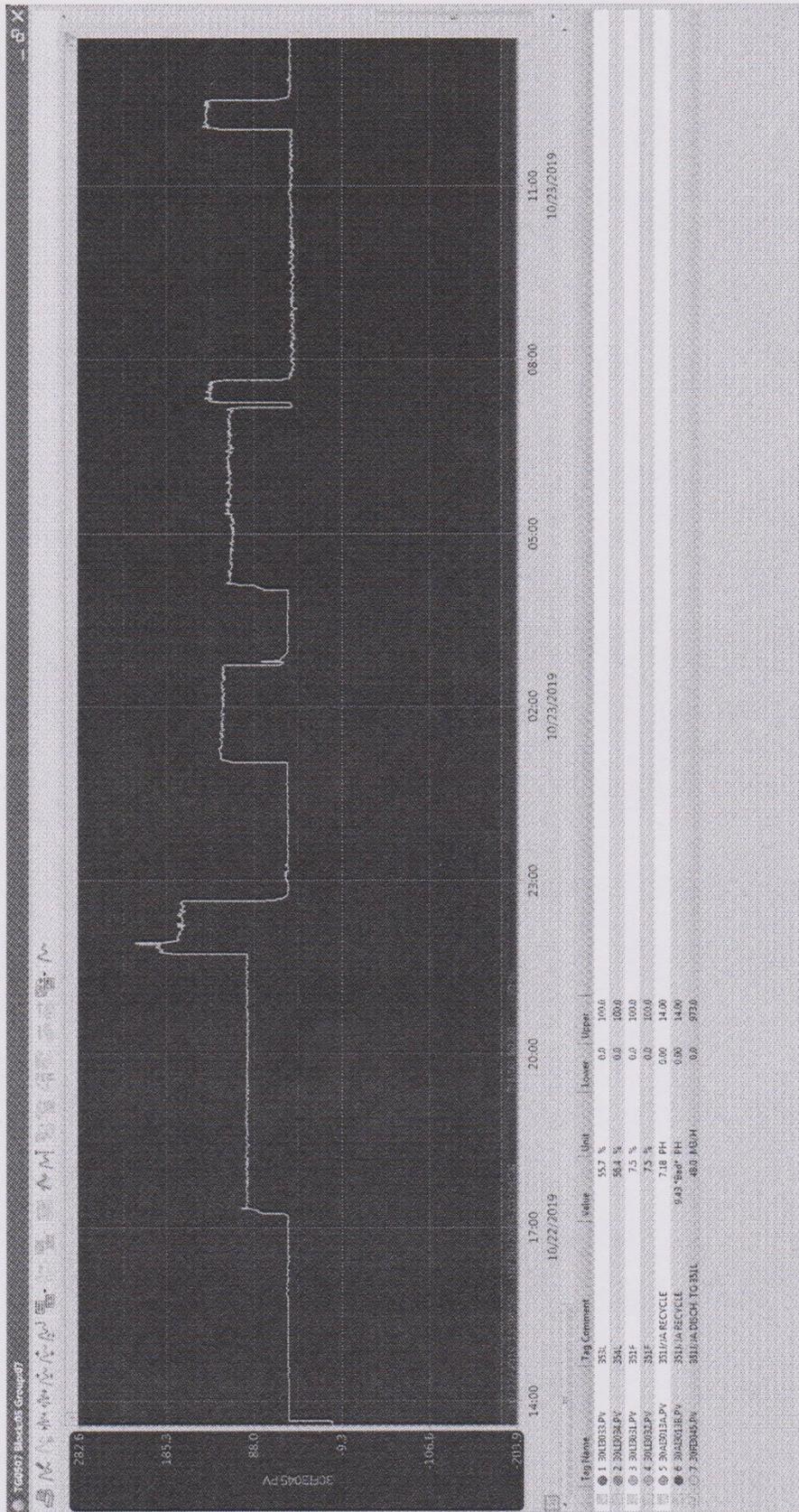
OBSERVACIONES:

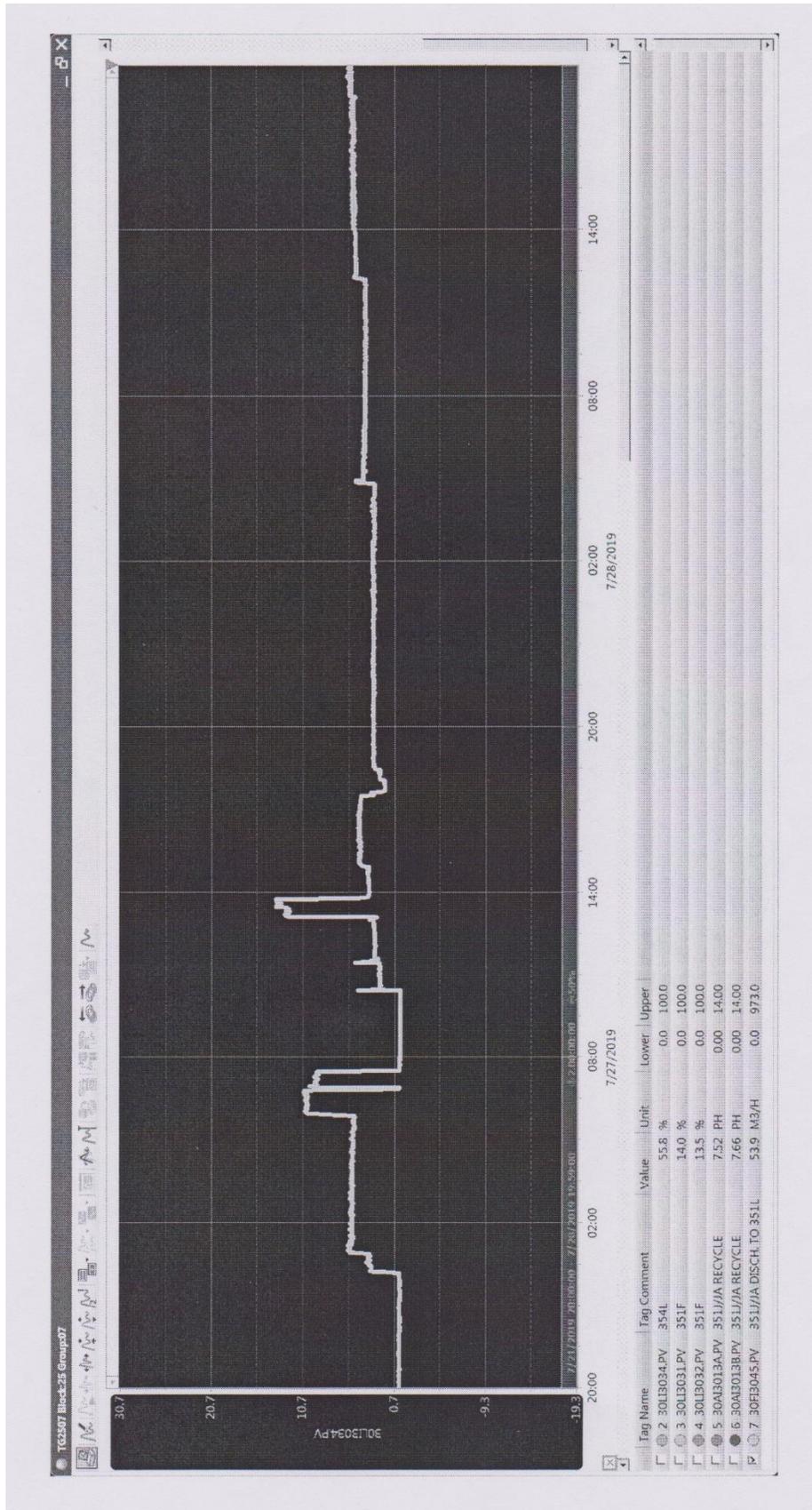
Fuente: Reporte de ensayos drenajes de planta YPFB

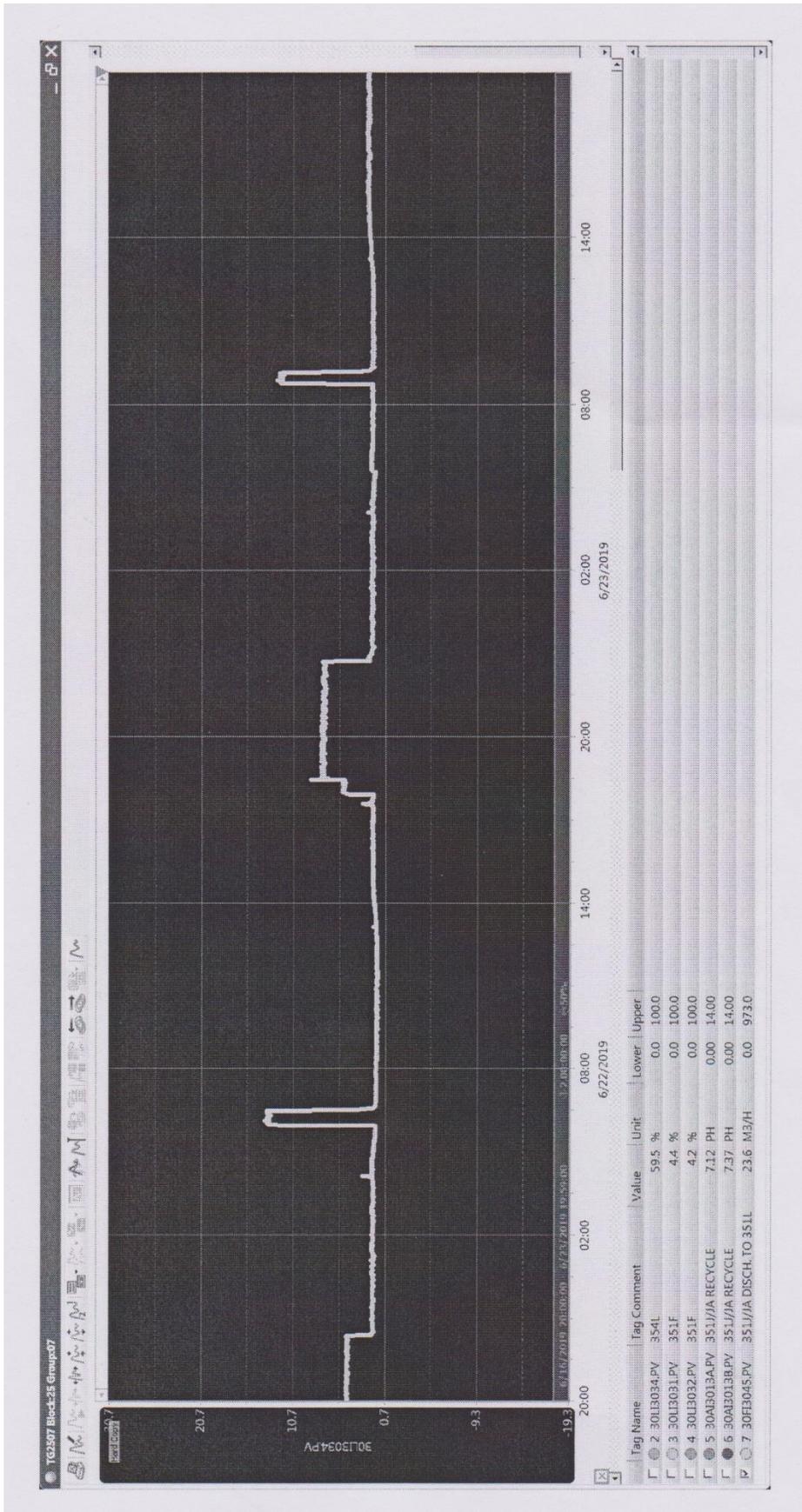
Anexo 6. Tendencias de caudal de salida de agua FT3045

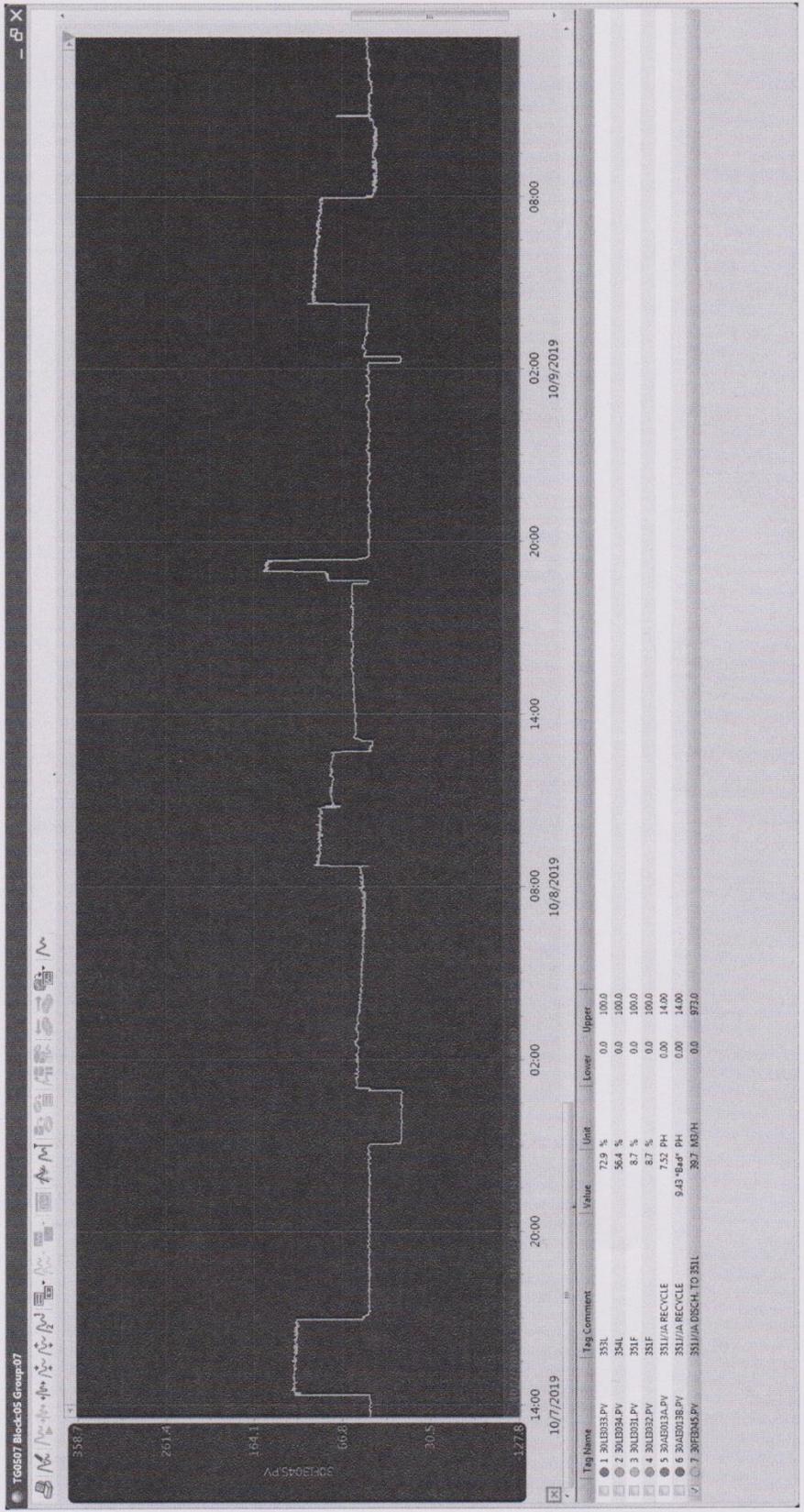


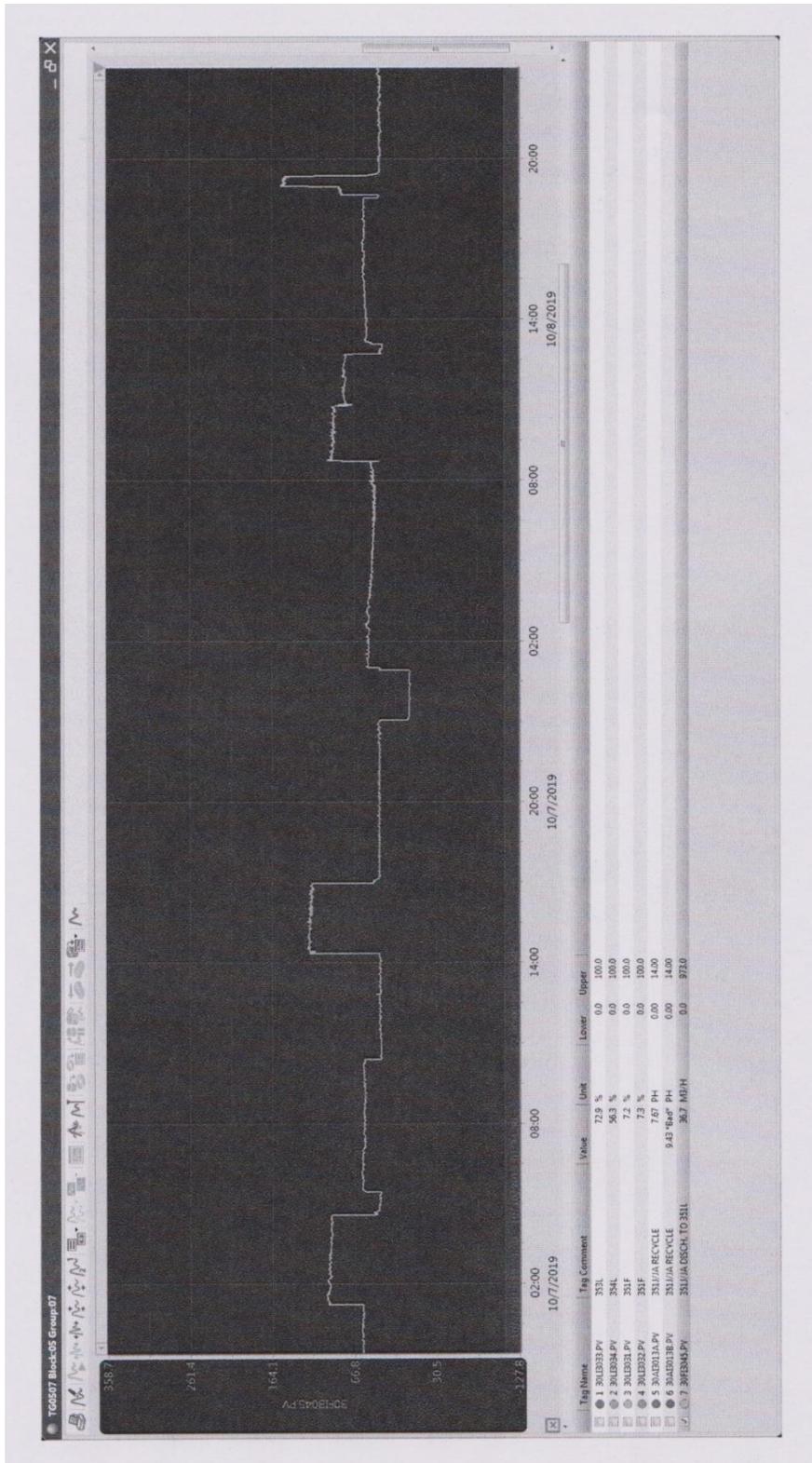












Fuente: Gráfica de DCS Yokogawa Centum para FT3045

Anexo 7. Propiedades del agua

Temp- erature, °C	Specific weight, γ , kN/m ³	Density ^b , ρ , kg/m ³	Modulus of elasticity ^b , E/10 ⁶ , kN/m ²	Dynamic viscosity, $\mu \times 10^3$, N·s/m ²	Kinematic viscosity, $\nu \times 10^6$, m ² /s	Surface tension ^c , σ , N/m	Vapor pressure, P _v , kN/m ²
0	9.805	999.8	1.98	1.781	1.785	0.0765	0.61
5	9.807	1000.0	2.05	1.518	1.519	0.0749	0.87
10	9.804	999.7	2.10	1.307	1.306	0.0742	1.23
15	9.798	999.1	2.15	1.139	1.139	0.0735	1.70
20	9.789	998.2	2.17	1.002	1.003	0.0728	2.34
25	9.777	997.0	2.22	0.890	0.893	0.0720	3.17
30	9.764	995.7	2.25	0.798	0.800	0.0712	4.24
40	9.730	992.2	2.28	0.653	0.658	0.0696	7.38
50	9.689	988.0	2.29	0.547	0.553	0.0679	12.33
60	9.642	983.2	2.28	0.466	0.474	0.0662	19.92
70	9.589	977.8	2.25	0.404	0.413	0.0644	31.16
80	9.530	971.8	2.20	0.354	0.364	0.0626	47.34
90	9.466	965.3	2.14	0.315	0.326	0.0608	70.10
100	9.399	958.4	2.07	0.282	0.294	0.0589	101.33

Fuente: (Metcalf & Eddy, 2014)

Anexo 8. Diámetros comerciales de tuberías

Table 2-1 Dimensions and Weights (Masses) of Welded and Seamless Wrought Steel Pipe (Cont'd)

NPS (DN)	Identification [Note (1)]	Schedule No.	Outside Diameter, in. (mm)	Wall Thickness, in. (mm)	Plain End Weight (Mass), lb/ft (kg/m)
3 (80)	3.500 (88.9)	0.109 (2.77)	3.95 (5.88)
3 (80)	...	10	3.500 (88.9)	0.120 (3.05)	4.34 (6.46)
3 (80)	3.500 (88.9)	0.125 (3.18)	4.51 (6.72)
3 (80)	3.500 (88.9)	0.141 (3.58)	5.06 (7.53)
3 (80)	3.500 (88.9)	0.156 (3.96)	5.58 (8.30)
3 (80)	3.500 (88.9)	0.172 (4.37)	6.12 (9.11)
3 (80)	...	30	3.500 (88.9)	0.188 (4.78)	6.66 (9.92)
3 (80)	STD	40	3.500 (88.9)	0.216 (5.49)	7.58 (11.29)
3 (80)	3.500 (88.9)	0.250 (6.35)	8.69 (12.93)
3 (80)	3.500 (88.9)	0.281 (7.14)	9.67 (14.40)
3 (80)	XS	80	3.500 (88.9)	0.300 (7.62)	10.26 (15.27)
3 (80)	...	160	3.500 (88.9)	0.438 (11.13)	14.34 (21.35)
3 (80)	XXS	...	3.500 (88.9)	0.600 (15.24)	18.60 (27.68)
3½ (90)	...	5	4.000 (101.6)	0.083 (2.11)	3.48 (5.18)
3½ (90)	4.000 (101.6)	0.109 (2.77)	4.53 (6.75)
3½ (90)	...	10	4.000 (101.6)	0.120 (3.05)	4.98 (7.41)
3½ (90)	4.000 (101.6)	0.125 (3.18)	5.18 (7.72)
3½ (90)	4.000 (101.6)	0.141 (3.58)	5.82 (8.65)
3½ (90)	4.000 (101.6)	0.156 (3.96)	6.41 (9.54)
3½ (90)	4.000 (101.6)	0.172 (4.37)	7.04 (10.48)
3½ (90)	...	30	4.000 (101.6)	0.188 (4.78)	7.66 (11.41)
3½ (90)	STD	40	4.000 (101.6)	0.226 (5.74)	9.12 (13.57)
3½ (90)	4.000 (101.6)	0.250 (6.35)	10.02 (14.92)
3½ (90)	4.000 (101.6)	0.281 (7.14)	11.17 (16.63)
3½ (90)	XS	80	4.000 (101.6)	0.318 (8.08)	12.52 (18.64)
4 (100)	...	5	4.500 (114.3)	0.083 (2.11)	3.92 (5.84)
4 (100)	4.500 (114.3)	0.109 (2.77)	5.12 (7.62)
4 (100)	...	10	4.500 (114.3)	0.120 (3.05)	5.62 (8.37)
4 (100)	4.500 (114.3)	0.125 (3.18)	5.85 (8.71)
4 (100)	4.500 (114.3)	0.141 (3.58)	6.57 (9.78)
4 (100)	4.500 (114.3)	0.156 (3.96)	7.24 (10.78)
4 (100)	4.500 (114.3)	0.172 (4.37)	7.96 (11.85)
4 (100)	...	30	4.500 (114.3)	0.188 (4.78)	8.67 (12.91)
4 (100)	4.500 (114.3)	0.203 (5.16)	9.32 (13.89)
4 (100)	4.500 (114.3)	0.219 (5.56)	10.02 (14.91)
4 (100)	STD	40	4.500 (114.3)	0.237 (6.02)	10.80 (16.08)
4 (100)	4.500 (114.3)	0.250 (6.35)	11.36 (16.91)
4 (100)	4.500 (114.3)	0.281 (7.14)	12.67 (18.87)
4 (100)	4.500 (114.3)	0.312 (7.92)	13.97 (20.78)

Table 2-1 Dimensions and Weights (Masses) of Welded and Seamless Wrought Steel Pipe (Cont'd)

NPS (DN)	Identification [Note (1)]	Schedule No.	Outside Diameter, in. (mm)	Wall Thickness, in. (mm)	Plain End Weight (Mass), lb/ft (kg/m)
4 (100)	XS	80	4.500 (114.3)	0.337 (8.56)	15.00 (22.32)
4 (100)	...	120	4.500 (114.3)	0.438 (11.13)	19.02 (28.32)
4 (100)	...	160	4.500 (114.3)	0.531 (13.49)	22.53 (33.54)
4 (100)	XXS	...	4.500 (114.3)	0.674 (17.12)	27.57 (41.03)
5 (125)	5.563 (141.3)	0.083 (2.11)	4.86 (7.24)
5 (125)	...	5	5.563 (141.3)	0.109 (2.77)	6.36 (9.46)
5 (125)	5.563 (141.3)	0.125 (3.18)	7.27 (10.83)
5 (125)	...	10	5.563 (141.3)	0.134 (3.40)	7.78 (11.56)
5 (125)	5.563 (141.3)	0.156 (3.96)	9.02 (13.41)
5 (125)	5.563 (141.3)	0.188 (4.78)	10.80 (16.09)
5 (125)	5.563 (141.3)	0.219 (5.56)	12.51 (18.61)
5 (125)	STD	40	5.563 (141.3)	0.258 (6.55)	14.63 (21.77)
5 (125)	5.563 (141.3)	0.281 (7.14)	15.87 (23.62)
5 (125)	5.563 (141.3)	0.312 (7.92)	17.51 (26.05)
5 (125)	5.563 (141.3)	0.344 (8.74)	19.19 (28.57)
5 (125)	XS	80	5.563 (141.3)	0.375 (9.53)	20.80 (30.97)
5 (125)	...	120	5.563 (141.3)	0.500 (12.70)	27.06 (40.28)
5 (125)	...	160	5.563 (141.3)	0.625 (15.88)	32.99 (49.12)
5 (125)	XXS	...	5.563 (141.3)	0.750 (19.05)	38.59 (57.43)
6 (150)	6.625 (168.3)	0.083 (2.11)	5.80 (8.65)
6 (150)	...	5	6.625 (168.3)	0.109 (2.77)	7.59 (11.31)
6 (150)	6.625 (168.3)	0.125 (3.18)	8.69 (12.95)
6 (150)	...	10	6.625 (168.3)	0.134 (3.40)	9.30 (13.83)
6 (150)	6.625 (168.3)	0.141 (3.58)	9.77 (14.54)
6 (150)	6.625 (168.3)	0.156 (3.96)	10.79 (16.05)
6 (150)	6.625 (168.3)	0.172 (4.37)	11.87 (17.67)
6 (150)	6.625 (168.3)	0.188 (4.78)	12.94 (19.28)
6 (150)	6.625 (168.3)	0.203 (5.16)	13.94 (20.76)
6 (150)	6.625 (168.3)	0.219 (5.56)	15.00 (22.31)
6 (150)	6.625 (168.3)	0.250 (6.35)	17.04 (25.36)
6 (150)	STD	40	6.625 (168.3)	0.280 (7.11)	18.99 (28.26)
6 (150)	6.625 (168.3)	0.312 (7.92)	21.06 (31.33)
6 (150)	6.625 (168.3)	0.344 (8.74)	23.10 (34.39)
6 (150)	6.625 (168.3)	0.375 (9.53)	25.05 (37.31)
6 (150)	XS	80	6.625 (168.3)	0.432 (10.97)	28.60 (42.56)
6 (150)	6.625 (168.3)	0.500 (12.70)	32.74 (48.73)
6 (150)	...	120	6.625 (168.3)	0.562 (14.27)	36.43 (54.21)
6 (150)	6.625 (168.3)	0.625 (15.88)	40.09 (59.69)

Fuente: (American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2018)

Anexo 9. Rugosidad de distintos tipos de materiales

Material	Condición	ϵ		Incertidumbre, %
		ft	mm	
Acero	Lámina metálica, nueva	0,00016	0,05	±60
	Inoxidable	0,000007	0,02	±50
	Comercial, nuevo	0,00015	0,046	±30
	Estriado	0,01	3,0	±70
	Oxidado	0,007	2,0	±50
Hierro	Fundido, nuevo	0,00085	0,26	±50
	Forjado, nuevo	0,00015	0,046	±20
	Galvanizado, nuevo	0,0005	0,15	±40
	Fundido asfáltico	0,0004	0,12	±50
Latón	Laminado	0,000007	0,002	±50
Plástico	Tubo laminado	0,000005	0,0015	±60
Vidrio	—	Liso	Liso	
Hormigón	Liso	0,00013	0,04	±60
	Rugoso	0,007	2,0	±50
Caucho	Liso	0,000033	0,01	±60
Madera	En duelas	0,0016	0,5	±40

Fuente: (White, 2003)

Anexo 10. Coeficiente K para accesorios

Tabla 5.2 Coeficientes K representativos para pérdida de cabeza para varios accesorios [20, 21]

Accesorio	K
Válvula de globo (completamente abierta)	10.0
Válvula de ángulo (completamente abierta)	5.0
Válvula de retención de columpio (completamente abierta)	2.5
Válvula de compuerta (completamente abierta)	0.19
Codo en U	2.2
Conexión en T estándar	1.8
Codo estándar	0.9
Codo de radio medio	0.75
Codo de radio largo	0.60

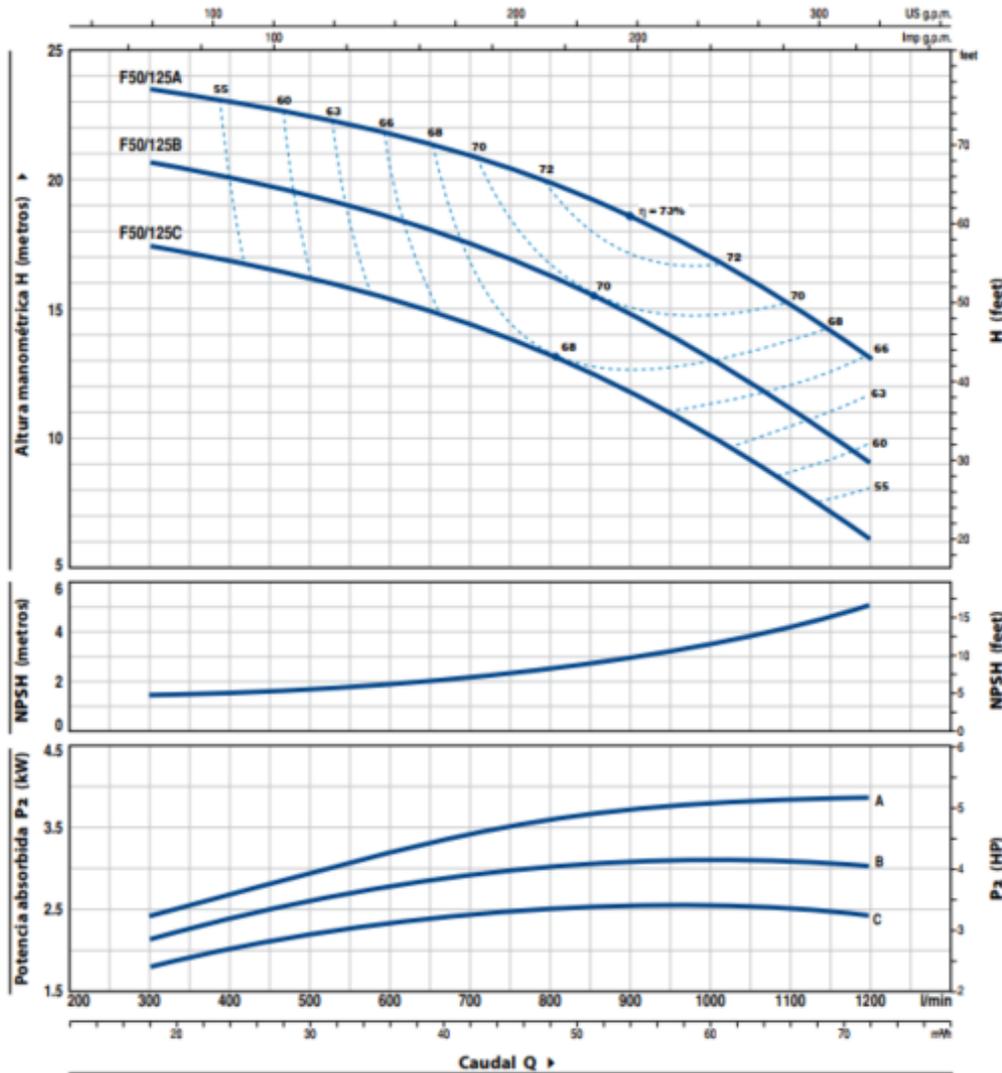
Fuente: (Streeter & Wylie, 1988)

Anexo 11. Curva de rendimiento Bomba Pedrollo F50/125

F50/125

CURVAS Y DATOS DE PRESTACIONES

60 Hz n= 3450 min⁻¹ HS= 0 m



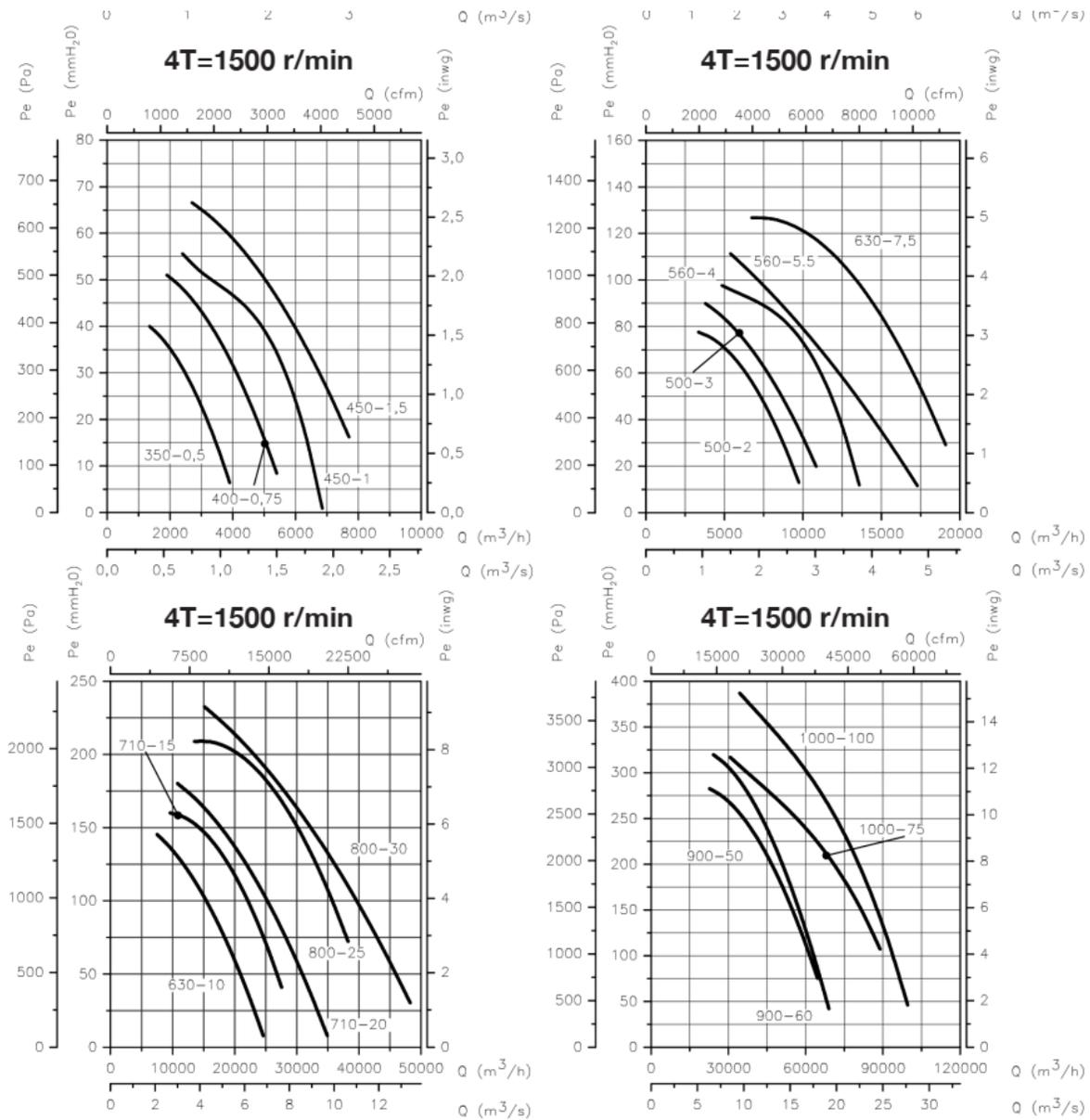
MODELO		POTENCIA (P ₂)		Q	Flow Rate											
Monofásica	Trifásica	kW	HP		m ³ /h	0	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72
-	F 50/125C	2.2	3	H metros	0	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	
-	F 50/125B	3	4		18.5	17.5	17	16.5	15.5	14.8	13.5	12	10.5	8.2	6	
-	F 50/125A	4	5.5		21.5	20.7	20	19.5	18.8	17.8	16.5	15	13.5	11.2	9	

Q = Caudal H = Altura manométrica total HS = Altura de aspiración

Tolerancia de las curvas de prestación según EN ISO 9906 Grado 3B.

Fuente: Catálogo de Electrobombas centrífugas normalizadas Serie F Pedrollo

Anexo 12. Curva de rendimiento ventilador Sodeca CMRS



Fuente: Industrial Fans Catalogo general SODECA